

# BALANÇO TÉRMICO DE FORNO ELÉTRICO A ARCO – SIMPLES E INTELIGENTE<sup>1</sup>

*Lauro José de Sales Chevrant*<sup>2</sup>  
*Fernando Souza Cândido*<sup>3</sup>

## **Resumo**

O entendimento das energias envolvidas nos processos de fabricação de aço traz várias fórmulas termodinâmicas enquanto que os dados reais são de difícil ou quase impossível medição. No caso específico do Forno Elétrico a Arco, daqui por diante denominado FEA, vários estudiosos desenvolveram Balanços Térmicos utilizando ferramentas termodinâmicas e empíricas. Esse trabalho mostra um modelo desenvolvido com o auxílio de dados termodinâmicos e observações práticas que incluíram “n” discussões com especialistas em Aciaria, muitas medições práticas em um FEA, com controle operacional rígido e repetibilidade de dados. Esse modelo tem sido aplicado em inúmeros FEAs e também em EOF com sucesso e de maneira dinâmica e atualizada, por isso, pode ser denominado como simples e inteligente devido a sua facilidade de entendimento e a didática simples e objetiva do modelo. Os resultados obtidos através de simulação mostram que é possível aplicar o modelo em diferentes tipos de FEAs.

**Palavras-chave:** Forno elétrico a arco; Balanço térmico.

## **EAF THERMAL BALANCE – EASY AND SMART**

### **Resumo**

The understand of the energies involved in steelmaking process, means the clear understanding of thermodynamics formulations and also many considerations of data that must be deducted when is impossible to measure the parameters.

Been specific for EAF, many researchers are doing considerations to have an easy understanding of this issue. This paper shows a model developed during years by the author involving the following: Technical discussions with steelmakers; Measurements in one well controlled EAF; Learning process with Electrical Engineers; Testing the model in many EAF and EOF; Validation for general calculations. This model was developed from 1986 up today. The result shows a good way to have an easy understanding of the EAF energies.

**Key words:** Electric arc furnace; Thermal balance.

---

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

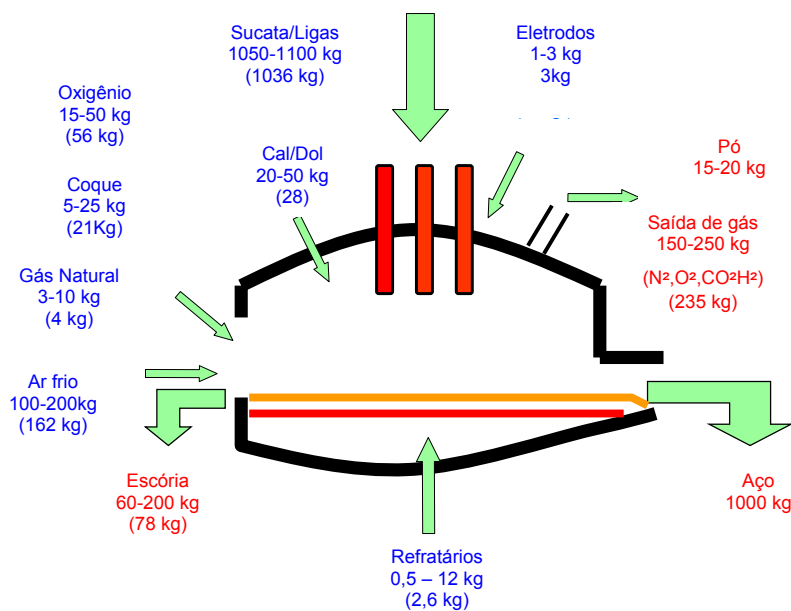
<sup>2</sup>*Eng.º Metalúrgico, Membro da ABM e Consultor Técnico da Chevrant Tecnologia Siderúrgica.*

<sup>3</sup>*Eng.º Mecânico, M.Sc., Gerente da Aciaria da Siderúrgica Marabá - Simara.*

# 1 INTRODUÇÃO

O entendimento das energias envolvidas nos processos de fabricação de aço, traz várias fórmulas termodinâmicas enquanto que os dados reais são de difícil ou quase impossível medição.

