

# La tecnologia del forno intelligente (iEAF®): concetti di base, descrizione generale e dettagli della prima installazione

P. Clerici, V. Scipolo, P. Galbiati, E. Malfa, V. Volponi

*L'iEAF® di Tenova è un innovativo sistema di automazione per il controllo dinamico e l'ottimizzazione olistica del forno elettrico ad arco. I modelli matematici del processo vengono utilizzati, unitamente alla composizione chimica dei fumi (acquisita tramite il sistema di analisi proprietario EFSOP™), ed insieme anche ad altre informazioni relative allo stato del processo ottenute tramite sensori innovativi sviluppati appositamente per l'applicazione sull'EAF, al fine di calcolare i bilanci di massa ed energia in modo dinamico ed in tempo reale. L'insieme dei modelli e dei sensori permette all'operatore di disporre di informazioni critiche per la produzione quali l'energia netta fornita alla carica metallica, la percentuale di fusione del rottame, la temperatura e composizione del bagno e della scoria.*

**PAROLE CHIAVE:** analisi dei fumi, bilancio di massa ed energia, produzione acciaio all'EAF, decarburazione, acciaieria, modellazione, controllo processi, energia

## L'iEAF® di TENOVA: CONCETTI DI BASE

I modelli di base del sistema iEAF® sono stati realizzati tenendo conto delle molteplici varianti del processo di produzione dell'acciaio al forno elettrico. In questo modo il sistema risulta applicabile ad ogni tipologia di EAF: tradizionale con carica rottame in cesta, con carica continua tipo shaft o Consteel® ovvero forni che utilizzano altri materiali come DRI o carica calda.

I componenti principali del sistema iEAF® sono:

- I sensori innovativi e la strumentazione
- I modelli di Controllo di Processo in real-time
- I moduli di controllo ed ottimizzazione.

Di seguito è sviluppata una breve descrizione per ciascuno dei componenti.

### Sensori e Strumentazione

Lo sviluppo di nuovi sistemi di controllo ed automazione applicati al forno elettrico ad arco (EAF) è stato storicamente limitato dalla difficoltà di "misurare" le grandezze significative del processo utilizzando strumenti affidabili ed a bassa manutenzione adeguati per il difficile ambiente di acciaieria.

Il componente di base del sistema iEAF® è costituito dal sistema di analisi in linea degli off-gas denominato EFSOP®: esso comprende una sonda raffreddata e brevettata di prelievo del campione dei fumi, una linea calda di trasporto del campione sino al quadro dell'analizzatore EFSOP® dove il campione viene condizionato ed analizzato fornendo i valori di CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>. Due ulteriori sensori sono stati sviluppati in aggiunta al sistema EFSOP® per permettere la caratterizzazione degli off-gas in uscita dal forno: un pirometro ad infrarosso per misurare la tem-

perature dei fumi ed una sonda di pressione per rilevare la pressione statica dei gas nel condotto primario dell'EAF. Questa sonda, progettata in modo analogo a quella dell'EFSOP® si è dimostrata più affidabile e a minore necessità di manutenzione di quelle normalmente impiegate sinora e disponibili sul mercato. Utilizzando le misure degli off-gas di cui sopra è possibile calcolare in modo sufficientemente preciso la portata dei fumi stessi. Una valutazione ancora più accurata è possibile attraverso l'impiego di un secondo analizzatore accoppiato ad un misuratore tradizionale di portata posizionato in una posizione "downstream" applicando il criterio del bilancio di carbonio.

In aggiunta a quanto sopra sono stati messi a punto strumenti e sensori che potenzialmente potrebbero diventare parte del pacchetto iEAF®:

- Una telecamera, installata di fronte alla porta di scorifica, che rileva il flusso di scorifica e, sulla base di una elaborazione di immagine ed un algoritmo personalizzabile per ogni impianto, calcola la portata di scoria e la relative quantità in peso.
- Celle di carico, standard per i forni Tenova con Consteel®, per fornire una indicazione del peso in modo continuo.
- Sensori laser per misurare la posizione degli elettrodi ed in modo indiretto calcolare l'altezza del bagno e del piede liquido.
- Misura continua della temperatura del bagno piatto con sistemi pirometrici.

