

ANÁLISE TÉRMICA DOS REGENERADORES DOS ALTOS-FORNOS*

Leonardo Camilo dos Reis¹
Beatriz Fausta Gandra²
Lucas Gonçalves Generoso³

Resumo

Em função da necessidade de obter o máximo rendimento da queima de combustível nos regeneradores e também a máxima temperatura permitida no aquecimento do ar a ser soprado no interior do alto-forno, é importante conhecer as variáveis envolvidas no processo e os fatores que podem afetar, de forma direta ou indireta, o rendimento térmico do regenerador. Para auxiliar neste conhecimento, foi desenvolvido o presente trabalho que busca avaliar, por meio da simulação computacional, os fatores que podem afetar o aquecimento do ar soprado no alto-forno e o rendimento da queima de combustível. A metodologia consiste em realizar simulação computacional do aquecimento da colmeia (ciclo de combustão) e o aquecimento do ar ao passar pelo interior do regenerador para ser injetado no alto-forno (ciclo de ventilação). O modelo inicial foi validado com os valores de temperatura do ar de entrada, do topo e da fumaça que sai na chaminé, considerando o sistema de controle do Regenerador 7 do Alto-Forno 3 da Usiminas, atingido um erro máximo de 13%. A obtenção deste modelo permite avaliar diferentes cenários de operação dos regeneradores e, com isto, definir o mais eficiente termicamente, com menor custo operacional.

Palavras-chave: Regenerador; Checkers; Simulação computacional; Escoamento.

THERMAL ANALYSIS OF BLAST FURNACE'S HOT STOVE

Abstract

Aiming the Hot Stove's maximum fuel efficiency and the maximum temperature of the air to be blown inside the blast furnace, it is important to know the variables involved in the process and the factors that affect, directly or indirectly, the Hot Stove's thermal efficiency. To support this knowledge, the present paper was developed to evaluate, through computational simulation, the factors that can affect the heating of the air blown in the blast furnace and the fuel burn efficiency. The methodology consists in performing computational simulation of the hive heating (combustion cycle) and also the heating of the air as it passes through the interior of the regenerator to be injected into the blast furnace (ventilation cycle). The initial model was validated with the values of the temperature of the incoming air, top and the smoke that exits the chimney, considering the control system of Regenerator 7 of Usiminas's Blast Furnace#3, reaching a maximum error of 13%. This model allows to evaluate different scenarios of regenerators operation and to define the most efficient thermally, with lower operational cost.

Keywords: Hot Stove, Checkers, Computer simulation, Flow.

¹ Engenheiro Mecânico, M.Sc., Pesquisador Especialista, Centro de Pesquisa, Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheira Metalurgista, M.Sc., Pesquisadora Especialista, Centro de Pesquisa, Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Engenheiro de Produção Pleno, Gerência Geral Redução, Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O alto-forno é um reator metalúrgico que tem a função de transformar as matérias-primas (sinter, minérios, pelotas, fundentes e coque) em gusa líquido, para posterior fabricação de aço. Uma das fontes de aquecimento desse processo é o calor sensível vindo do ar pré-aquecido em regeneradores (*Hot Stove* - HS). A finalidade dos regeneradores é aquecer o ar soprado no alto-forno e, com isto, suprir parte da sua demanda térmica, reduzindo os custos de produção do gusa, uma vez que, aproximadamente, 20% da energia consumida no processo é fornecida pelo ar aquecido pelos regeneradores.

O regenerador é um tipo de trocador de calor que armazena energia e realiza a troca térmica através de um elemento usualmente chamado de matriz. Existem três tipos de regeneradores:

- **Regenerador rotativo:** a matriz deve mover continuamente para ter operação contínua, movendo ciclicamente as correntes de gases, recebendo e cedendo calor de forma periódica. Em um regenerador rotativo, a matriz de forma cilíndrica gira continuamente com uma fração constante de corrente quente no núcleo e o volume anular restante contém a corrente de fluido frio. A temperatura de saída do fluido varia de acordo a área de escoamento e é independente do tempo. As correntes geralmente escoam em sentidos opostos e são separadas por selos na matriz.
- **Regenerador de matriz fixa:** a variação da direção das correntes deve ser feita com o auxílio de válvulas. Em regeneradores de matriz fixa, as correntes são canalizadas com o uso de válvulas para diferentes matrizes de regeneradores e que possuem, no mínimo, duas matrizes operando continuamente em períodos de aquecimento e resfriamento alternados. Desse modo, a temperatura do fluido de saída varia com o tempo. Aqui, novamente, dois fluidos escoam alternadamente em direções opostas na matriz.
- **Regenerador com matriz na forma de disco:** os gases são canalizados através de exaustores rotativos para a matriz. Este tipo de regenerador é utilizado para pré-aquecimento de ar em plantas de geração de energia. A teoria básica utilizada para o projeto destes tipos de trocadores de calor é a mesma dos demais.

