

# CORREÇÃO ESTEQUIOMÉTRICA DINÂMICA E CONTROLE DE COMBUSTÃO NO FORNO DE IGNIÇÃO DA SINTERIZAÇÃO DA ARCELORMITTAL TUBARÃO\*

Raphael Dias de Medeiros<sup>1</sup>

Gabriel Nazareth G. Alcoforado<sup>2</sup>

Marcio de Souza Lana<sup>3</sup>

Flávio Túlio Busatto<sup>4</sup>

João Bosco Mendes<sup>5</sup>

Leonardo Passos Perdigão<sup>6</sup>

## Resumo

O processo de sinterização inicia-se na etapa de ignição da camada superficial da mistura à sinterizar. Essa ignição é realizada através do calor fornecido por um forno, chamado "Forno de Ignição", sendo que essa queima deve possuir potencial calorífico suficiente para iniciar o processo de aglomeração. Em função da movimentação horizontal e do fluxo de ar que passa através do material, essa frente de queima superficial é transportada até atingir as zonas inferiores do leito, produzindo assim o sinter. Quanto maior o poder calorífico do combustível utilizado, mais eficiente (menor consumo de combustível e maior temperatura) é a queima superficial, elevando assim a resistência mecânica do produto durante o processo. Em função de variações na qualidade do combustível, manter a temperatura de ignição controlada, torna-se um desafio, sendo assim, nesse trabalho foi realizado um estudo sobre a combustão do gás de coqueria (COG), avaliando não somente as suas relações estequiométricas de combustão mas também a estratégia de controle mais adequada, de forma a manter a temperatura de trabalho e ainda otimizar o rendimento e qualidade do sinter produzido. Foram utilizados conhecimentos matemáticos, de automação, controle e combustão industrial, de forma a possibilitar atingir os resultados esperados.

**Palavras-chave:** Combustão de gás de coqueria (COG); Forno de ignição da sinterização; Rendimento de sinter; Temperatura de ignição; Controle de Limites Cruzados.

## DYNAMIC ESTEQUIOMETRIC CORRECTION AND COMBUSTION CONTROL IN SINTERING IGNITION HOOD OF ARCELORMITTAL TUBARÃO

### Abstract

The sintering process begins at the ignition stage of the surface layer of the mixture to be sintered. This ignition is performed through the heat supplied by a furnace, called "Ignition Furnace", and this burn must have sufficient heat potential to start the agglomeration process. As a result of the horizontal movement and the flow of air passing through the material, this surface firing front is transported until reaching the lower zones of the bed, thus producing the sinter. The higher the calorific value of the fuel used, the more efficient (lower fuel consumption and higher temperature) is the surface burning, thus raising the mechanical strength of the product during the process. Due to variations in fuel quality, keeping the ignition temperature controlled becomes a challenge, so, in this work, a study on the combustion of coke oven gas (COG) was carried out, evaluating not only its stoichiometric but also the most adequate control strategy, in order to maintain the working temperature and still optimize the yield and quality of the sinter produced. Mathematical knowledge, automation, control and industrial combustion were used in order to achieve the expected results.

**Keywords:** Combustion of coke oven gas (COG); Sintering ignition hood; Sinter yield; Ignition temperature; Crossed Limits Control.

<sup>1</sup> Engenharia Metalúrgica, Especialista de Sinterização, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Elétrica, Pós Graduação e Mestrado em Sistemas Inteligentes, Especialista em Projetos de Engenharia, Departamento de Engenharia, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.

<sup>3</sup> Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Especialista de Confiabilidade, Manutenção da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.

<sup>4</sup> Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Especialista de Sinterização, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.

<sup>5</sup> Eng. Metalúrgica, Gerente da Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil

<sup>6</sup> Eng. Metalúrgica, Gerente de Operação da Sinterização, ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de sinterização é um processo metalúrgico de aglomeração conhecido mundialmente, onde há transformação do “sinter feed” de granulometria entre 0,15 a 6,35 mm (inapropriada ao consumo direto nos altos-fornos) em um aglomerado resistente, auto fundente, poroso e de alta redutibilidade [2,6]. O processo se inicia na queima superficial da camada de mistura, processo chamado de ignição, provocado pela liberação de calor proveniente da queima de gás no interior do forno de ignição [1,4,5]. Alguns fornos operam com gás de coqueria ou gás natural, a depender do tipo de forno. O forno da Arcelormittal atualmente opera com 100% de gás proveniente da coqueria (Coke Oven Gas - COG).