Vários autores então procuram estabelecer formulações mais simples que usam dados termodinâmicos e também dados práticos com empirismos, que visam facilitar o entendimento. A Figura 1 ilustra uma simplificação do balanço térmico do processo do FEA.<sup>(1)</sup>



**Figura 1** – Simplificação do Balanço térmico do Processo do FEA.<sup>(1)</sup>

A Figura 2 <sup>(2)</sup> é uma imagem artística muito bem elaborada por Ernandes M. S. Rizzo, no Livro editado pela ABM em 2006, intitulado “Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Fornos Elétricos a Arco”.

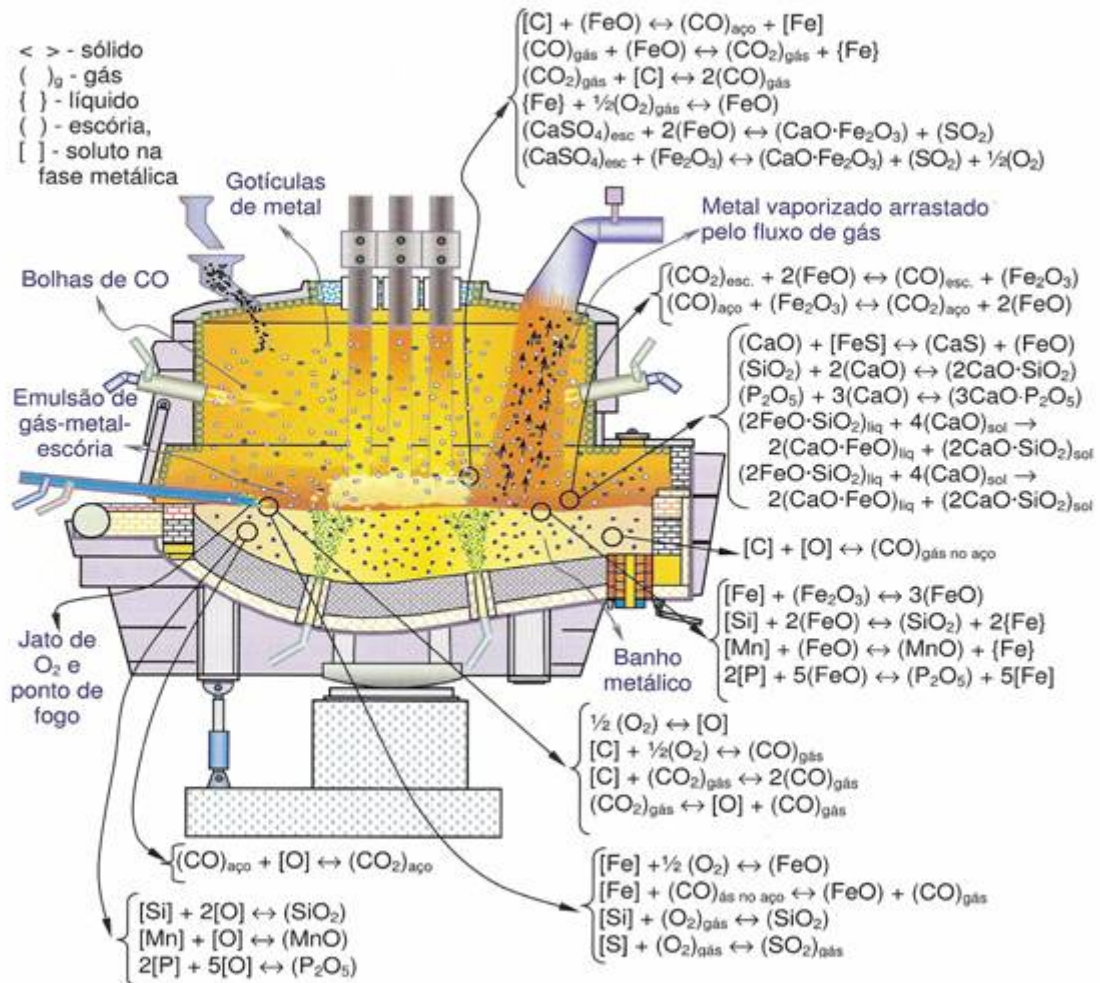


Figura 2 – Balanço das principais reações químicas que ocorrem no FEA<sup>(2)</sup>.