Os regeneradores da Usiminas são do tipo matriz fixa, construídos de estruturas de aço cilíndricas, revestidas de refratários e, internamente, são divididos em uma câmara de combustão, uma de regeneração e um domo (Figura 1).

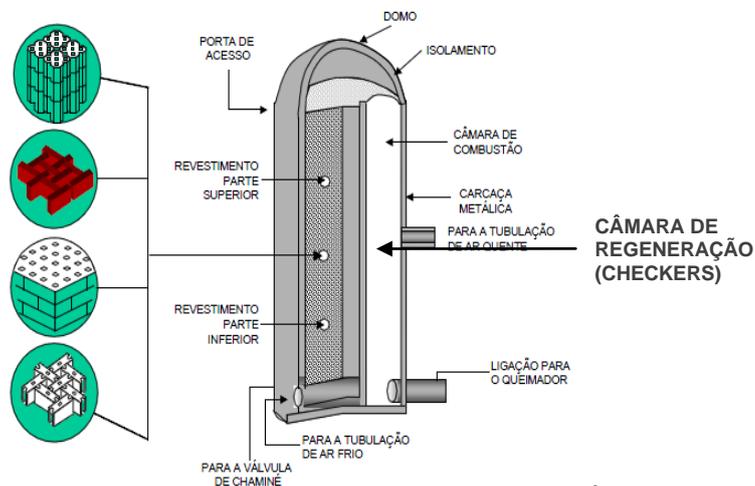


Figura 1. Croqui de um regenerador do tipo matriz fixa.

Na câmara de combustão são queimados os gases combustíveis BFG (*BlastFurnanceGas*- gás de alto-forno) e COG (*CokeOvenGas* - gás de coqueria) que pode ou não estar enriquecido com oxigênio. Os gases resultantes da combustão sobem até o domo e passam para a câmara de regeneração, que é composta por tijolos refratários empilhados, formando dutos por onde estes gases passam. Neste trajeto, os gases que saem da câmara de combustão, à temperatura de chama, trocam calor com os refratários da parede, domo e empilhamento e saem para a chaminé, onde a temperatura final não deve exceder 350°C.

Nos regeneradores aplica-se o princípio da corrente inversa, isto é, o ar frio, proveniente do soprador, percorre o caminho inverso do descrito para os gases queimados. O ar entra do lado mais frio e sai na parte mais quente do circuito, absorvendo o calor do refratário e aquecendo a temperaturas superiores a 1.100°C. Concluído esse processo ele é injetado no alto-forno.

Em resumo, são dois ciclos principais na operação dos regeneradores: ventilação, no qual o ar soprado é aquecido à temperatura de sopro; e combustão, quando os refratários dos regeneradores são aquecidos para possibilitar o ciclo de ventilação.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para avaliar a eficiência térmica de dois modelos de tijolo refratário que compõem o conjunto refratário dos *checkers* de regeneradores de altos-fornos.

2METODOLOGIA

Foi elaborada uma metodologia por meio da simulação computacional capaz de avaliar a eficiência térmica dos regeneradores em função da queima de combustível e também do processo de ventilação, no qual o ar é aquecido à temperatura desejada. Neste estudo foi desenvolvida uma análise computacional fluidodinâmica e de combustão com utilização do *software* de simulação ANSYS/CFX⁽¹⁾⁽²⁾.

A metodologia foi dividida nas seguintes etapas:

- Modelagem tridimensional;
- Levantamento das propriedades dos gases de combustão;
- Simulação computacional;
- Validação do modelo.

Foram realizadas algumas simplificações na simulação computacional para o desenvolvimento do modelo de combustão e escoamento do ar pelo regenerador, a saber.

- Utilização de domínio poroso para simular a região do *checker*, pois as elevadas diferenças de dimensões presentes nesta região tornam necessária a utilização de domínio do tipo poroso, formado por vários furos com diâmetro de 43 mm e altura total de, aproximadamente, 35.000 mm. Sem a utilização deste tipo de domínio não seria possível simular os ciclos de combustão e ventilação do regenerador. Para tanto alguns parâmetros foram determinados a fim de definir as propriedades geométricas e térmicas do modelo;
- As propriedades térmicas dos materiais refratários foram consideradas constantes, porém para obter um resultado mais preciso durante o ciclo de combustão e ventilação os valores da difusibilidade térmica foram aumentados em 70% através do aumento do calor específico dos tijolos refratários;
- A perda de calor por convecção natural na carcaça do regenerador foi considerada constante nas paredes verticais e no domo do regenerador, sendo o valor adotado no modelo igual a 800 W/m² e que corresponde a uma perda total de, aproximadamente, 12% do calor fornecido ao regenerador.

As simulações computacionais, usando o método dos volumes finitos, foram realizadas em um *cluster* fornecido pela HP constituído por 192 núcleos de processamento paralelo com processadores *HexaCores* Intel Xeon X5650 (2.66GHz) e 16 TB de capacidade de memória, mais 20 TB de *storage* e uma rede de comunicação de alta velocidade entre o Centro de Pesquisa e o *cluster*.

