

Esplorare l'uso di fonti alternative e non fossili di carbonio nelle acciaierie elettriche attraverso un modello flowsheet dedicato

I. Matino, V. Colla, O. Toscanelli, A. Soto, A. Zubero

Le acciaierie elettriche svolgono un ruolo fondamentale nella transizione dell'industria siderurgica verso la decarbonizzazione. Poiché i rottami vengono utilizzati come materia prima principale, esse implementano intrinsecamente il concetto di economia circolare. Tuttavia, si stanno investendo ulteriori sforzi di ricerca per adattare il processo di produzione dell'acciaio al forno elettrico ad arco alle nuove sfide legate ai processi "C-lean". I potenziali miglioramenti riguardano il carbonio e l'energia: il carbonio fossile deve essere sostituito da materiali carboniosi di origine biologica o comunque alternativa. Gli effetti dell'introduzione di questi materiali nel percorso standard dell'EAF non sono completamente noti e sono necessarie indagini. La ricerca su questi argomenti fa parte di alcune delle attività previste nel progetto finanziato dall'UE dal titolo "Gradual Integration of REnewable carbon and alternative non-carbon Energy sources and modular HEATing technologies in EAF for progressive CO₂ decrease – GreenHeatEAF". Il progetto si basa sull'applicazione parallela e complementare di test dimostrativi e pilota industriali, simulazioni digitali e strategie di monitoraggio e controllo. Uno degli strumenti applicati in GreenHeatEAF è un modello flowsheet del processo di produzione dell'acciaio al forno elettrico ad arco, che è stato adattato per gestire l'uso e l'iniezione di nuove fonti di carbonio sfruttando la letteratura e dati industriali reali. Prime simulazioni sono state effettuate, che riguardano analisi di sensitività sugli effetti della variazione del contenuto di C ed S nel materiale carbonioso, e analisi di scenario sull'uso di diverse fonti di C alternative. Diversi indicatori chiave di prestazione sono calcolati per confrontare i risultati delle simulazioni. A parità di materiale carbonioso impiegato, i parametri principali di processo e prodotto appaiono influenzati quasi linearmente dalla variazione del contenuto di C e S nel materiale carbonioso. D'altro canto, le diverse fonti di carbonio determinano comportamenti diversi del processo EAF e dei parametri del prodotto senza una chiara correlazione. Ulteriori simulazioni sono in corso per generalizzare i risultati preliminari ottenuti.

PAROLE CHIAVE: SETTORE SIDERURGICO, FORNO ELETTRICO AD ARCO, BIOMASSA, BIOCHAR, FONTI ALTERNATIVE DI CARBONIO, SIMULAZIONE, SOSTENIBILITÀ

INTRODUZIONE

L'Unione Europea (UE) sta concentrando i propri sforzi sulla riduzione delle emissioni di gas serra e sulla massimizzazione dell'applicazione dei concetti di economia circolare per perseguire le ambizioni del Green Deal di rendere l'UE sostenibile e climaticamente neutrale [1]. L'economia circolare può portare a significativi benefici ambientali, come la riduzione dell'utilizzo delle risorse naturali e dello smaltimento in discarica di sottoprodotti potenzialmente valorizzabili. Inoltre, l'economia circolare può ridurre la dipendenza per le materie prime (es. fossili) da paesi geopoliticamente instabili [2]. In questo contesto, la produzione di acciaio tramite forno elettrico ad arco (Electric

**Ismael Matino, Valentina Colla,
Orlando Toscanelli**

TeCIP Institute, Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italy

Aintzane Soto, Asier Zubero

Sidenor, Spain

Arc Furnace - EAF) riveste un ruolo fondamentale in quanto intrinsecamente essa implementa il concetto di economia circolare essendo direttamente coinvolta nel riciclo dei rottami. Tuttavia, è possibile intraprendere ulteriori azioni per consentire pratiche aggiuntive di economia circolare e adattare ulteriormente i processi basati sull'EAF alle nuove sfide relative ai processi cosiddetti "C-lean". Come suggerito nella RoadMap ESTEP "Electric Arc Furnace scrap route roadmap" [3], una possibile opzione è rappresentata dalla sostituzione dei combustibili e materiali carboniosi fossili con altri materiali rinnovabili alternativi contenenti carbonio come biomassa, biochar o anche plastica. Infatti, a seconda del contenuto di carbonio e di altre caratteristiche chimiche, questi materiali possono sostituire l'antracite e il carbone generalmente utilizzati come fonti energetiche o per generare la scoria schiumosa; in tal modo è possibile ridurre le emissioni di CO₂ fossile [4]. Inoltre, materiali come la biomassa si adattano perfettamente al concetto di economia circolare secondo cui "il valore delle risorse viene massimizzato indefinitamente, richiedendo che non si verifichino rifiuti irrecuperabili" [5]. L'interesse verso fonti alternative e non-fossili di carbonio è stato evidenziato in alcune recenti analisi relative all'utilizzo di biomassa e ulteriori fonti alternative di carbonio ed energia nei processi siderurgici [6-8]. In particolare, per quanto riguarda il processo produttivo basato sull'EAF, la biomassa e relativi prodotti dalla sua carbonizzazione risultano adatti a sostituire l'antracite senza effetti negativi sulla qualità del processo, dell'acciaio e delle scorie [6]. Tuttavia, sono state osservate differenze nelle sequenze di reazione o risultati contrastanti per quanto riguarda la formazione della scoria schiumosa a causa di diverse reattività, proprietà fisiche (ad esempio densità), composizioni e contenuto di carbonio dei carbonizzati di biomassa rispetto al carbone fossile. Interessante è anche la ricerca condotta da Dall'Osto et al [9] sull'uso del biochar per alimentare una cella a combustibile a carbonio diretto come fonte alternativa e addizionale di energia per l'EAF.