### Modelli dinamici del processo

Il cuore del sistema iEAF® è costituito dai modelli matematici del processo che calcolano le variabili che non possono essere misurate. Ciascuno dei tre modelli corrisponde ad una delle fasi individuabili nell'EAF:

- Il "Freeboard Model" (modello della fase gassosa) dell'iEAF® descrive la fase gassosa.
- Il "Melting Model" (modello di fusione) dell'iEAF® descrive la fase solida.
- Il "Bath/Slag Model" (modello bagno-scoria) dell'iEAF® descrive la fase liquida.

Il Freeboard Model dell'iEAF® ha come inputs la portata di os-

P. Clerici - Tenova, Milano, Italy

V. Scipolo - Tenova Goodfellow, Toronto, Canada

P. Galbiati - TenarisDalmine, Dalmine, Italy

E. Malfa, V. Volponi - Centro Sviluppo Materiali, Italy



**FIG. 1** *iEAF® pagine operative del sistema.*  
*iEAF® SCADA operating displays.*

sigeno e combustibili, l'energia elettrica e la portata, temperatura e composizione degli off-gas. Su tale base vengono calcolati i bilanci di massa che permettono a loro volta di ricavare in modo dinamico l'ossidazione e la decarburazione.

Un'altra parte del modello si occupa del bilancio di energia che permette di calcolare le perdite nette di energia dai gas. L'energia netta viene poi ripartita tra perdite al forno ed energia fornita per riscaldare/fondere la parte solida (rottame, DRI, aggiunte, etc.) ed il bagno/scoria.

Il "Melting model" dell' iEAF® è stato sviluppato in collaborazione con il CSM sulla base degli algoritmi dell' iCSMelt® (8). Partendo dall'energia netta (sia chimica che elettrica) il modello calcola la distribuzione dell'energia tra riscaldamento (aumento della temperatura della carica) e fusione (dal solido al liquido). In tale modo si calcola il grado di fusione e ciò permette di "sincronizzare" la colata non solo sulla base del consumo di energia (kwh/ton).

Il "Dynamic Bath/Slag model" dell' iEAF® è basato sul software dyCoSMelt® (9) del CSM che descrive le condizioni bagno/scoria per il convertitore BOF, adattato per l'uso nell' EAF. Questo modello valuta in real-time lo stato del bagno e della scoria (temperatura e composizione).

La diversità di base tra l'approccio di Tenova e quello di altri sta nel fatto che la composizione degli off-gas non è un parametro stimato ma è un valore rilevato dall'impianto in modo continuo ed affidabile e ciò permette di calcolare un bilancio che veramente tiene in conto la variabilità del processo all'EAF durante la colata e tra una colata e l'altra..

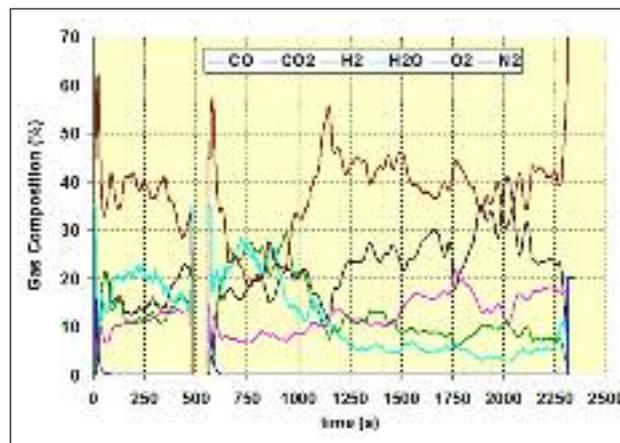
### La sincronizzazione dell' EAF

Normalmente l'apporto di energia chimica al forno è regolato sulla base di profili che definiscono i set points in funzione dell'energia specifica (kWh/t). Ciò significa che il funzionamento del forno è temporizzato/sincronizzato sulla base dell'"orologio" dell'energia specifica.

Ciò però non sempre corrisponde al reale avanzamento del processo che invece deve garantire una progressiva fusione della carica. Il principio dell'iEAF® e dei suoi modelli è quello di modificare i set-points chimici ed elettrici sulla base dell'avanzamento della fusione (melting percentage).