2.1 Modelagem Tridimensional

O modelo tridimensional do regenerador foi construído com o software *Designer Modeler* e para simular a análise fluidodinâmica foi necessário modelar a região por onde o fluido passa no interior do regenerador, isto é, a fumaça devido à combustão e o ar quente que é soprado para o interior do Alto-Forno 3 (AF3) (Figura 2).

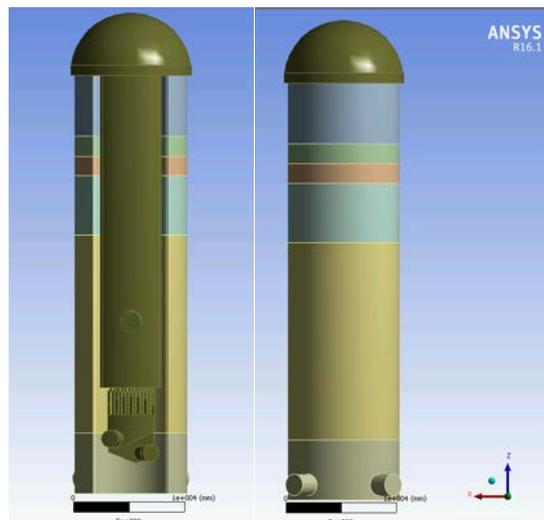


Figura 2 - Modelo tridimensional do regenerador do Alto-Forno 3 da Usina de Ipatinga.

2.2 Simulação Computacional

2.2.1 Modelo de turbulência e de combustão

Nas simulações computacionais foi utilizado inicialmente o modelo de turbulência $k-\epsilon$, porém a convergência foi melhorada com utilização do modelo SST.

O *software* apresenta alguns modelos de combustão, no entanto neste estudo foi utilizado o modelo EDM (*EddyDissipationModel*) que é empregado para reações químicas rápidas em escoamento turbulento sem pré-mistura dos gases. O modelo EDM assume três hipóteses:

- A taxa de reação é infinitamente rápida;
- A taxa de consumo de combustível em chamas de difusão turbulenta é determinada unicamente pela taxa de mistura turbulenta do combustível e do oxidante;
- A taxa de consumo de combustível é inversamente proporcional à escala de tempo turbulenta (energia cinética turbulenta dividida por taxa de dissipação turbulenta).

De acordo com essa hipótese, MagnussemandHjerager⁽³⁾⁽⁴⁾ fornecem a seguinte expressão de taxa de reação do combustível, (Equações 1 e 2):

$$f + S_o = (1 + S)p \quad (1)$$

$$R = \rho \frac{\varepsilon}{k} A \min \left[Y_f, \frac{Y_o}{S}, B \frac{Y_p}{(1+S)} \right] \quad (2)$$

Em que “f” é o combustível; “o” é o oxidante; “p” é o produto; “S” é a proporção em massa estequiométrica do oxidante para o combustível; “ρ” é densidade; “ε” é a taxa de dissipação turbulenta; “k” é a energia cinética turbulenta; “Y” a fração mássica; “A” e “B” constantes da equação. Somente a constante “A” é necessária na simulação de chamas de difusão e a constante “B” é utilizada para a simulação de chamas pré-misturadas. Os valores adotados destas constantes na simulação foram de: A=0,4 e B=1,2.

2.2.2 Condição inicial dos modelos

As simulações numéricas do regenerador foram transientes, isto é, as condições alteram com o tempo. A análise inicial adotada foi retirada de acordo com as condições operacionais do regenerador: vazão de ar, razão de mistura de BFG/COG, enriquecimento com oxigênio e temperaturas do domo e da chaminé. Para simular o ciclo de combustão as temperaturas internas do regenerador foram impostas de acordo com os valores extraídos do sistema de monitoramento dos regeneradores do Alto-Forno 3. Neste caso foram consideradas as temperaturas da câmara de combustão e da chaminé. O valor da temperatura inicial da câmara de combustão adotado corresponde à temperatura final do ar quente do ciclo de ventilação anterior ao ciclo de combustão. Os valores das temperaturas nos tijolos refratários do *checker* foram considerados variando de forma linear, em que o valor mínimo corresponde a temperatura da chaminé, e o valor máximo à temperatura do domo ao final do ciclo de ventilação, anterior ao ciclo de combustão, a ser simulado. Os valores típicos desta temperatura são apresentados na Tabela 1, porém os utilizados foram extraídos do banco de dados da área operacional.

Tabela 1 - Condições iniciais típicas adotadas no modelo do regenerador.

Localização	Temperatura
Domo	1.190°C
Chaminé	190°C
Ar soprado para o interior do regenerador	190°C

A temperatura linear inicial nos tijolos do *checker* em função de sua posição no regenerador (Equação 3)

$$T_{CHECKER} = 0,0282 \left(\frac{^{\circ}C}{mm} \right) h + 45,327 \text{ } ^{\circ}C \quad (3)$$

Onde h (mm) é a altura do tijolo refratário do *checker* em relação ao piso do regenerador.