Tuttavia, nonostante la consistente letteratura, esistono comunque incertezze sugli effetti di questi materiali sul comportamento e sull'evoluzione del processo di produzione dell'acciaio all'EAF, sull'impianto e sul prodotto stesso che limitano il loro utilizzo. Pertanto, ulteriori studi sono in corso per approfondire questo argomento. Sebbene da un lato i test industriali si stanno intensificando [10], dall'altro essi comportano rischi e interruzioni del piano di produzione standard. Quindi, l'orizzonte di esplorazione è generalmente limitato. Per questo motivo,

modelli sviluppati ad-hoc possono aiutare ad esplorare diversi scenari e possono essere complementari alle sperimentazioni industriali per dimostrare la fattibilità tecnica delle soluzioni proposte. Ad esempio, Meier et al. [11-12] con alcune simulazioni dinamiche hanno evidenziato la maggiore velocità di reazione della biomassa rispetto al carbone fossile e hanno utilizzato il modello come base per investigare diverse strategie di controllo dell'uso dell'ossigeno nell'EAF.

Il presente articolo descrive un modello sviluppato durante il progetto finanziato dall'Unione Europea dal titolo "Gradual integration of Renewable non-fossil Energy sources and modular HEATING technologies in EAF for progressive CO₂ decrease - GreenHeatEAF". Il modello permette di analizzare gli effetti dell'utilizzo di fonti alternative di carbonio sul processo EAF e sui prodotti ottenuti ed il suo uso è complementare a test industriali previsti nel progetto.

METODOLOGIA

Il modello presentato e utilizzato nel presente articolo costituisce un miglioramento di un modello sviluppato in passato per rappresentare il processo di produzione dell'acciaio ad arco elettrico dalle fasi di carica dell'EAF sino alle prime fasi della colata continua [13]. Esso permette di simulare le seguenti fasi del processo e i relativi bilanci di massa ed energetici, trasformazioni ed equilibri: carica e fusione, aggiunte all'EAF e relative reazioni, fasi di slagging e tapping, trattamento all'LF, trattamento VD e inizio della colata continua (rappresentato in termini di scambio energetico). Il modello originario è un modello flowsheet stazionario "general-purpose" sviluppato con il software Aspen Plus® per permettere valutazioni di impatto ambientale e di monitoraggio del processo e del prodotto in caso di analisi di scenario [14-17]. È stato sviluppato in maniera tale da essere facilmente configurato, adattato e validato utilizzando dataset industriali facilmente reperibili senza campagne dedicate di raccolta dati. Inoltre, il modello viene continuamente migliorato per poter simulare sempre più aspetti relativi al processo e alle sue modifiche in vista anche di nuove pratiche industriali. In particolare, nel caso presentato, esso è stato inizialmente adattato al processo produttivo Sidenor durante il progetto RFCS iSlag [18] e validato con un dataset relativo a più di 1600 colate per poter simulare 8 famiglie di acciaio (gradi aventi caratteristiche simili). Durante iSlag, il modello è stato anche migliorato rispetto al modello originale per poter meglio predire la quantità e la composizione delle scorie prodotte, in base agli obiettivi del progetto [19]. Partendo da questa versione del

modello, esso è stato ulteriormente migliorato e adattato per poter affrontare le simulazioni relative all'uso di fonti alternative di carbonio nell'EAF come descritto di seguito.

Modellazione dell'uso di fonti alternative di carbonio nell'EAF

Prima di adattare il modello alla simulazione dell'utilizzo nell'EAF delle fonti alternative di carbonio, alcune operazioni preliminari sono state effettuate per aggiornare il modello con dati industriali più recenti e per renderlo idoneo all'adattamento. In particolare, il modello è stato aggiornato con nuovi dati relativi al processo di Sidenor rispetto a quelli utilizzati in [18-19]: i nuovi dati erano relativi a composizioni aggiornate di rottami, leghe di Ferro e altre aggiunte. Tuttavia, la maggior parte delle attività preliminari è stata concentrata sulla modellazione delle fonti alternative di carbonio selezionate in base alla loro disponibilità e caratteristiche. Esse sono state modellate in Aspen Plus® come solidi non convenzionali definiti come specie chimiche non pure, per le quali generalmente mancano dati sugli equilibri e sulle proprietà fisiche e caratterizzate in termini di fattori empirici. Pertanto, i solidi non convenzionali sono stati definiti attraverso le "ultimate, proximate e sulphur analyses", definite come di seguito:

- "ultimate analysis" si riferisce alla composizione della biomassa nei principali componenti (es. carbonio, zolfo,

ossigeno, idrogeno, cloro, azoto);

- "proximate analysis" si riferisce al contenuto di umidità, ceneri, carbonio fisso e sostanze volatili;
- "sulphur analysis" si riferisce al tipo di composti dello zolfo (approssimati in questo caso come organici).