A queima superficial se torna muito importante, pois sua eficiência contribui para menor geração de “soft sinter”, que é um material de qualidade inferior formado superficialmente no leito a sinterizar [1,2,3,4].

No decorrer dos anos, o gás de coqueria (COG) produzido na ArcelorMittal Tubarão vem apresentando uma redução significativa em seu PCI (poder calorífico inferior – Kcal/m<sup>3</sup>) e com isso ocasionando deficiência na ignição do forno da sinterização.

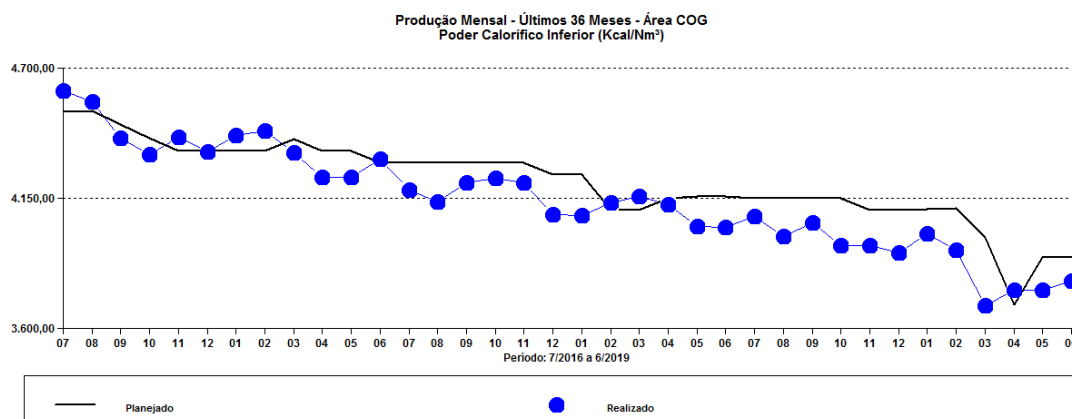


Figura 1. PCI do gás de coqueria (COG) ao longo dos anos

Com o empobrecimento da queima, houve uma queda na temperatura de trabalho do forno de ignição chegando a uma temperatura média de 1085°C, bem abaixo de sua temperatura de projeto (1200 °C).

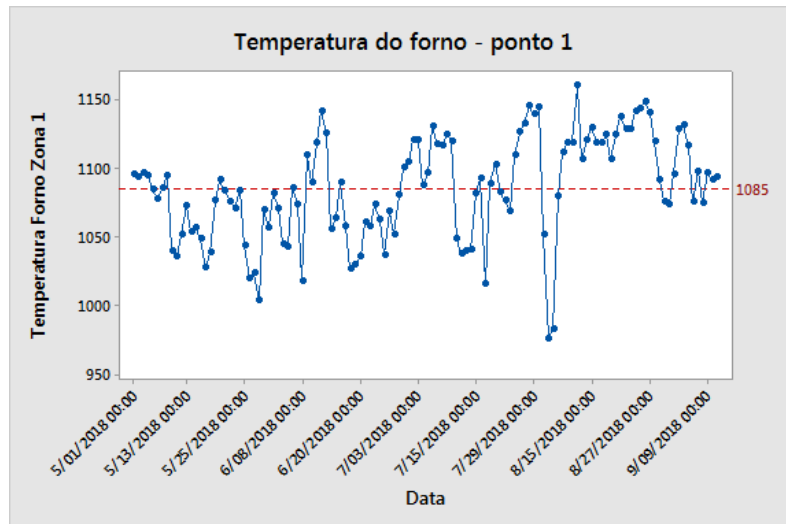


Figura 2. Temperatura de trabalho do forno de ignição

Além da condição do gás mencionada anteriormente, o controle de combustão era realizado de forma manual através da ação direta dos operadores na regulagem da vazão de ar. Uma vez que a relação estequiométrica (Ar/Gás) era mantida sempre a mesma, as ações operacionais tornavam-se excessivas devido à constante variação da qualidade do gás, provocando perturbações no processo e consequentemente efeitos colaterais negativos na qualidade do sinter e produtividade final da planta.