2.2.3 Modelo com domínio poroso

Para simular o *checker* foi utilizado domínio poroso que é um recurso disponível no software CFX para simular geometrias porosas e/ou no formato de colmeia. Para sua configuração, alguns parâmetros foram determinados em função da geometria e do processo, conforme indicados a seguir:

- Porosidade do volume: é a razão do volume de fluido para o volume físico total;
- Perda direcional: especifica-se a direção do fluxo através de componentes cartesianos ou cilíndricos. Através desta perda pode-se direcionar o fluxo em um dos eixos do sistema de coordenada adotado;
- Densidade de área molhada: é a área de contato do fluido com o sólido dividido pelo volume total do sólido;
- Transferência de calor entre o sólido e o fluido: é o coeficiente global de transferência de calor entre o fluido e o sólido, coeficiente convectivo.

Os valores da porosidade e a densidade da área molhada são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições iniciais típicas adotadas no modelo do regenerador.

Propriedades dimensionais para definição do meio poroso	
Porosidade	40,94 %
Densidade da área molhada	38,086 m ⁻¹

2.3 Propriedades dos Gases e do Material Refratário

Quanto ao aquecimento por combustão as propriedades da razão de mistura de BFG/COG foram calculadas a partir de sua composição química. As propriedades dos gases do produto da reação para o cálculo do coeficiente convectivo utilizado no domínio poroso foram extraídas do próprio *software* utilizado, determinada internamente em função da fração mássica dos produtos da reação. Nas Tabelas 3 e 4 são fornecidos os valores das propriedades da fumaça nas temperaturas médias para as quatro regiões do *checker* que são diferenciadas em função do material utilizado nos tijolos, destacadas na Figura 3.

Tabela 3 – Propriedades térmicas da fumaça na temperatura média indicada.

Região do <i>Checker</i>	Temperatura (°C)			Peso Específico (kg/m ³)	Viscosidade Dinâmica (Pa.s)	Viscosidade Cinemática (m ² /s)
	Máxima	Mínima	Média			
H23	1350,0	1100,0	1225,0	0,2760	1,62E-05	5,85E-05
H24 e H26	1100,0	975,0	1037,5	0,3114	1,62E-05	5,19E-05
N41	975,0	800,0	887,5	0,3498	1,62E-05	4,62E-05
N43	800,0	200,0	500,0	0,5301	1,61E-05	3,05E-05

Tabela 4 – Propriedades térmicas da fumaça nas temperaturas médias indicadas (continuação).

Região do <i>Checker</i>	Temperatura (°C)			Calor Específico (J/kg.K)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Prandtl	Difusividade e (m ² /s)
	Máxima	Mínima	Média				
H23	1350,0	1100,0	1225,0	1361,0	0,02134	3,734	1,57E-05
H24 e H26	1100,0	975,0	1037,5	1333,0	0,02132	3,243	1,60E-05
N41	975,0	800,0	887,5	1304,0	0,02130	2,827	1,63E-05
N43	800,0	200,0	500,0	1202,0	0,02130	1,719	1,77E-05

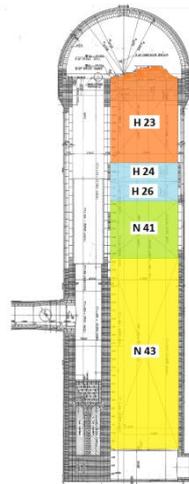


Figura 3 - Regenerador – Detalhe das diferentes regiões de materiais utilizados nos *checkers*.

As propriedades do ar a ser aquecido à pressão absoluta de 4,4 atm foram extraídas do banco de dados localizado no site IRC ([Industrial Refrigeration Consortium](#))⁽⁵⁾. Os cálculos das propriedades do ar são realizados em função da temperatura e pressão absoluta, conforme apresentado nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Propriedades térmicas do ar na temperatura média e pressão absoluta 4,4 atm.

Região do Checker	Temperatura (°C)			Peso Específico (kg/m³)	Viscosidade Dinâmica (Pa.s)	Viscosidade Cinemática (m²/s)
	Máxima	Mínima	Média			
H23	1350,0	1100,0	1225,0	1,0300	5,65E-05	5,49E-05
H24 e H26	1100,0	975,0	1037,5	1,1000	5,43E-05	4,94E-05
N41	975,0	800,0	887,5	1,1900	5,15E-05	4,33E-05
N43	800,0	200,0	500,0	1,7200	4,05E-05	2,35E-05

Tabela 6 – Propriedades térmicas do ar na temperatura média e pressão absoluta 4,4 atm.