La maggior parte delle informazioni erano disponibili. I dati mancanti (vale a dire il contenuto di idrogeno e ossigeno) sono stati stimati affinché il potere calorifico superiore (PCS) corrispondesse a quello noto. Per lo scopo è stato utilizzato un modello ausiliario. I risultati relativi ai materiali con C fisso superiore al 40% sono riportati nella Tabella 1, dove sono riportate sia le caratteristiche già disponibili che quelle simulate; la tabella contiene anche i dati relativi agli pneumatici, perché sono uno dei materiali selezionati per i test reali, e all'antracite perché è il materiale sostituito. In Tabella 1 è possibile trovare anche il confronto tra i PCS reali e simulati che sono tra di loro fortemente simili (solo nel caso della plastica si ha una deviazione più accentuata).

Successivamente, sono state effettuate delle modifiche al modello originario in termini di aggiunta, modifica e tuning di correnti, blocchi e reazioni per permettere la carica e/o l'iniezione delle fonti alternative di carbonio rispettivamente direttamente al forno o attraverso il 5° foro e per considerarne i relativi effetti sul processo, sulle correnti materiali ed energetiche e sulle composizioni dell'acciaio liquido e dei sottoprodotti.

Tab.1 - Caratteristiche disponibili e ricavate dei materiali carboniosi considerati (la definizione della tipologia di materiale corrisponde a quella fornita dal fornitore).

MATERIALI CARBONIOSI SELEZIONATI											
Al	Materiale	C Fisso	S	N	H dal modello	O dal modello	Umidità	Volatili	Ceneri	PCS reale	PCS simulato
		% m/m1.9								kcal/kg4.8	
Rif.	Antracite	84.0	1.00	1.20	5.21	0.59	6.00	8.00	8.00	8250	8250
A	Biochar	87.7	0.00	0.00	3.45	6.35	32.6	9.80	2.50	8048	8048
B	Biochar	62.2	0.00	0.00	4.92	13.38	12.9	18.3	19.5	6090	6115
C	Biochar	64.0	0.00	0.00	2.67	9.33	0.00	0.00	24.0	6000	5786
D	Biochar (di riferimento)	80.0	0.80	2.00	0	9.2	13.0	12.0	8.00	6360	6446
E	Biochar	70.0	0.85	2.00	1.57	18.08	13.0	21.0	7.50	5776	5776
F	Biochar	41.3	0.26	0.00	8.61	16.03	0.00	24.9	33.8	5259	5307
G	Biochar	80.0	0.03	0.00	3.36	12.45	7.00	8.90	4.16	7214	7214
H	Biochar	95.0	0.01	0.29	1.55	1.74	0.80	3.00	1.40	8264	8264
I	Pneumatici	28.7	1.80	0.54	27.02	34.64	0.49	64.0	7.29	8938	8938
L	Plastica	97.2	0.03	0.00	0.2	0	0.15	0.23	2.57	9715	8084
M	Subcoal	48.0	0.08	0.58	5.81	32.03	5.30	69.3	13.5	4691	4691

In questa fase sono state utilizzate le informazioni reperibili in letteratura [6-12; 20-26], ma soprattutto dati reali provenienti da Sidenor relativi a circa 280 colate di test industriali preliminari effettuati iniettando nel 5° foro il

biochar D della Tabella 1 al posto dell'antracite utilizzata per iniziare il processo di produzione di scoria schiumosa. Le principali modifiche al flowsheet del modello sono riportate nella Figura 1.

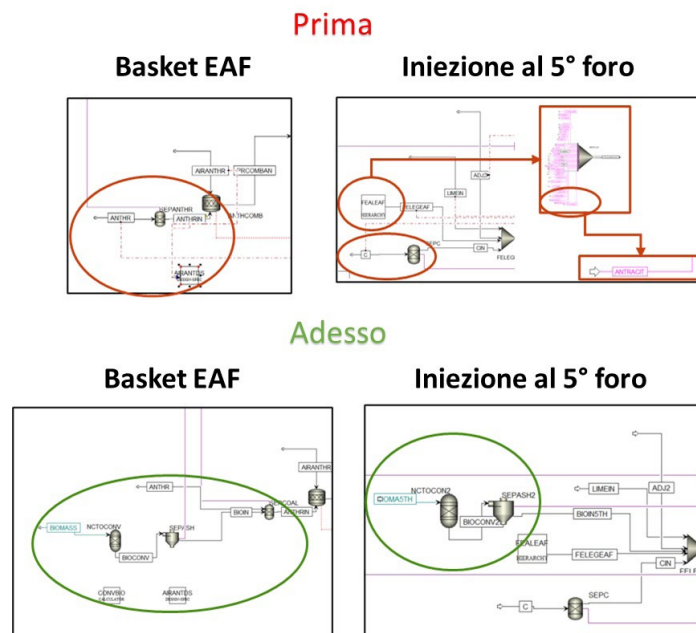


Fig.1 - Differenze tra il flowsheet del modello prima e dopo l'adattamento per l'utilizzo di fonti di carbonio alternative.

RISULTATI

Il modello flowsheet adattato come descritto nella sezione precedente è stato validato e testato con i dati industriali disponibili. Esso inoltre è utilizzato per effettuare delle analisi di scenario riguardo agli effetti che l'utilizzo di materiali carboniosi alternativi possono avere sul processo EAF e sui relativi prodotti.