No decorrer deste trabalho, estes tipos de modelos são desenvolvidos, mostrando uma facilidade e uma simplicidade muito importante para os especialistas em Aciaria entender os processos de balanço térmico no Forno Elétrico a Arco – FEA.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

No caso específico do FEA, vários estudiosos desenvolveram diferentes Balanços Térmicos. Este trabalho mostra um modelo desenvolvido pelo autor com o auxílio de dados termodinâmicos e observações práticas, que incluíram:

- ✓ Muitas discussões com especialistas em Aciaria.
- ✓ Observações e medições práticas em FEAs com controle operacional rígido e repetibilidade de resultados.
- ✓ Aprendizado e contribuições de especialistas em eletro-mecânicas.
- ✓ Aplicação do modelo em inúmeros FEAs e EOFs.

Este modelo vem sendo utilizado e atualizado constantemente em diferentes FEAs desde 1986 e prossegue até o momento de maneira simples e dinâmica.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Algumas Formulações Desenvolvidas

A formula abaixo mostra a formulação de Siegfried Köle desenvolvida com uma base de dados de inúmeros FEAs no mundo.

#### FÓRMULA DE SIEGFRIED KÖHLE PARA CONSUMO DE ENERGIA EM FEA <sup>(1)</sup>

$$1 . W_r/kWh/t = 375 + 400x(Ge/Ga-1) + 80xG_{dri}/hbi/Ga) - 50x(G_{shr}/Ga) - 350x(G_{hm}/Ga) + 1000x(G_z/Ga) + 0,3x(Ta/^{\circ}C - 1600) + 1x(T_s/min+T_n/min) - 8x(Mg/m^3/t) - 4,3x(MI/ m^3/t) - 2,8x(Mn/ m^3/t + Nv(W_v-W_{vn}/Wh/t)$$

A Tabela 1 apresenta a fórmula de Siegfried Köle.

**Tabela 1.** Fórmula de Siegfried Köle.

Wr	Consumo específico de energia elétrica	MI	Consumo específico de oxigênio
Ge	Peso dos materiais ferrosos	Gdri	Peso de DRI
Ga	Peso vazado	Ghbi	Peso de HBI
Gz	Peso dos formadores de escória	Gshr	Peso de sucata shredder
Ta	Temperatura de vazamento	Ghm	Peso de gusa líquido
Ts	Tempo de "power on"	Wv	Perdas de energia
Tn	Tempo de "power off"	Wvn	Valor médio de Wv
Mg	Consumo específico de gás natural	Nv	Fator forno (0,2 – 0,3 – 0,4 etc)

Como pode ser visto esta formulação envolve fatores de:

- ✓ Energia Elétrica;
- ✓ Pesos das matérias primas;
- ✓ Pesos dos produtos – aço e escória;
- ✓ Temperaturas;
- ✓ Tempos;
- ✓ Consumo de combustíveis fósseis;
- ✓ Consumo de oxigênio por lança e por injetores;
- ✓ Perdas térmicas;
- ✓ Energia aplicada;

Destes envolvimento, o Fator Forno supõe inferições empíricas para cada FEA analisado.

Outra fórmula que está ilustrada a seguir é a da Ucar Company Inc.

### **FÓRMULA DA UCAR CARBON COMPANY INC. E PARA CONSUMO DE ENERGIA EM FEA <sup>(2)</sup>**

$$2 . E.T. (kWh/t) = E.E. + 10, x GN + 5,2 x (O2 - 2 x GN - 2 x Óleo - 1,5 x GLP) + 1,1 x \%Gusa - 1 x \%DRI + 4,5 x \%(GL)$$

A Tabela 2 mostra as variáveis consideradas na fórmula da Ucar.

**Tabela 2** – Variáveis consideradas na fórmula da Ucar.

E.T.	Energia Total – kWh/t		GN	Gás Natural – Nm <sup>3</sup> /t
E.E.	Energia Elétrica – kWh/t		O2	Oxigênio Total - Nm <sup>3</sup> /t
Óleo	Peso de óleo combustível – kg/t		GLP	Volume de GLP - Nm <sup>3</sup> /t
GL	Gusa Líquido		DRI	% de Ferro Esponja

Como pode ser visto, esta formulação envolve menos variáveis que a formula anterior.