Região do Checker	Temperatura (°C)			Calor Específico (J/kg.K)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Difusividade (m²/s)	Prandtl
	Máxima	Mínima	Média				
H23	1350,0	1100,0	1225,0	1210,0	0,09360	7,7E-05	0,730
H24 e H26	1100,0	975,0	1037,5	1200,0	0,08950	7,5E-05	0,729
N41	975,0	800,0	887,5	1190,0	0,08420	7,1E-05	0,727
N43	800,0	200,0	500,0	1120,0	0,06300	5,6E-05	0,721

Para calcular o coeficiente convectivo é necessário determinar os números adimensionais de Reynolds e Nusselt, porém estes números dependem da velocidade do escoamento do fluido no interior do *checker*. Os valores das velocidades máximas e mínimas em cada região do *checker* foram extraídas da simulação computacional. Os valores das velocidades médias da fumaça e do ar são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Velocidade média da fumaça e do ar no interior do duto dos *checkers*.

Região do Checker	Velocidade média (m/s)		Diâmetro do duto (m)
	Fumaça	Ar	
H23	8,01	14,80	0,043
H24 e H26	7,45	12,70	0,043
N41	6,89	11,00	0,043
N43	4,70	7,24	0,043

A partir das velocidades e propriedades térmicas dos fluidos foram determinados os números adimensionais e o coeficiente convectivo médio para cada região do *checker*, conforme indicado na Tabela 8.

Tabela 8 – Coeficiente convectivo médio adotado no modelo com domínio poroso.

Região do <i>Checker</i>	Fumaça			Ar		
	Número de Reynolds	Número de Nusselt	h médio (W/m ² .K)	Número de Reynolds	Número de Nusselt	h médio (W/m ² .K)
H23	5.879	35,4	17,6	11.602	36,20	78,8
H24 e H26	6.177	35,3	17,5	11.063	34,83	72,5
N41	6.417	34,9	17,3	10.930	34,45	67,5
N43	6.635	30,9	15,3	13.221	39,99	58,6

As propriedades térmicas dos materiais refratários são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades dos materiais utilizados no empilhamento refratário.

Região do <i>Checker</i>	Massa Específica (kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/m°C)	Calor Específico (J/kg°C)
H23	2550	2,789	1064
H24	2450	2,673	1064
H26			
N41	2350	1,976	1064
N42	2150	1,860	1064
N43	2150	1,860	1064

No modelo foram consideradas as propriedades dos materiais variando em função da temperatura, porém para alguns materiais as propriedades foram consideradas constantes.

2.4 Validação da Simulação Computacional

A validação do modelo foi realizada com valores de temperatura de domo e chaminé extraídos do banco de dados do processo que é arquivado pela automação da Usiminas. Os valores ficam registrados e podem ser visualizados com utilização do *software*PIMs (PI ProcessBook 2012 SP1).

Para validação foram utilizados dois ciclos completos de combustão e ventilação com diferentes condições operacionais. Na primeira análise, chamada de Validação I, foi simulada a condição de operação com enriquecimento do ar de combustão com 6% oxigênio, sendo estes resultados registrados no dia 12/09/2016 no horário de 07:00 às 10:00. Na Validação II, foi simulada a condição sem o enriquecimento do ar de combustão com oxigênio, sendo que os dados da Validação II foram extraídos no período de 09:40 às 12:30 do dia 02/10/2016. A razão de mistura dos gases BFG e COG foi de 28 e 10 para as Validações I e II, respectivamente.

As condições de contorno utilizadas nos modelos foram ajustadas de acordo com os parâmetros operacionais para uma mesma base de combustão, tais como: vazões dos gases combustíveis, vazão do ar de combustão, relação de ar e gás e taxa de enriquecimento do ar atmosférico com oxigênio e composição química dos gases BFG e COG. Os valores das condições de contorno utilizadas nas simulações para a Validação I e II são apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Condições de contorno para os modelos de Validação I e II.

SIMULAÇÃO DO REGENERADOR		
Variáveis de entrada	VALIDAÇÃO I	VALIDAÇÃO II
Vazão de gás misto	78.264,0 Nm ³ /h	73.740,0 Nm ³ /h
Vazão de COG	2.799,0 Nm ³ /h	6.916,0 Nm ³ /h
Relação BFG/COG	27,0	9,7
Vazão do ar de combustão	59.736,0 Nm ³ /h	77.490,0 Nm ³ /h
Vazão de O ₂ para ar combustão	3.878,7 Nm ³ /h	0,0 Nm ³ /h
Umidade do ar enviado	28,0 g/Nm ³	28,0 g/Nm ³
Fração molar de CO no BFG	23,50%	21,5%
Fração molar de CO ₂ no BFG	20,80%	22,2%
Fração molar de H ₂ no BFG	3,35%	4,0%

Tabela 11 – Temperaturas e fração molar de oxigênio e monóxido de carbono – Validação I e II.