Validazione e test del modello

La validazione del modello è stata effettuata simulando, per ciascuna famiglia di acciai considerata, una colata media utilizzando i dati storici medi e confrontando poi i risultati con i relativi dati medi; le simulazioni di validazione hanno mostrato alti livelli di accuratezza del modello che poi è stato testato per valutare la propria robustezza prima di essere utilizzato. I test sono stati effettuati simulando colate storiche random non utilizzate nella validazione e comparando i risultati simulati con i dati appartenenti alla colata simulata. La Figura 2 mostra un esempio di comparazione tra una colata testata per una famiglia di

acciai: un insieme di grafici mostrano il confronto tra diverse variabili simulate con i dati reali relativi. Sebbene, come atteso, rispetto agli errori ottenuti in validazione, i test hanno mostrato errori più elevati, essi comunque sono accettabili e il modello si dimostra accurato e robusto.

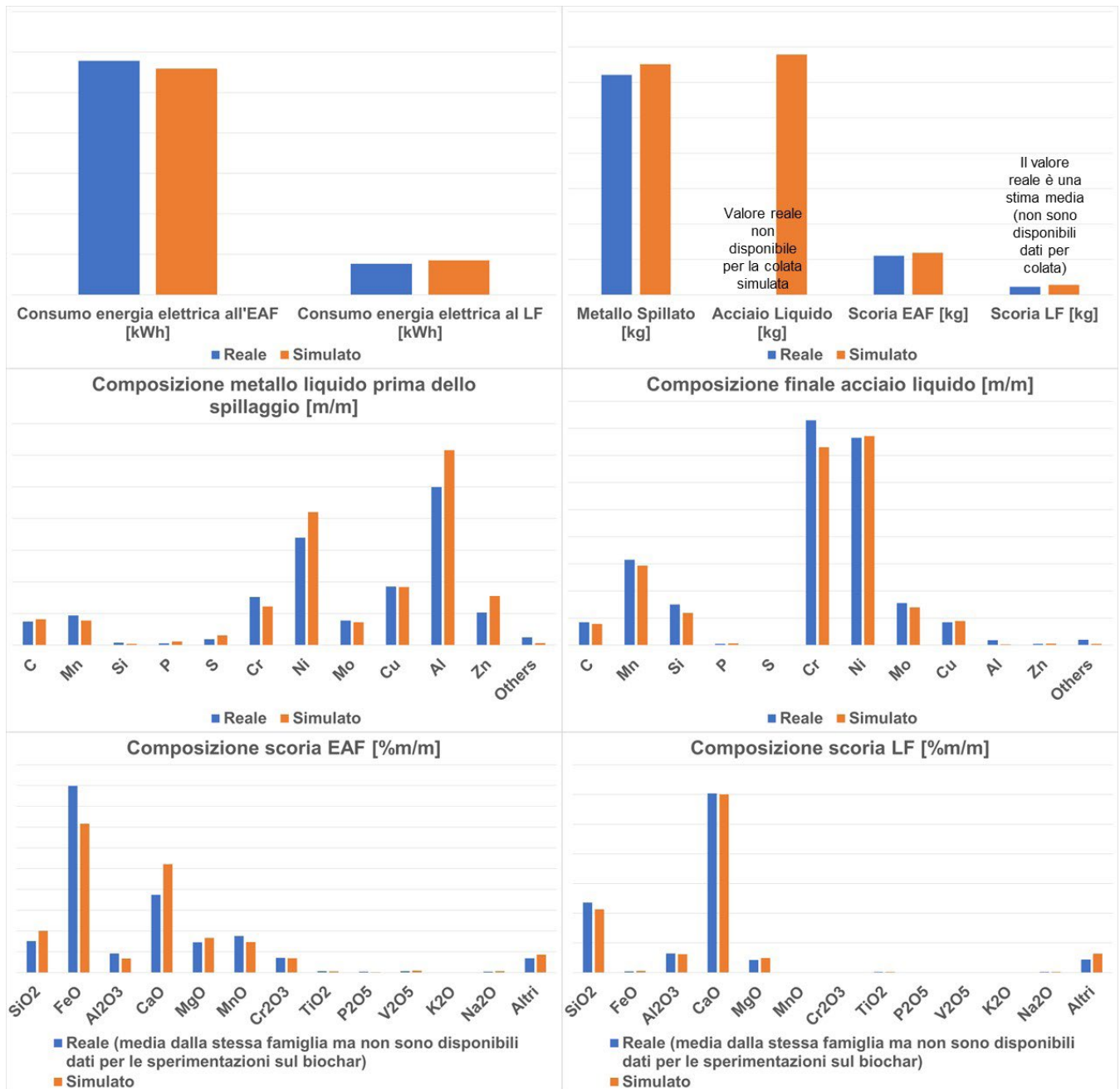


Fig.2 - Esempio di confronto dei risultati delle simulazioni di una colata testata con i dati reali relativi (i valori non sono mostrati per ragioni di riservatezza).

Utilizzo del modello

Il modello adattato e validato è stato utilizzato per simulare diversi scenari relativi all'uso di fonti alternative di carbonio nell'EAF. Gli scenari analizzati si possono suddividere in due categorie:

1. Analisi di sensitività sulle colate utilizzate per testare il modello, modificando in un intervallo compreso tra -25% e +25% il contenuto di C e S nel biochar D di Tabella 1 utilizzato nei test industriali; il contenuto degli altri componenti è stato adattato di conseguenza.
2. Simulazioni sulle colate utilizzate per testare il

modello, utilizzando diversi materiali carboniosi aggiunti in maniera tale che:

- a. sia sempre assicurata la stessa quantità di carbonio alimentato;
- b. sia sempre garantita la stessa quantità di energia fornita.