### Moduli di Controllo, Ottimizzazione e Sicurezza

L' iEAF® comprende i moduli di controllo ed ottimizzazione che realizzano le azioni sull'impianto in funzione dei valori di pro-



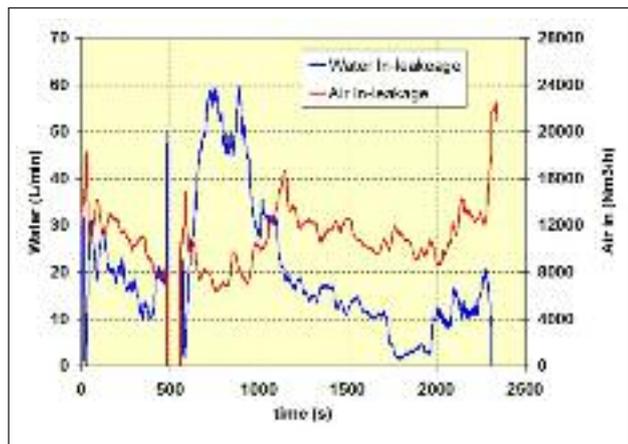
**FIG. 2** *Profilo della chimica dei fumi per una colata tipica di TenarisDalmine.*  
*Offgas profile of a typical heat at TenarisDalmine.*

cesso misurati e/o calcolati dai modelli. Tra questi moduli quelli più significativi sono:

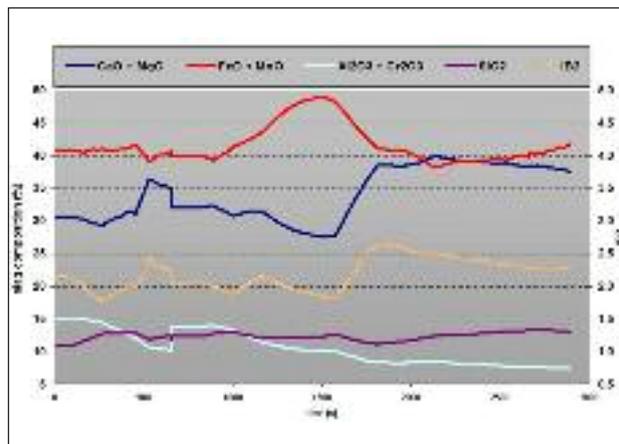
- Il modulo di rilevazione presenza acqua in forno;
- Il modulo di ottimizzazione della post-combustione (su base di minor costo);
- L'ottimizzatore dell'energia elettrica;
- Il modulo di riconoscimento dell'inizio di affinazione;
- Il modulo per l'ottimizzazione della scoria schiumosa;
- Il modulo di "End-point detection".

### RISULTATI PRELIMINARI DELLA PRIMA APPLICAZIONE DELL' iEAF® IN TENARIS DALMINE

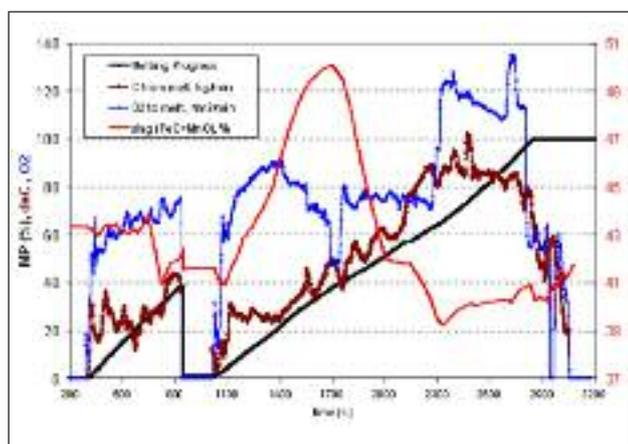
TenarisDalmine, stabilimento di Dalmine (BG) Italy, ha accettato di collaborare alla installazione e prova della prima applicazione della tecnologia iEAF® di Tenova. Un esempio delle pagine SCADA realizzate per TenarisDalmine, è riportato in Figura 1. I modelli di processo di iEAF® sono installati e funzionanti. La Figura 2 riportata la tipica composizione degli off-gas di una colata. Durante la fase di fusione si nota una concentrazione di acqua compresa tra 15%-30%; durante l'affinazione invece si aggira attorno al 5%. Gli elevati valori riscontrati in fusione sono legati alla evaporazione dell'acqua che entra con il rottame, a quella di raffreddamento elettrodi ed alla combustione degli idrocarburi.