O objetivo principal desse trabalho foi remodelar a filosofia de operação do forno ignição, implementando cálculos de correção do fator estequiométrico diretamente no sistema de controle, bem como a reestruturação das malhas de controle existentes e a implementação da metodologia de controle com limites cruzados, de forma a conseguir aperfeiçoar a queima através de ganho de poder calorífico mesmo com a condição de PCI reduzido do gás de coqueria.

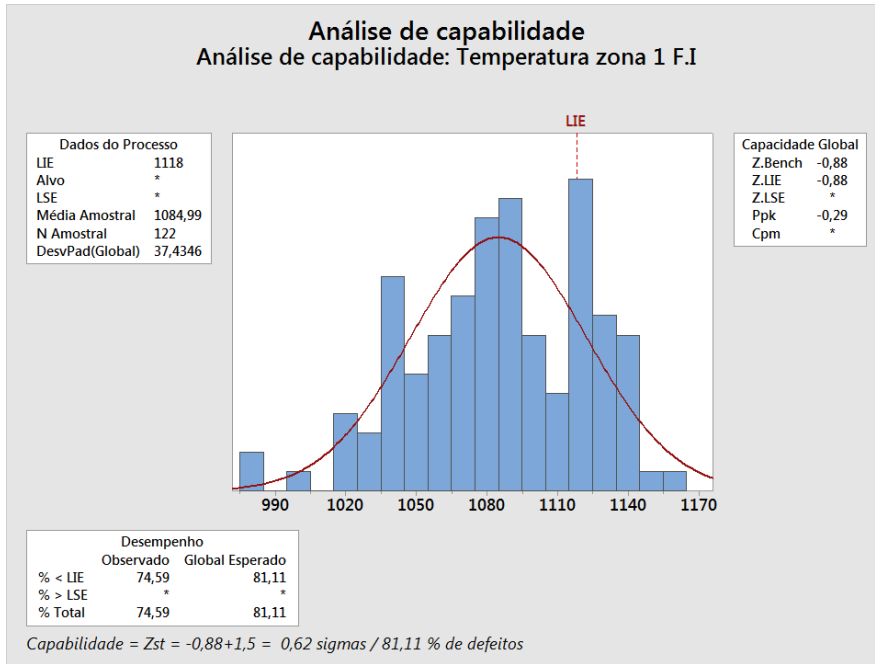
## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Caracterização do Problema

O projeto consistiu em estudar o comportamento da queima do gás de coqueria no forno de ignição da sinterização, buscando a possibilidade de aumentar a quantidade de calor liberada no processo de combustão. Foram realizadas diversas medições no interior do forno, para avaliar a qualidade do gás de exaustão e utilizados fundamentos de estequiometria de combustão industrial, incluindo uso do software “Acomb” do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológico), para simular o comportamento da queima do gás [8].

Além disso, foram empregados conhecimentos de automação e controle de processos para estudo e elaboração da nova estratégia de controle, bem como a implementação das novas rotinas no sistema de controle existente.

Foi realizada a medição da capacidade do processo de combustão, com base em um valor LIE (limite inferior) de temperatura de 1118°C. Essa temperatura foi tomada com base no 3º quartil da distribuição normal da temperatura do forno, portanto a nova meta a ser atingida.

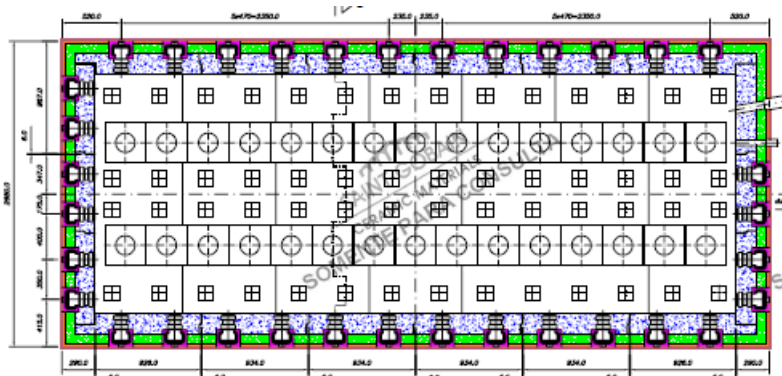


**Figura 3.** Medição de capacidade - temperatura do forno de ignição

O processo foi medido como um sigma de **0,62**, possuindo então **81,11%** de defeitos (resultados abaixo de 1118°C de temperatura).