I risultati delle simulazioni sono utilizzati per ricavare i seguenti Indicatori di Prestazione (KPIs), seguendo l'esempio di [27]: Energia elettrica consumata nell'EAF, emissioni di CO₂ dall'EAF, efficienza metallica, contenuto di C e S nel metallo spillato e scoria prodotta all'EAF.

Alcuni risultati preliminari sono di seguito presentati per la stessa colata mostrata nella Sezione 3.1 come test del modello.

La Figura 3.a, b e c mostra i principali risultati ottenuti variando il contenuto di carbonio nel biochar. Si possono osservare dei comportamenti quasi lineari con delle variazioni contenute dei KPIs analizzati; ciò è dovuto al fatto che la quantità di antracite sostituita è solo di qualche centinaio di chilogrammi. Come atteso, l'energia elettrica necessaria per l'EAF cala con l'aumentare della

disponibilità di carbonio; esso comporta inoltre un aumento del suo contenuto nel metallo spillato. Le scorie prodotte subiscono un leggerissimo calo con l'aumentare del carbonio nel biochar. Le emissioni di CO₂ e l'efficienza metallica sono invece scarsamente influenzate.

Il principale effetto di un aumentato contenuto di S nel biochar è mostrato in Figura 3.d: come atteso, si ha un aumento pressoché lineare del contenuto di S nel metallo spillato.

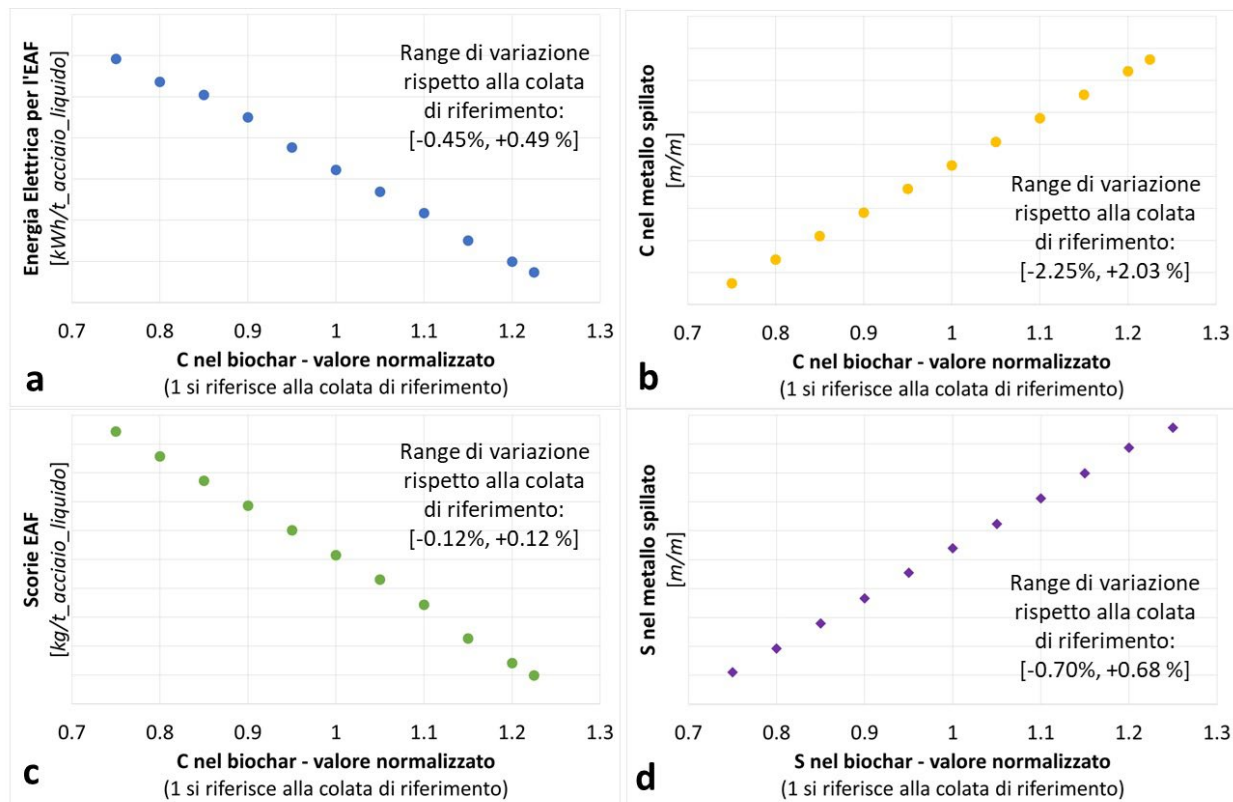


Fig.3 - Principali risultati delle Simulazioni 1: a. relazione tra Energia Elettrica per l'EAF e il C nel biochar, b. relazione tra il C nel metallo spillato e il C nel biochar, c. relazione tra le Scorie EAF e il C nel biochar, d. relazione tra lo S nel metallo spillato e lo S nel biochar

Per quanto riguarda le simulazioni effettuate variando la tipologia di materiale carbonioso il confronto tra gli effetti relativi all'uso dei diversi materiali è mostrato in grafici a radar nelle Figure 4 e 5, rispettivamente per le simulazioni effettuate mantenendo costante la quantità di C iniettato (Simulazioni 2.a) e la quantità di energia fornita (Simulazioni 2.b).