Dedicado a simplificar o entendimento do balanço térmico do FEAs o Engenheiro Lauro Chevrand vem atualizando e acompanhando os resultados obtidos no modelo, que começou a ser desenvolvido em 1986. Este modelo está constantemente sendo otimizado e aplicado em diferentes FEAs no Brasil e em países como Peru, Argentina e Chile.

### **FÓRMULA DO ENGº LAURO CHEVRAND PARA BALANÇO DE ENERGIA NO FEA**

Esta formulação mostra que é possível ter resultados conclusivos e de fácil análise mediante uma equação extremamente simples de apenas uma variável inferida, que são as "perdas" do sistema.

Da mesma maneira que não consideramos energias geradas de difícil mensuração, também não consideramos perdas que não podem ser facilmente medidas.

Estas desconsiderações envolvem como exemplo, energia gerada pela oxidação de metais pelo ar atmosférico que entra no FEA. Também não consideramos as perdas provocadas por este ar atmosférico que entra.

As Tabelas 3, 4, 5, 6, 7 e 8 mostram os dados considerados no desenvolvimento do balanço térmico simplificado.

**Tabela 3** – Dados da carga metálica.

% de sucata	% de sucata de ferro fundido
% de gusa sólido	% de gusa líquido
% de sucata de gusa	% de DRI
Rendimento - %	% de cales – função do rendimento

**Tabela 4** – Dados da temperatura dos componentes da carga.

Tabela IV – Dados da Temperatura dos componentes da carga	
sucata – 70 °C	sucata de gusa - 70 °C
gusa sólido - 70 °C	sucata de ferro fundido - 70 °C
gusa líquido – 1350 °C	DRI - 70 °C

**Tabela 5** – Calor específico.

Tabela V – Calor Específico	
Aço ou ferro-gusa sólido = 0,1940 kWh/t x °C (até 1480 °C)	
Aço líquido ou ferro-gusa líquido acima de 1480 °C = 0,2333 kWh/t x °C	
Calor latente de fusão do aço ou do ferro-gusa = 58 kWh/t	

**Tabela 6** – Energias para obtenção de 1 tonelada de aço líquido a 1520 °C de diferentes fontes.

via sucata a 1.520 °C = $(1480-70) \times 0,194 \times 1 + (1520-1480) \times 0,2333 \times 1 + 58 = 340$ Kwh/t
via ferro-gusa 1.520 °C = 340 Kwh/t
via sucata de ferro-gusa 1.520 °C = 340 Kwh/t
via ferro-gusa líquido 1.520 °C = $(1520-1350) \times 0,2333 = 39,66$ Kwh/t
via DRI = $1437 - G \times 9,43$ – DRI de processo MIDREX (G = grau de metalização)
Considerando-se G = 94%, a energia para fundir 1 t de DRI é de 550,58 Kwh/t

**Tabela 7** – Energias consideradas para obtenção de 1 tonelada de escória a 1520°C.

Energia de fusão para formação de 1 t de escória = $340 \times 1,30 = 442$ kWh/t
--

**Tabela 8** – Relação entre rendimento metálico, peso de cales adicionadas e o peso total de escória.

Rendimento metálico - % aço líquido/carga metálica x 100	Cales Kg/t	Peso total de escória Kg/t
91,5	36	145
91,0	40	150
90,0	41	155
89,0	43	160
88,0	44	165
87	45	170
86	46	175

**Tabela 9** – Relação entre as perdas térmicas, a capacidade do FEA, o tap to tap e o tempo de power on.

As perdas térmicas são aqui definidas como sendo tão somente, o somatório dos seguintes fatores abaixo. Este sistema foi desenvolvido por ser mensurável			
perdas no circuito secundário		perdas nos painéis refrigerados da carcaça	
perdas nos painéis refrigerados da abóbada		perdas pela soleira do Forno	
Capacidade do FEA t/corrida	Tap to tap min	% de Power On	Perdas kWh/t
100 a 120	60	75	125
	55	78	123
	50	80	120
	45	85	118
	40	90	115
70 a 100	60	75	127
	55	78	125
	50	80	123
	45	85	120
	40	90	118
40 a 70	60	75	129
	55	78	127
	50	80	125
	45	85	123
	40	90	120

A Tabela 10 mostra os dados utilizados no modelo e os resultados obtidos através de simulações.