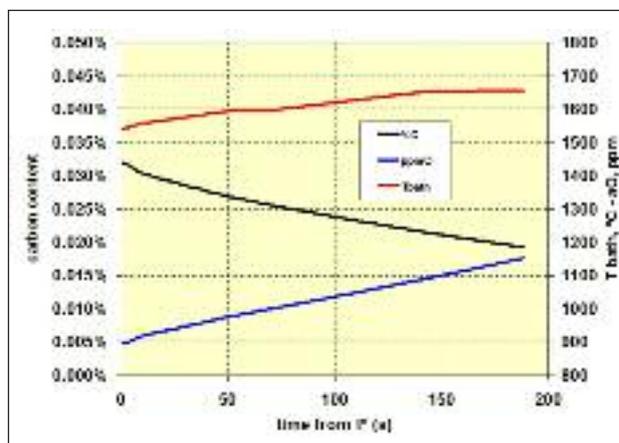
**FIG. 3** *Profilo della portata di acqua ed aria calcolata in entrata al EAF nel corso di una colata tipica.*  
Profile of calculated rates of water and air entering the EAF over the course of a typical heat.



**FIG. 5** *Profilo calcolato di composizione scoria.*  
Calculated profile of slag composition.



**FIG. 4** *Percentuale di ossidazione (non comprendendo carbonio) e di decarburazione confrontate con la portata di O<sub>2</sub> iniettato.*  
Oxidation rate (not including carbon) and decarburization compared to the rate of O<sub>2</sub> injection.

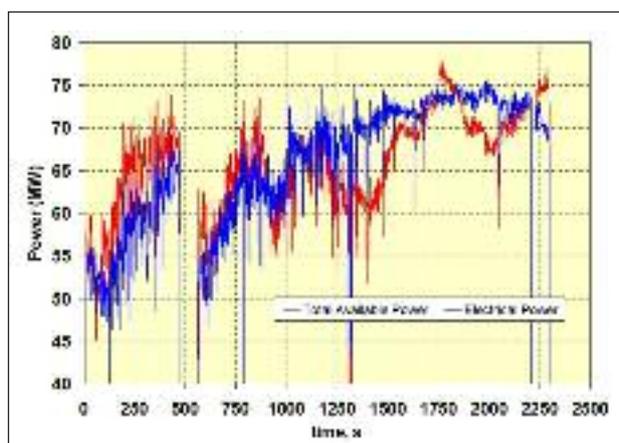


**FIG. 6** *Profilo di temperature e carbonio stimati.*  
Profile of estimated bath temperature and carbon.

Il bilancio di idrogeno e nitrogeno rende possibile il calcolo della portata di aria ed acqua che entra come mostrato in Figura 3. La Fig. 4 mostra, per una colata tipica, le percentuali di ossidazione e decarburazione con l'evoluzione del contenuto di FeO + MnO nella scoria. Si vede in modo chiaro come l'ossidazione della carica sia influenzata dalle condizioni del processo (la sovraossidazione della seconda cesta e l'influenza del carbone iniettato). Questo dimostra come l'iEAF® possa sfruttare le misure degli offgas per valutare importanti parametri di processo come ossidazione e decarburazione.

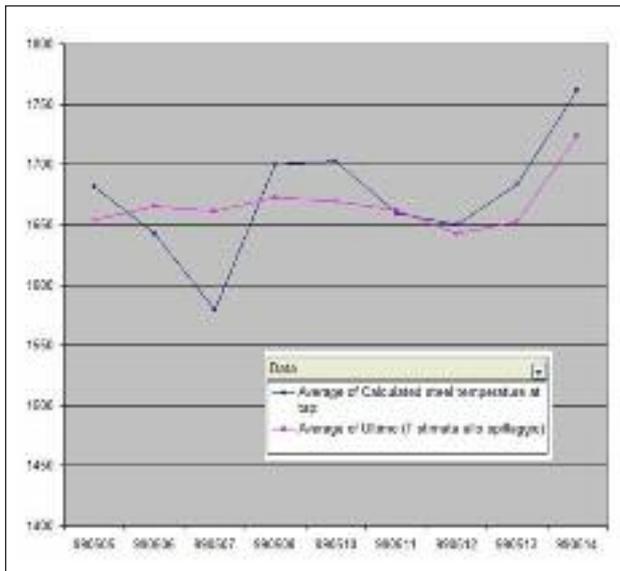
Anche la composizione della scoria viene calcolata durante la colata come mostrato in Fig. 5. Il sistema calcola anche l'indice di basicità IB2; in futuro questo dato, insieme con il "Isothermal Stability Diagrams (ISD)", permetterà di mostrare la schiumosità della scoria ed in tale modo prendere decisioni sul controllo dell'iniezione di carbone e calce per ottenere la formazione ottimale della scoria schiumosa.