O forno de ignição e a máquina de sinter da sinterização da ArcelorMittal Tubarão possuem as seguintes especificações:

IGNITION HOOD
<b>Burners:</b> 15 x 2 linhas = 30
<b>Maximum temperature:</b> 1150 ~ 1250 °C
<b>Fuel :</b> COG ( coke oven gas)



**Figura 4.** Dados técnicos de projeto do Forno de Ignição

SINTER MACHINE
<b>Type:</b> DWIGHT-LLOYD (LURGI)
<b>Manufacturer:</b> HITACHI-ZOSEN CO. (JAPÃO)
<b>Start up:</b> 12 september, 1983
<b>Revamp:</b> 1997 (ISF and machine's widening)
<b>Capacity:</b> 20.300t/d (limited by 38t/d/m <sup>2</sup> by coller)
<b>Suction area:</b> 484 m <sup>2</sup>
<b>Dimension:</b>
<b>Width:</b> 5,5 m
<b>Length:</b> 88 m
<b>Number of windboxes:</b> 23

Figura 5. Dados técnicos de projeto da Máquina de sinter

O forno opera exclusivamente com gás de coqueria (COG). Algumas informações a respeito das diferenças dos gases utilizados para combustão podem ser observadas na tabela abaixo:

Tabela 1. Dados de combustão de diferentes gases do Forno de Ignição

Itens	Gás de Coqueria - COG	Gas Natural - GN
Principais componentes	Hidrogênio ( H <sub>2</sub> ) : ~ 60,00%	Metano ( CH <sub>4</sub> ) : ~ 90,00%
Poder Calorífico : PCI	4700 kcal/Nm <sup>3</sup>	8790 kcal/Nm <sup>3</sup>
Relação Ar/Gás teórica	4,8 Ar x 1,0 Gás	9,7 Ar x 1,0 Gás
Consumo Aproximado	1320 Nm <sup>3</sup> /h	700 Nm <sup>3</sup> /h

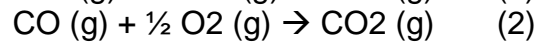
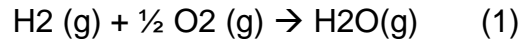
Após análise das causas básicas para a queda de temperatura, um dos principais fatores identificados foi a quantidade de excesso de ar presente na câmara de combustão. O forno está configurado para operar com 50% de excesso de ar (fator de segurança), dado como  $\lambda$  ( $\lambda = 1,5$ ). Após medição e análise do gás de exaustão, foi possível visualizar que havia excesso de O<sub>2</sub> na saída, havendo então oportunidade de ajuste para ganho de poder calorífico. A tabela abaixo mostra o valor médio das medições realizadas no interior do Forno de ignição:

Tabela 2. Composição do gás COG medido

Material	CO%	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> %	N <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> %
Gás do forno de ignição	0,03%	6,50%	0	82,30%	12%

A primeira ação foi refazer o cálculo estequiométrico do forno de ignição [8], com base nas reações de combustão do gás de coqueria conforme abaixo:

**Reações de queima:**



O gás de coqueria possui mais de 10 elementos, portanto tornou-se necessário realizar cada reação em separado. Assim, sendo “X” a quantidade de ar estequiométrico da combustão e “n” os elementos de combustão, temos que:

$$\sum_{X=1}^n Xn = X1 + X2 \dots$$

A quantidade de ar necessária será a soma da quantidade de ar estequiométrico necessário para cada elemento. Utilizando o software “Acomb” para simular o processo de combustão e a composição do gás de saída, foram obtidos os valores mostrados nas Figuras 6 e 7, indicando um valor de O<sub>2</sub> abaixo dos valores medidos.