**Tabela 10 – Resultados e dados utilizados na simulação do modelo.**

3 - Aplicação do modelo							
MODELO - OBJETIVO - CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA							
	Capacidade do FEA				100	t de AL/corrida	
	Potência do Trafo				90	MVA	
	Fator de Potência				0,85	cos $\psi$	
	Rendimento metálico médio				90%		
	Dados da carga de Metálicos				%	kg/t de AL	
	Sucatas + Gusa Sólido + Ferro Fundido				50%	556 0,50	
	Gusa Líquido				30%	333 0,30	
	Ferro Esponja (DRI)				20%	222 0,20	
					100%	1.111 1,00	
	Escória					kg/t de AL	
	Peso de cales (Dolomítica + Calcítica)				44		
	Peso de Escória				155		
	Energéticos						
					kWh/Nm3	Nm3/t	
	Oxigênio por Injetores no banho (tipo CoJet)			5,00		15	
	Oxigênio por lança pela porta do FEA			3,50		25	
	Oxigênio para pós-combustão			1,00		10	
						Nm3/t	
	Gas Natural (GN)			8,50		10	
	Oxigênio para GN					20	
	Escória espumante						
	Carbono para escória espumante			10		kg/t de AL	
	Temperatura					oC	
	Temperatura média da carga sólida considerada					70	
	Temperatura considerada para Aço e Escória líquida inicial					1.520	
	Temperatura de Vazamento do FEA					1.620	
	Perdas Energéticas						
	Perdas Energéticas consideradas no balanço simplificado					115 kWh/t AL	
	Tap to Tap					45 minutos	
	Energias de fusão					kWh/t	
	Energia para fusão de sucatas, gusa e ferro fundido 1.520 oC					340	
	Energia para aquecer o Gusa Líquido de 1350 a 1520 oC					40	
	Energia para fusão de 1 t de DRI 1.520 oC					551	
	Energia para fusão de 1 t de escória a 1.520 oC					442	
	Calor específico do AL					0,2333 kWh/txoC	
	BALANÇO TÉRMICO SIMPLIFICADO - MODELO						kWh/t
FUSÃO	Energia para fusão de sucatas, gusa e ferro fundido 1.520 oC					189	
	Energia para aquecer o Gusa Líquido de 1350 a 1520 oC					13	
	Energia para fusão de 1 t de DRI 1.520 oC					122	
	Energia para formação da Escória a 1.520 oC					69	
AQUECIMENTO	Energia para aquecer 1 t de AL de 1520 a 1.620 oC					23	
	Energia para aquecer a escória de 1520 a 1.620 oC					5	
PERDAS	Energia de perdas					115	
	TOTAL DE ENERGIA CONSIDERADA						536 kWh/t
	ORIGEM DAS ENERGIAS						kWh/t
	Energia fornecida pelo O2 via lança					29	
	Energia fornecida pelo O2 via sistema tipo CoJet					75	
	Energia fornecida pelo O2 de pós-combustão					10	
	Energia fornecida pelo Gas Natural (GN)					85	
	Energia Elétrica Calculada (Balanço)					348	
	TOTAL DE ENERGIA CONSIDERADA						546 kWh/t
	Consumo estimado de eletrodos					3,50 g/kWh	
						1,22 kg/t AL	
	Cálculo do tempo de Powe On					27 minutos	



## **4 CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos através de simulação do modelo mostram que é possível utilizar o modelo em vários tipos de FEAs, independente da sua capacidade, fornecendo elementos de fácil análise e entendimento para otimizar o processo do FEA.

Esse modelo tem sido aplicado em inúmeros FEAs e também em EOF com sucesso, de maneira dinâmica e atualizada, por isso, pode ser denominado como simples e inteligente devido a sua facilidade de entendimento e a didática simples e objetiva do modelo.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 Trabalho da UCAR Carbon Ink – XXXV – Seminário de Fusão, Refino e Solidificação de Metais – Vitória – 2004.
- 2 Ernandes M. S. Rizzo, no Livro editado pela ABM em 2006, intitulado “Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Fornos Elétricos a Arco”.
- 3 Aciaria Elétrica – Anos 90 – ABM – 1995 – Lauro Chevrand.