Ogni materiale carbonioso influenza in maniera differente i KPIs monitorati senza chiare correlazioni e, ovviamente, le variazioni non sono particolarmente elevate, vista la bassa quantità di antracite sostituita. I KPIs maggiormente influenzati nel caso delle Simulazioni 2.a sono l'energia

elettrica, le emissioni di CO₂ e il contenuto di S nel metallo spillato. Gli altri KPIs sono invece quasi stabili. Nelle Simulazioni 2.b, invece, solo l'efficienza metallica non è quasi influenzata.

Comunque, particolarmente evidente per entrambe le simulazioni è il forte impatto che l'antracite ha sulle emissioni di CO₂ all'EAF rispetto agli altri materiali carboniosi: non solo essa contribuisce ad emissioni di CO₂ fossile, ma porta anche al maggior quantitativo di CO₂ emesso all'EAF. Anche la produzione di scoria appare maggiore quando si impiega l'antracite.



Fig.4 - Principali risultati delle Simulazioni 2.a.

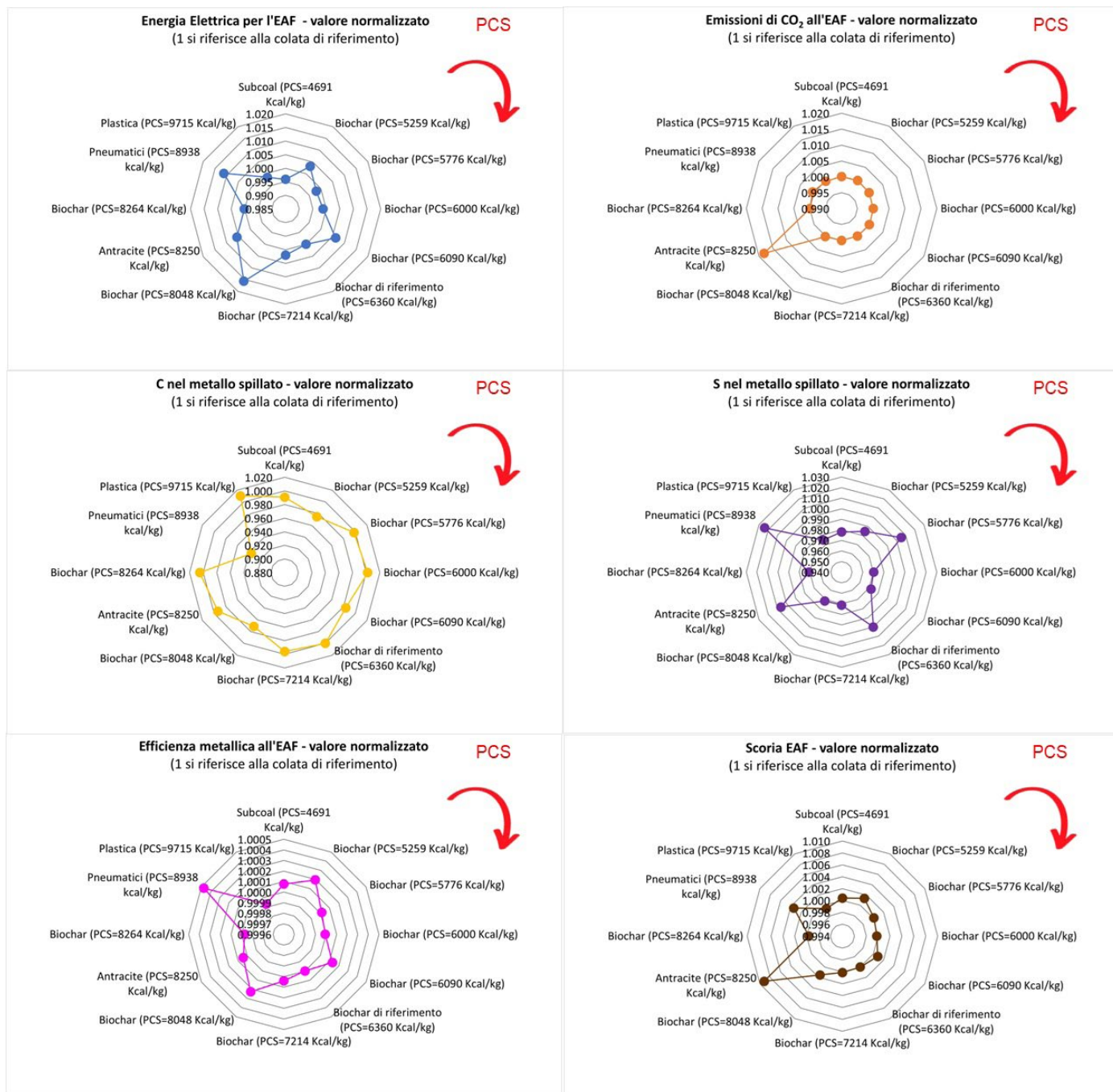


Fig.5 - Principali risultati delle Simulazioni 2.b.