Il modello bagno/scoria dell'iEAF® permette di calcolare in tempo reale la temperature ed il carbonio del bagno come mostrato in Fig. 6. Questo calcolo è la base per realizzare l' "end-point optimizer".



**FIG. 7** *Confronto tra la Potenza totale disponibile e quella puramente elettrica.*  
A comparison of the total available power with electrical power.

I modelli dell' iEAF® calcolano in modo dinamico il bilancio di energia. La Figura 7 mostra la potenza disponibile per scaldare e fondere rispetto a quella puramente elettrica. L'energia disponibile è quella totale fornita (elettrica più chimica) meno le perdite attraverso i pannelli raffreddati e gli offgas. Come



**FIG. 8** Confronto tra la temperatura di spillaggio calcolata e misurata (in gradi Celsius) per una sequenza di 9 colate consecutive.

*A comparison of the calculated and measured tap temperatures (in degrees Celsius) for a string of 9 consecutive heats.*

evidenziato, durante la fusione della prima cesta, la potenza disponibile supera quella elettrica di circa 5 MW, dimostrando i benefici della post-combustione. Al contrario durante l'affinazione la potenza disponibile è inferiore a quella elettrica per circa 10 MW per poi aumentare sino ad essere uguale al tempo 1700 secondi. Da quel punto decresce. Ciò indica la possibilità di ottimizzazione tramite riduzione delle perdite.

La Figura 8 mostra il confronto tra le temperature di spillaggio calcolate dall' iEAF® e quelle reali misurate per 9 colate consecutive. Si nota che in un solo caso la differenza tra la temperatura stimata e quella reale è superiore a 20 gradi Celsius.

#### BENEFICI ATTESI E SVILUPPI FUTURI

L' iEAF®, una volta completata la messa a punto definitiva, sarà in grado di portare benefici importanti in aggiunta a quelli già verificati e legati alla grande quantità di informazioni aggiuntive, fornite dai modelli.

Durante la fusione la migliore gestione e controllo della chimica garantisce:

- La riduzione del tempo di power-on.
- La riduzione dei ritardi dovuti al caricamento anticipato della carica.
- La riduzione delle perdite dovute al ritardo di caricamento della carica.
- L'ottimizzazione dell'utilizzo di ossigeno, combustibile ed energia elettrica.
- Un più efficiente controllo dell'impianto fumi bilanciato tra le

prestazioni del forno e la riduzione degli scarichi.

• Aumento della sicurezza in acciaieria.  
I moduli di controllo avanzato della fase di affinazione (Refining Start, Foamy Slag Optimizer, End-Point Optimizer) permettono di:

- Evitare la sovraossidazione del bagno ed in tale modo minimizzare le perdite di resa metallica e l'uso di costosi de-ossidanti.
- Bilanciare la pratica della scoria schiumosa ottenendo una riduzione del consumo di refrattario, una diminuzione delle perdite di energia ed un miglioramento della resa grazie alle perdite in scoria.
- Ridurre la variabilità dell'end-point genera un miglioramento dei flussi e della logistica globale dell'acciaieria ed un minor numero di campioni di temperature e carbonio prima dello spillaggio.

In generale la migliore conoscenza del processo di produzione dell'acciaio all' EAF contribuirà ad un più efficiente funzionamento ed allo studio di nuove strategie di ottimizzazione. Luminari e pionieri della termodinamica come William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907), hanno detto: "Quando tu puoi misurare ciò di cui stai parlando, esprimendolo in numeri, tu sai qualcosa; ma quando non sei in grado di misurarlo e non sei in grado di esprimerlo in numeri, allora la tua conoscenza è scarsa ed insoddisfacente ....." L' iEAF® è stato pensato e progettato per descrivere il processo all'EAF il più possibile in modo quantitativo e con ciò portare ad un controllo il più possibile efficiente