SIMULAÇÃO DO REGENERADOR -				
Variáveis de saída	VALIDAÇÃO I		VALIDAÇÃO II	
	Início	Fim	Início	Fim
Temperatura do domo	1.171 °C	1.277 °C	1.190 °C	1.318 °C
Temperatura da chaminé	193,0 °C	304,7 °C	190,5 °C	293,5 °C
Análise de O ₂ chaminé	2,4%		0,6%	
Análise de CO chaminé	462,0	PPM	9.546,0	PPM

3 RESULTADOS

Para apresentar os resultados foram extraídas figuras dos modelos com a utilização de escala em cores que representam a variação da temperatura, cujos valores estão correlacionados com as devidas faixas de cores na legenda.

Na Figura 4 são apresentados os perfis de temperatura no regenerador ao final do ciclo de combustão para as Validações I e II.

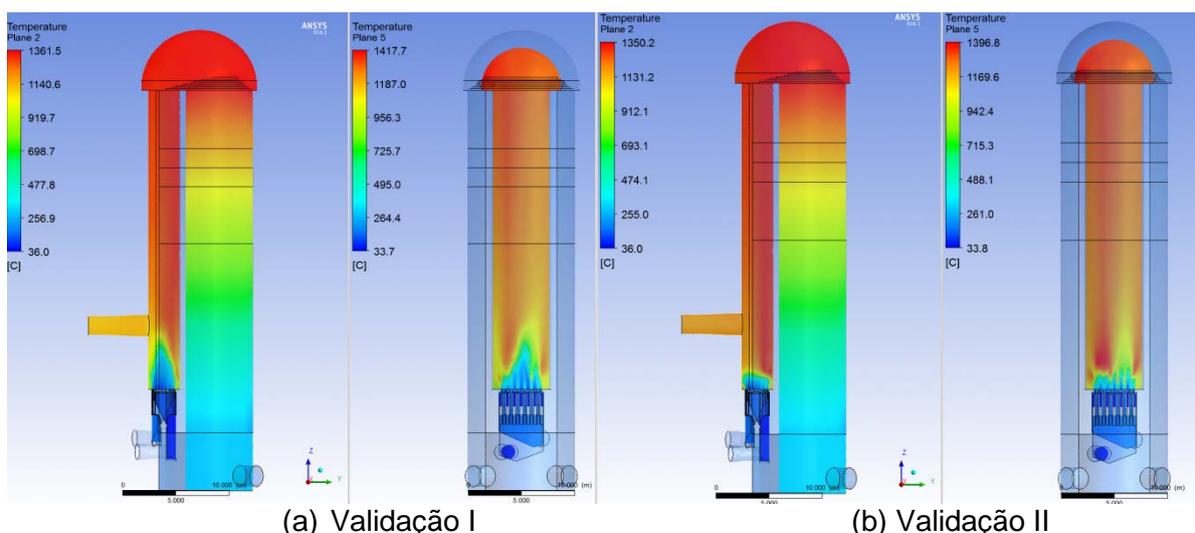
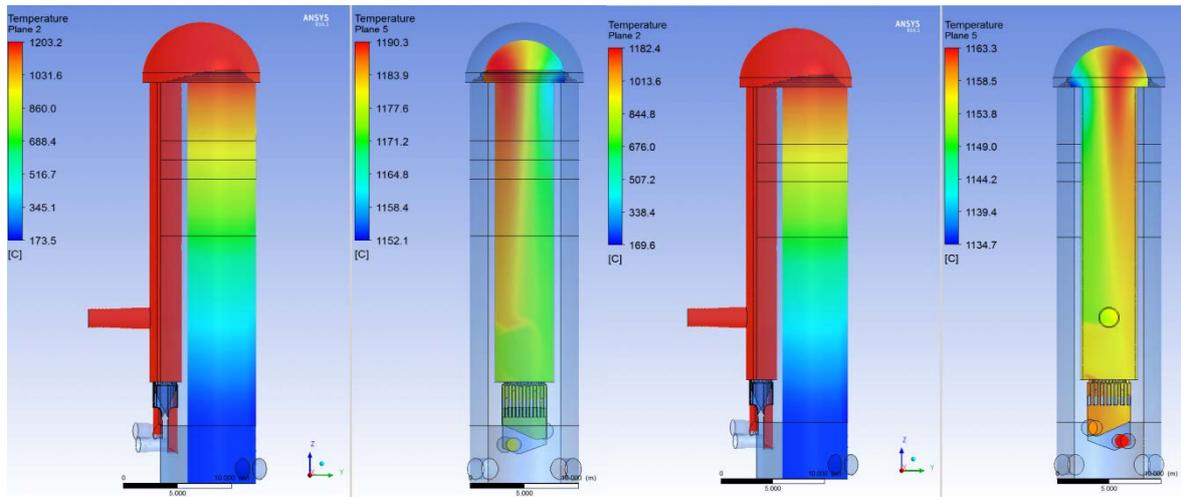


Figura 4 - Perfil de temperatura no regenerador após 6660 s de combustão.

Na Figura 5 são apresentados os perfis de temperatura no regenerador no final do ciclo de ventilação para as Validações I e II.