CONCLUSIONI

È stato presentato un modello flowsheet del processo di produzione dell'acciaio da ciclo elettrico, che è stato adattato per permettere la simulazione dell'uso di fonti non-fossili di carbonio nell'EAF. Il modello è stato configurato, validato e testato partendo da dati di letteratura ed utilizzando dati reali industriali relativi a test preliminari di iniezione di biochar dal 5° foro. L'accuratezza e la robustezza del modello si è dimostrata sufficiente per le investigazioni previste. Il modello validato è quindi utilizzato per varie analisi di scenario per studiare gli effetti sul processo e sui prodotti dell'uso di materiali carboniosi alternativi nell'EAF. Sono mostrati i primi risultati ottenuti. Mantenendo fissa la tipologia di biochar utilizzato, la variazione del contenuto di C e S sembra influenzare in maniera piuttosto lineare i KPIs monitorati. Al contrario, variando il materiale carbonioso a parità di C o di energia fornita, si osservano effetti strettamente correlati al materiale carbonioso e pressoché non correlabili tra di loro. Inoltre, alcuni KPIs sono più influenzati di altri. Tuttavia, l'uso di antracite comporta in ogni caso la maggior quantità di emissioni di CO₂ dall'EAF e la maggior produzione di scorie.

I risultati mostrati sono solo preliminari: ulteriori simulazioni sono in corso considerando altre colate,

altre famiglie di acciaio, differenti miscele di materiali carboniosi e sostituendo una maggiore quantità di carbonio fossile, ad esempio, andando a sostituire non solo l'antracite iniettata nel 5° foro per iniziare il processo di formazione di scoria schiumosa ma anche il "foaming coal" introdotto per alimentare e continuare il processo. Inoltre, le potenzialità del modello saranno ulteriormente ampliate permettendo l'alimentazione di fonti alternative di ferro e l'utilizzo di idrogeno nell'EAF in maniera da studiarne i relativi effetti e impatti.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro descritto nel presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto intitolato "Gradual Integration of REnewable carbon and alternative non-carbon Energy sources and modular HEATling technologies in EAF for progressive CO₂ decrease," (Rif. – GreenHeatEAF, Grant Agreement No. 101092328)", co-finanziato dall'Unione Europea attraverso il programma Horizon Europe, a cui vanno i nostri ringraziamenti. La responsabilità dei temi trattati nel presente lavoro è unicamente degli autori; la Commissione non è responsabile dell'uso che potrà essere fatto delle informazioni qui contenute.

BIBLIOGRAFIA

- [1] European Parliament, "Green Deal: key to a climate-neutral and sustainable EU" [Online], https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20200618STO081513/green-deal-europeo-la-chiave-per-un-ue-sostenibile-e-climaticamente-neutrale?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=DSA&at_goal=TR_G&at_audience
- [2] European Parliament, "Circular economy: definition, importance and benefits," [Online], https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits?at_campaign=20234-Economy&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=eu%20circular%20econ
- [3] ESTEP, Improve the EAF scrap route for a sustainable value chain in the EU Circular Economy scenario – ROADMAP, 2021 [Online], <https://www.estep.eu/assets/Uploads/Improve-the-EAF-scrap-route-Roadmap-Final-V2-3.pdf>
- [4] Norgate T, Haque N, Somerville M, Jahanshahi S. Biomass as a source of renewable carbon for iron and steelmaking. 2012. *ISIJ international*, 52(8), 1472-1481.
- [5] Sherwood J. The significance of biomass in a circular economy. 2020. *Bioresource Technology*, 300, 122755.
- [6] Echterhof T. Review on the use of alternative carbon sources in EAF steelmaking. 2021. *Metals*, 11(2), 222.
- [7] Wei R, Zhang L, Cang D, Li J, Li X, Xu CC. Current status and potential of biomass utilization in ferrous metallurgical industry. 2017. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 511-524
- [8] Mapelli C, Dall'Osto G, Mombelli D, Barella S, Gruttadauria A. Future Scenarios for Reducing Emissions and Consumption in the Italian Steelmaking Industry. 2022. *steel research international*, 93(5), 2100631.
- [9] Dall'Osto G, Mombelli D, Pittalis A, Mapelli C. Biochar and other carbonaceous materials used in steelmaking: Possibilities and synergies for power generation by direct carbon fuel cell. 2023. *Biomass and Bioenergy*, 177, 106930.
- [10] Bianco L, Porisensi S. Trasformazione da lineare a circolare del processo EAF. Esperienza in FERRIERE NORD SPA: il caso della scoria siviera e dei carboni. 2016. *La Metallurgia Italiana*, (10).