Fórmula	Nome	% Molar bu
H2	Hidrogênio	51,11
CO2	Gás Carbônico	2,74
C2H4	Eteno (Etileno)	1,6
C2H6	Etano	0,26
C2H2	Etino (Acetileno)	0,14
C3H8	Propano	0,18
C4H10	2-Metilpropano (Isobutar)	0,04
C5H12	2-Metilbutano (Isopentar)	0,01
C6H6	Benzeno	0,01
C7H8	tilbenzeno (Tolueno) ...	0,87
O2	Oxigênio	0,42
N2	Nitrogênio	11,34
CH4	Metano	23,41
CO	Monóxido de Carbono	7,87

Figura 6. Acomb – gás de coqueria (COG)

Mistura Combustíveis	Gases Combustão	
H2O	10,574	%
O2	8,0292	%
N2	81,08	%
CO2	10,891	%
SO2	0	%
Mol	29,475	
Vazão	13355	kg/h
Cp	1,3654	kJ/kgK
Densidade	0,20787	kg/m3

Figura 7. Acomb - Simulação gás de saída

**2.2 Ajuste dinâmico do fator Estequiométrico**

O ajuste estequiométrico foi colocado diretamente no sistema de controle, onde o operador atualiza a composição do gás e o sistema calcula a quantidade de ar ideal para manter a queima. Assim, o fator estequiométrico passa a ser calculado diariamente, minimizando as variações de qualidade do COG.

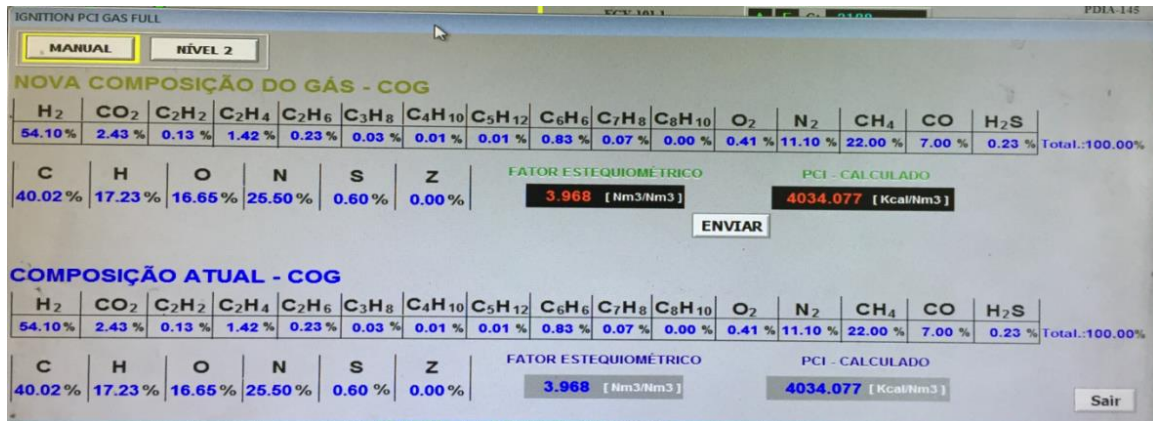


Figura 8. Dados da composição do gás e calculo do fator estequiométrico no PLC

### 2.3 Controle de Limites Cruzados

Essa filosofia de controle permite um aumento da estabilidade operacional do forno, buscando corrigir a temperatura em função de variações de processo, mantendo preservadas as relações estequiométricas e o excesso de ar previamente calculado e definido.

Sempre que for necessária uma alteração na vazão de ar ou gás, o controle mantém a relação estequiométrica constante, minimizando variações na qualidade da queima e consequentemente na qualidade do produto final.