#### REFERENCES

- 1) J. MAIOLO, E.J. EVENSON, O.I. NEGRU, Goodfellow EFSOP® Successes at TAMSA, Veracruz. AISTech 2004, Nashville, TN, Sept 2004.
- 2) J. KELLEHER, M.I. KHAN, Yield and Productivity Savings Using Goodfellow EFSOP® at MacSteel Arkansas. AISTech 2006, Cleveland, OH, May 2006.
- 3) D.VENSEL, M.I. KHAN, EAF Performance Improvement at Nucor Steel Auburn using Goodfellow EFSOP®. AISTech 2006, Cleveland, OH, May 2006.
- 4) K. NIKKANEN, M.I. KHAN, J. GAVIÑA, Furnace Water Leak Detection and Reduced Costs Efforts at Aceria Compacta de Bizkaia, Spain using the Goodfellow EFSOP® System. AISTech 2007, Indianapolis, IN, May 7-10, 2007.
- 5) J.A. MAIOLO, M. BOUTAZAKHTI, C.W. LI, C. WILLIAMS, Developments towards an Intelligent Electric Arc Furnace at CMC Texas using Goodfellow EFSOP® Technology. AISTech 2007, Indianapolis, IN, May 7-10, 2007.
- 6) M. POZZI, J.A. MAIOLO, D. MASOERO, V. SCIPOLO, N. VENERI, Operating Results of Goodfellow EFSOP®. METEC 2007, Dusseldorf, Germany, June 2007.
- 7) V. SCIPOLO, M.I. KHAN, S. PATIL, Optimization of the EAF Process at CAPE GATE (PTY) LTD. (Davsteel Division) using Goodfellow EFSOP® Technology. 9th European Electric Steelmaking Conference, Krakow, Poland, June 2008.
- 8) P.FRITTELLA, A. LUCERELLI, B. POIZOT, M. LEGRAND, "EAF OPERATING PRACTICE OPTIMIZATION (ICSMELT®), Paper n° 19 of present conference
- 9) A. DI DONATO et others, "Mathematical Model of LD Converter Process", 2nd European Oxygen Steelmaking Congress, EOSC '97, Taranto, Italy, 13-14-15 October 1997

## Abstract

### The intelligent furnace technology (iEAF®): conceptual design, technical overview and details about the first installation

**KEYWORDS:** off-gas analysis, mass and energy balances, process control, EAF steelmaking

Tenova's iEAF® is an innovative automation system for the dynamic control and holistic optimization of the electric arc furnace. Mathematical process models are used, along with real-time off-gas composition (EFSOP™ off-gas analysis system), and other process information provided by novel sensors developed for the EAF, to calculate dynamically mass and energy balances of the furnace in real-time. These models and sensors provide the operator with crucial steel-making information such as the net energy to the metallic charge, scrap melting percent and bath and slag composition and temperature.

The increased process knowledge provided by the iEAF® makes it possible to take a holistic approach to furnace optimization and control that can be tailored to the operational objectives of the meltshop (e.g. increased productivity, improved economical performance through reduced conversion costs, reduced process variability, environmental and/or safety).

This paper outlines the main components and features of this innovative technology including results from its premier implementation at TenarisDalmine.

The iEAF® dynamic process models have been implemented at TenarisDalmine and efforts are being made towards tuning and validation. The iEAF® control modules have also been developed and installed. Once fully implemented, the iEAF® will provide a variety of benefits to the steel-maker over and above the already significant advantages provided by the increased amount of information provided by the models.

During the melting phase, the pacing and control of the chemical package will ensure:

- A reduction in power-on-time.
- A reduction in delays attributed charging the furnace too early.
- A reduction in energy losses attributed to charging the furnace too late.
- Optimization of oxygen, fuel and electrical energy usage.
- Efficient fume system control that is balanced against furnace performance and melt-shop air quality.
- Safety in the melt shop through the early detection of water in the freeboard.

The advanced control modules for refining (Refining Start, Foamy Slag Optimizer, End-Point Optimizer) will ensure:

- Avoiding over-oxidation of the bath and thereby minimizing yield losses and the use of expensive de-oxidants.
- Balancing the foamy slag practice and thereby decreasing refractory wear, decreasing energy losses during refining and increasing yield through slag losses.
- Reduction in the number of samples of temperature and carbon required to conclude a heat.

The deeper understanding of the EAF steelmaking process and operation provided by the iEAF® will no doubt contribute greatly towards more efficient operation and to the development of future optimization strategies for the EAF. Scientist and pioneer in thermodynamics, William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907), has been quoted as having said: "When you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge of it is of a meager and unsatisfactory kind..." It follows that one cannot possibly control what one cannot measure. The iEAF® has been designed to explain the EAF process as quantitatively as possible by using real-time measurements of furnace off-gas composition and other measurable process parameters. It builds upon this information through process models that quantify the EAF process dynamically and in real-time. Quantification of the process enables precise control of the melting and refining phases of the operation; first of all through pacing of the furnace according to the total energy (not only electrical) delivered to the scrap and steel, and secondly through optimization modules that have been designed to control the furnace in the most efficient manner possible.