Na Figura 5 são apresentados os perfis de temperatura no regenerador no final do ciclo de ventilação para as Validações I e II. .



(a) Validação I (b) Validação II
Figura 5 - Perfil de temperatura no regenerador após 6660 s de ventilação.

3.1 Análise dos Resultados

Foram comparados os resultados das temperaturas do domo e da chaminé calculados pelos modelos com os valores reais durante os ciclos de combustão e ventilação. Nas Tabelas 12 e 13 são confrontados os valores das temperaturas do domo e chaminé medidos no regenerador com os calculados pela simulação computacional durante o ciclo de combustão para as Validações I e II. No gráfico da Figura 6 são apresentadas as variações da temperatura medida e calculada.

Tabela 12 – Temperatura do domo e da chaminé medida e simulada - Validação I.

Condição	Tempo (s)	Temperatura Real		Temperatura - Modelo - Validação I		Erro da Simulação Computacional	
		Domo (°C)	Chaminé (°C)	Domo (°C)	Chaminé (°C)	Domo	Chaminé
1	0	1194	193	1190	193	0,3%	0,0%
2	60	1217	203	1337	217	-9,9%	-7,2%
3	300	1241	221	1334	219	-7,5%	0,8%
4	600	1255	224	1331	223	-6,0%	0,4%
5	900	1260	229	1330	227	-5,6%	1,0%
6	1200	1262	232	1329	230	-5,3%	0,8%
7	1800	1265	240	1330	238	-5,1%	0,9%
8	2400	1266	247	1332	245	-5,2%	0,7%
9	3000	1282	256	1333	253	-4,0%	1,3%
10	3600	1287	264	1333	260	-3,6%	1,4%
11	4200	1280	271	1334	268	-4,2%	1,2%
12	4800	1280	279	1333	275	-4,2%	1,4%
13	5400	1278	287	1334	282	-4,4%	1,7%
14	6000	1278	295	1335	290	-4,5%	1,7%
15	6600	1279	303	1345	299	-5,1%	1,3%

Tabela 13 – Temperatura do domo e da chaminé medida e simulada – Validação II.

Condição	Tempo (s)	Temperatura Real		Temperatura - Modelo - Validação II		Erro da Simulação Computacional	
		Domo (°C)	Chaminé (°C)	Domo (°C)	Chaminé (°C)	Domo	Chaminé
1	0	1172,0	191,0	1192,0	195,0	-2%	-2%
2	60	1201,0	198,0	1331,2	222,9	-11%	-13%
3	300	1280,0	213,5	1325,8	225,8	-4%	-6%
4	600	1287,0	218,5	1324,9	229,9	-3%	-5%
5	900	1291,0	222,3	1325,0	233,8	-3%	-5%
6	1200	1303,0	226,0	1326,2	237,8	-2%	-5%
7	1800	1305,0	233,4	1326,6	245,9	-2%	-5%
8	2260	1308,5	239,0	1327,5	254,0	-1%	-6%
9	3000	1308,0	248,0	1328,2	262,2	-2%	-6%
10	3600	1303,0	255,0	1328,9	270,5	-2%	-6%
11	4200	1314,0	263,0	1329,4	278,7	-1%	-6%
12	4800	1315,0	271,0	1330,1	288,3	-1%	-6%
13	5400	1314,0	279,0	1330,5	297,5	-1%	-7%
14	6000	1318,0	287,0	1333,4	308,0	-1%	-7%
15	6600	1319,0	295,0	1331,6	318,4	-1%	-8%

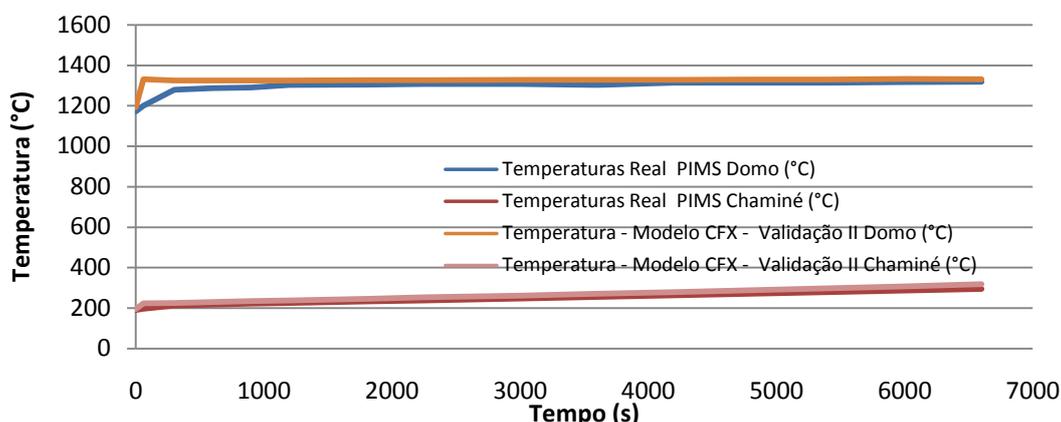


Figura 6 - Temperaturas do domo e da chaminé medidos e calculados pela simulação computacional na combustão – Validação II.