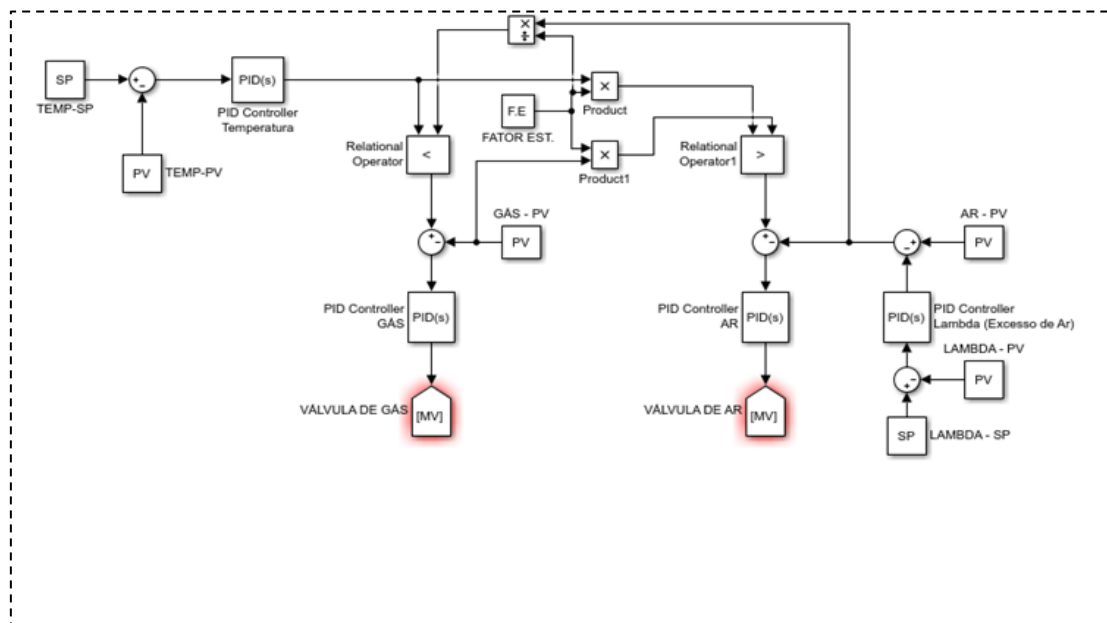


Figura 9. Controle de Limites Cruzados

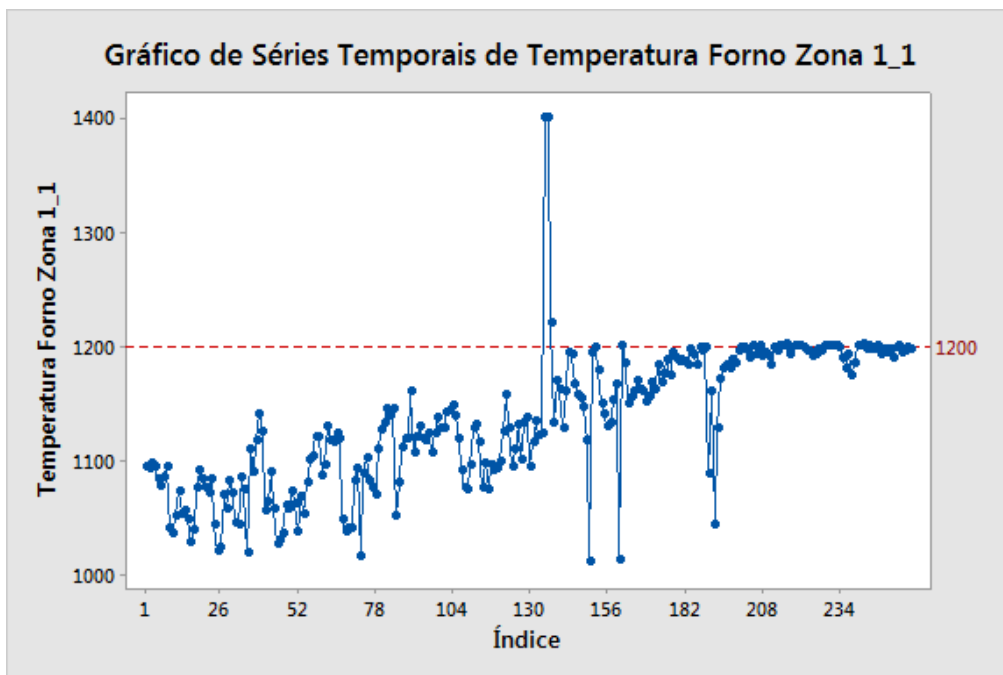
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após as ações, os resultados obtidos são resumidos na tabela abaixo:

**Tabela 3.** Principais resultados após otimização do forno de ignição

Lambda = (Vazao de ar / vazao de gás) x 4,4			
ITENS	ANTES	ATUAL	Delta (Δ)
Fator estequiométrico	4,4	~ 3,93 (ajustado diariamente)	-0,47
Lambda (fator de segurança)	1,50	1,50	
PCI do COG (Kcal / Nm3)	~ 3900	~3900	
Temperatura F.I (°C)	~1080°C	>1200°C	120,00°C

Houve um aumento gradativo na temperatura do forno de ignição e melhora significativa da média e do desvio padrão da temperatura. A evolução do aumento de temperatura pode ser observada na Figura 10.