- [11] Meier T, Hay T, Echtherhof T, Pfeifer H, Rekersdrees T, Schlinge L, Elsabagh S, Schliephake H. Process modeling and simulation of biochar usage in an electric arc furnace as a substitute for fossil coal. 2017. *steel research international*, 88(9), 1600458.
- [12] Meier T, Echtherhof T, Pfeifer H. Investigating the Use of Biomass and Oxygen in Electric Steelmaking by Simulations Based on a Dynamic Process Model. 2017. In Proceedings of 2nd ISIJ-VDEh-Jernkontoret Joint Symposium, Stockholm, Sweden, June 2017.
- [13] Matino I, Alcamisi E, Colla V, Baragiola S, Moni P.. Process modelling and simulation of electric arc furnace steelmaking to allow prognostic evaluations of process environmental and energy impacts. 2016. *Matériaux & Techniques*, 104(1), 104.
- [14] Matino I, Colla V, Colucci V, Lamia P, Baragiola S, Di Cecca C. Improving sustainability of electric steelworks through process simulations. 2016. *Chemical Engineering Transactions*, 52.
- [15] Colla V, Matino I, Cirilli F, Jochler G, Kleimt B, Rosemann H, Unamuno I, Tosato S, Gussago F, Baragiola S, Klung JS, Peña Quintero B, Alonso A, De Miranda U. Improving energy and resource efficiency of electric steelmaking through simulation tools and process data analyses. 2016. *Matériaux & Techniques*, 104(6-7), 602.
- [16] Matino I, Colla V, Baragiola S. Electric energy consumption and environmental impact in unconventional EAF steelmaking scenarios. 2017. *Energy Procedia*, 105, 3636-3641.
- [17] Matino I, Colla V, Baragiola S. Quantification of energy and environmental impacts in uncommon electric steelmaking scenarios to improve process sustainability. 2017, *Applied Energy*, 207, 543-552.
- [18] GA: 899164, Optimising slag reuse and recycling in electric steelmaking at optimum metallurgical performance through on-line characterization devices and intelligent decision support systems – iSlag, <https://www.islag.eu/>
- [19] Petrucciani A, Zaccara A, Matino I, Colla V, Ferrer M. Flowsheet Model and Simulation of Produced Slag in Electric Steelmaking to Improve Resource Management and Circular Production. 2022. *Chemical Engineering Transactions*, 96, 121-126.
- [20] Demus T, Echtherhof T, Pfeifer H. Replacement of fossil carbon with biogenic residues in the electric steelmaking process. In Proceedings of the International Workshop EAF Perspectives on Automation, Materials, Energy & Environment, Milano, Italy, 29–30 March 2012.
- [21] Cirilli F, Baracchini G, Bianco L. EAF long term industrial trials of utilization of char from biomass as fossil coal substitute. 2017. *La Metallurgia Italiana*, 109, 13–17.
- [22] Echtherhof T, Demus T, Pfeifer H, Schlinge L, Schliephake H. Investigation of palm kernel shells as a substitute for fossil carbons in a 140 t DC Electric Arc Furnace. In Proceedings of the 11th European Electric Steelmaking Conference & Expo. 11th European Electric Steelmaking Conference & Expo, Venice, Italy, 25–27 May 2016; pp. 1–10.
- [23] Robinson R, Brabie L, Pettersson M, Amovic M, Ljunggren R. An Empirical Comparative Study of Renewable Biochar and Fossil Carbon as Carburizer in Steelmaking. 2022. *ISIJ International*, 62(12), 2522-2528
- [24] Mayyas M, Nekouei RK, Sahajwalla V. Valorization of lignin biomass as a carbon feedstock in steel industry: Iron oxide reduction, steel carburizing and slag foaming. 2019. *Journal of Cleaner Production*, 219, 971-980.
- [25] Kieush L, Schenk J, Koveria A, Rantitsch G, Hrubiak A, Hopfinger H. Utilization of Renewable Carbon in Electric Arc Furnace-Based Steel Production: Comparative Evaluation of Properties of Conventional and Non-Conventional Carbon-Bearing Sources. 2023. *Metals*, 13(4), 722
- [26] Echtherhof T, Pfeifer H. Study on biochar usage in the electric arc furnace. 2014. In 2nd International Conference Clean Technologies in the Steel Industry.
- [27] Matino I, Colla V, Cirilli F, Kleimt B, Unamuno Iriondo I, Tosato S, Baragiola S, Klung JS, Peña Quintero B, De Miranda, U. Environmental impact evaluation for effective resource management in EAF steelmaking. 2017. *La Metallurgia Italiana*, (10), 48-58.

Exploring the use of alternative non-fossil carbon sources in electric steelworks through dedicated flowsheet model

Electric steelworks play a fundamental role in the steelmaking transition towards decarbonization. Since scraps are used as their main feedstock, they intrinsically implement the circular economy concept. Nevertheless, further research efforts are being spent to adapt the EAF steelmaking process to the new challenges related to C-lean processes. Potential improvements are related to carbon and energy: fossil carbon has to be replaced by bio-based or alternative carbon materials. The effects of the introduction of these materials in the standard EAF route are not completely known and investigations are needed. Research on these topics is included in some of the activities foreseen in the EU-funded project entitled "Gradual Integration of REnewable carbon and alternative non-carbon Energy sources and modular HEATling technologies in EAF for progressive CO₂ decrease – GreenHeatEAF". It relies on the parallel and complementary application of industrial demonstration and pilot tests, digital simulations, and monitoring and control strategies. One of the tools applied in GreenHeatEAF is a flowsheet model of the EAF steelmaking route. It has been adapted for managing the use and injection of novel carbon sources by exploiting literature and real industrial data. First simulations have been carried out, which are related to sensitivity analyses on the effects of the variation of C and S content in the alternative C-source, and to scenario analyses related to the usage of different alternative C-sources. Key Performance Indicators have been computed for comparing the results from simulations. For the same carbonaceous material, the main process and product parameters seem almost linearly correlated to the variation of C and S content in the carbonaceous material. On the other side, different alternative and non-fossil C-sources gives different behaviours of the EAF route and of product parameters without a clear correlation. Further simulations are ongoing to generalize the preliminary results obtained.

KEYWORDS: STEEL SECTOR, EAF, BIOMASS, BIOCHAR, ALTERNATIVE CARBON SOURCES, SIMULATION, SUSTAINABILITY

[TORNA ALL'INDICE >](#)