Foram comparados também os valores da temperatura do ar quente ao passar pelo *checker* durante o ciclo de ventilação. Na Tabela 14 são confrontados os valores da temperatura do ar quente que está saindo do regenerador, medidos e calculados pela simulação computacional durante o ciclo de ventilação para as Validações I e II. No gráfico da Figura 7 são apresentadas as variações da temperatura medida e calculada.

Tabela 14 – Temperatura do ar quente que sai do regenerador medido e simulado na ventilação.

Tempo (minutos)	Validação I			Validação II		
	Temperatura (°C)		Erro	Temperatura (°C)		Erro
	Medido	Simulação		Medido	Simulação	
0,0	1267,0	1268,0	-0,1%	1299,0	1305,0	-0,5%
11,5	1253,0	1260,1	-0,6%	1294,0	1284,2	0,8%
21,5	1245,0	1245,2	0,0%	1283,0	1270,4	1,0%
31,5	1238,0	1230,0	0,6%	1259,4	1256,3	0,2%
41,5	1223,0	1215,0	0,7%	1250,8	1242,6	0,7%
51,5	1215,0	1200,0	1,2%	1239,7	1228,7	0,9%
61,5	1195,0	1185,0	0,8%	1219,4	1214,9	0,4%
64,0	1188,0	1181,4	0,6%	1214,0	1211,5	0,2%

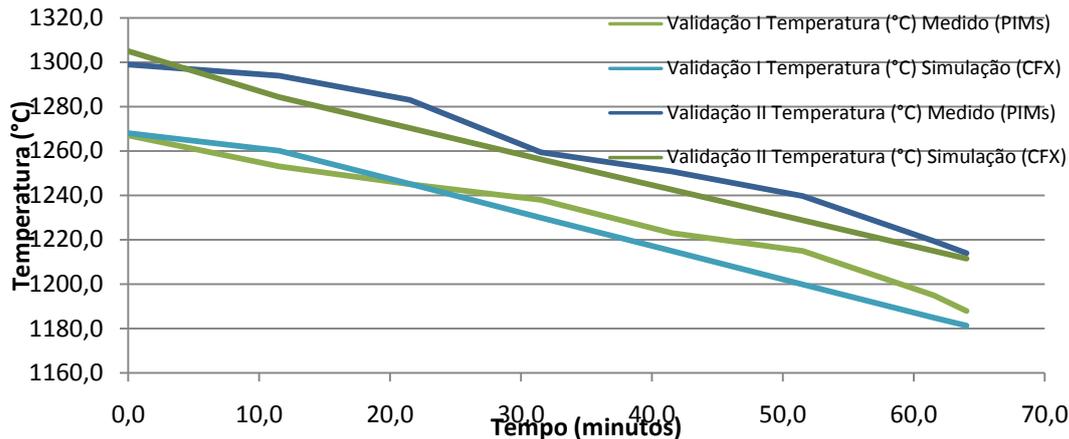


Figura 7 - Temperaturas do ar quente após passar pelo *checker* medidos e calculados pela simulação computacional do ciclo de ventilação para as validações I e II.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento da metodologia de engenharia e de modelos numéricos para representação dos ciclos de combustão e ventilação de regeneradores do Alto-Forno 3 da Usiminas.

Para validação do modelo desenvolvido foram utilizados dois ciclos completos de combustão e ventilação do Regenerador 7, com distintas condições operacionais, a partir de dados reais registrados.

A partir da comparação dos resultados obtidos na simulação computacional com os valores de temperatura medidos no domo e na chaminé, foi verificado que o modelo representa os ciclos de combustão e ventilação com erro máximo de 13%. Devido ao elevado grau de complexidade das análises que envolveram a simulação de combustão com escoamento turbulento e com as condições variando ao longo do tempo, pode-se considerar que o erro apresentado é aceitável.

O modelo poderá ser utilizado para simular diferentes cenários operacionais de vazão de gás misto, enriquecimento do ar de combustão com oxigênio e, também, a razão de mistura entre BFG e COG, e, com isto, determinar a condição mais eficiente energeticamente e com menor custo operacional.

REFERÊNCIAS

- 1 ANSYS, I. ANSYS CFX – Solver Theory Guide”, ANSYS CFX Release 15.0. Canonsburg, PA, USA: [s.n.], 2006.
- 2 CFX, I. CFX user’s guide. Waterloo.: CFX, 2005.
- 3 WILCOX, D. C. Turbulence Modeling for CFD. [S.l.]: DCW Industries, v. 2, 1998.
- 4 SPALDING, D. B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent. Thirteen Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, p. 649-657, 1971.
- 5 [HTTPS://WWW.IRC.WISC.EDU/PROPERTIES/](https://www.irc.wisc.edu/properties/) , 2016.