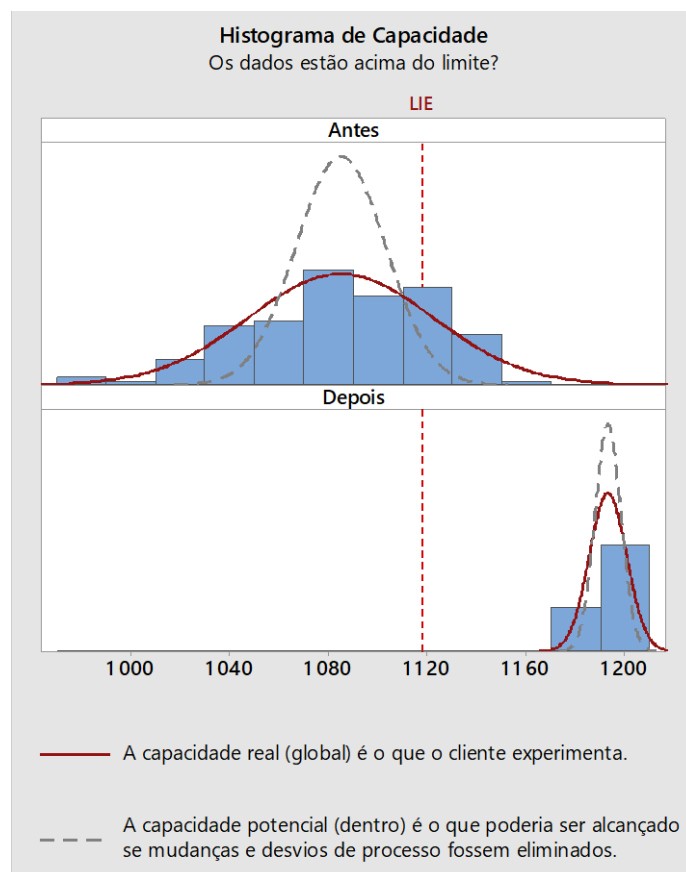
**Figura 10.** Evolução da temperatura após ajuste na combustão do forno de ignição

Fazendo a medição de capacidade após as modificações, a porcentagem (%) de resultados fora de especificação (<1118°C) foi significativamente reduzida, passando de 81,11% para 0%, indicando assim **um novo patamar de processo**.



**Tabela 4.** Dados de capacidade após ajuste na combustão do Forno de Ignição

Requisitos do Cliente			
Espec Inferior	Alvo	Espec Superior	
1118	*	*	
Filtragem do Processo			
Estatísticas	Antes	Depois	Modificação
Média	1085,0	1193,1	108,09
DesvPad (global)	37,435	7,5364	-29,898
Capacidade real (global)			
Pp	*	*	*
Ppk	-0,29	3,32	3,61
Z.Bench	-0,88	9,96	10,84
% fora de especificação	81,11	0,00	-81,11
PPM (DPMO)	811058	0	-811058



**Figura 11.** Medição de capacidade após modificações e ajustes de combustão

O forno de ignição passou a operar com maior estabilidade e com menor desvio padrão de temperatura, mesmo com variações no poder calorífico do gás de coqueria, como mostra a carta de controle abaixo:

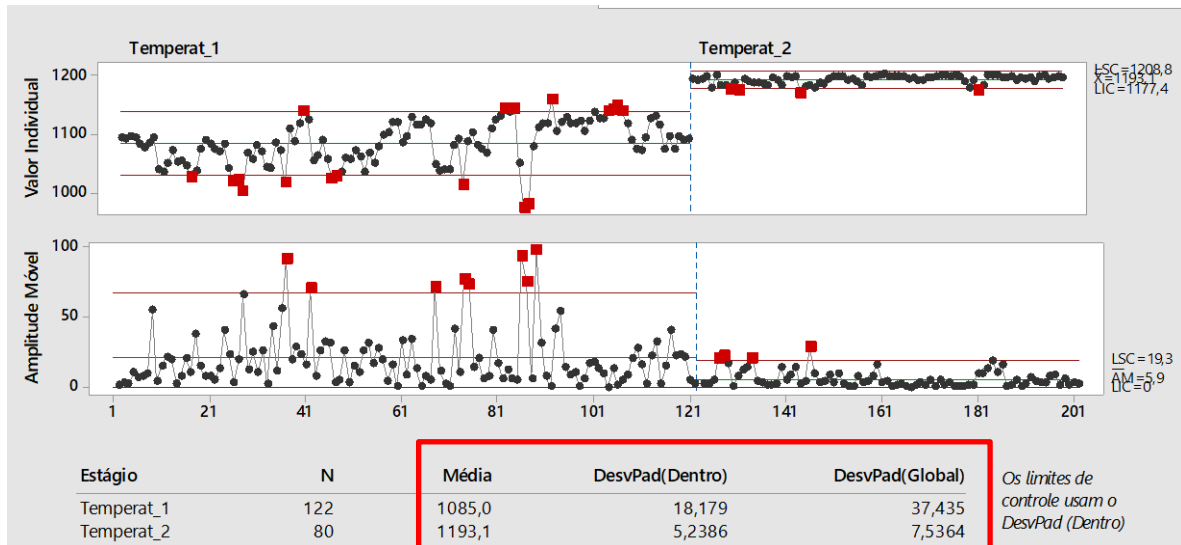


Figura 12. Cartas de controle de temperatura após modificações e ajustes de combustão

## 4 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi realizada uma análise das variações de qualidade do gás de Coqueria e suas consequências no controle de temperatura no forno de ignição da máquina de sinter da planta de Sinterização da ArcelorMittal Tubarão.

Como medidas para mitigar essa situação foram desenvolvidos uma interface operacional para inclusão da composição do gás, cálculos estequiométricos e uma nova estratégia de controle automático.

Mediante a execução das ações mencionadas, os resultados obtidos refletiram em maior estabilidade operacional, redução de variabilidade e elevação da temperatura de ignição e melhora da qualidade física (redução de “soft sinter”), proporcionando ainda significativa melhora na queima e redução de custos operacionais através da elevação de rendimento e redução do consumo de gás, assegurando sustentabilidade e competitividade no mercado siderúrgico.

Como trabalho futuro, através de uma interligação via rede de comunicação de dados com o sistema corporativo, pretende-se atualizar a composição do gás de forma automática. Dessa forma, o fator estequiométrico será corrigido para todas as composições e análises emitidas pelo laboratório, sem necessitar de ações do operador tornando o sistema ainda mais robusto e atualizado quanto à qualidade atual do gás de combustão.

## Agradecimentos

Agradecimento a Deus, Equipe ArcelorMittal Tubarão, familiares e amigos.

## REFERÊNCIAS

- 1 J.F. DOUCE, J. GALLET, F. BRUCKERT, C. PLUN. Applied method to determine thermo-economical optimum of heat consumption at sinter plant. ArcelorMittal R&D Maizières Process. 2011; 1(1): 1-7.
- 2 D. Fernández-González, I. Ruiz-Bustanza, J. Mochón, C. González-Gasca & L. F.Verdeja. Iron Ore Sintering: Process. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2017; 38 (4): 215-227.
- 3 Dulcy, C.; L'allumage à l'agglomération sur grille; ArcelorMittal Internal Report, 1985.
- 4 Košťál I., Dorák J., Terpák J. OPTIMAL CONTROL OF THE SINTERING PROCESS. IFAC Proceedings Volumes. 2005; 38(1): 280-285.
- 5 Cores, A., Mochón, J., Ruiz-Bustanza, I., and Parra. "Control of the flame front advance in a sintering bed of iron ores." Revista de Metalurgia de Madrid. 2010; 46: 249–259.
- 6 Loo, C. E., Tame, N., and Penny, G. C. "Effect of iron ores and sintering conditions on flame front properties." ISIJ International. 2012;52: 967–976.
- 7 Košťál, I. and ————. Dorák. Application of New Radiative Heat Transfer Models for Simulation and Control of Heat Devices. Proceedings of 12th IMACS World Congress.1998; 2: 367-369.
- 8 Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT. Estequiometria das relações de combustão. Curso de Combustão Industrial. São Paulo: 2018.
- 9 Mário César M. Massa de CAMPOS, Herbert Campos Gonçalves TEIXEIRA. Controles Típicos de Equipamentos Industriais, 2ª edição, 2010.
- 10 Estratégias de Controle V2. UTFPR, [http://paginapessoal.utfpr.edu.br/camaral/instrumentacao-industrial/15%20-%20Estrategias%20de%20Controle%20AUTOMAT.pdf/at\\_download/file](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/camaral/instrumentacao-industrial/15%20-%20Estrategias%20de%20Controle%20AUTOMAT.pdf/at_download/file) , acessado em 10/06/19.