

Revista Árvore

ISSN: 0100-6762

r.arvore@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa

Brasil

Costa Oliveira, Aylson; de Cássia Oliveira Carneiro, Angélica; Camara Barcellos, Daniel;  
Valencia Rodriguez, Augusto; Machado Nogueira Amaral, Bartholomeu; Corradi Pereira,  
Bárbara Luísa

RESFRIAMENTO ARTIFICIAL EM FORNOS RETANGULARES PARA A PRODUÇÃO  
DE CARVÃO VEGETAL

Revista Árvore, vol. 39, núm. 4, julio-agosto, 2015, pp. 769-778

Universidade Federal de Viçosa

Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48842214020>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

## **RESFRIAMENTO ARTIFICIAL EM FORNOS RETANGULARES PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL<sup>1</sup>**

Aylson Costa Oliveira<sup>2</sup>, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro<sup>3</sup>, Daniel Camara Barcellos<sup>4</sup>, Augusto Valencia Rodriguez<sup>5</sup>, Bartholomeu Machado Nogueira Amaral<sup>6</sup> e Bárbara Luísa Corradi Pereira<sup>7</sup>

**RESUMO** – Um importante aspecto a ser considerado na produção de carvão vegetal é o longo período de resfriamento dos fornos de alvenaria, acarretando na baixa produtividade e exigindo maior número de fornos para suprir a demanda de produção. Pesquisas têm sido desenvolvidas para a redução do tempo de resfriamento dos fornos retangulares, utilizando trocadores de calor. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar três modelos de trocadores de calor que promovam a redução significativa do tempo de resfriamento. A pesquisa foi realizada na unidade produtora de carvão vegetal Buritis, da Empresa Arcelor Mittal Bioflorestas, localizada na cidade de Martinho Campos, MG. Foram avaliados três diferentes trocadores de calor (Modelos 1, 2 e 3), determinando o tempo, em dias, que os fornos retangulares levavam para atingir a temperatura de 50 °C em relação ao resfriamento natural. O Modelo 1 apresentou ganho real no tempo de resfriamento de 12,5%; o Modelo 2, ganho real de 38%; e o Modelo 3, com fluxo de gás convencional, apresentou ganho médio de 32%, enquanto no fluxo de gás invertido o ganho foi de 43%. Conclui-se que os trocadores de calor avaliados foram eficientes na redução do tempo de resfriamento dos fornos retangulares para produção de carvão vegetal, elevando, assim, a produtividade dos fornos. O trocador de calor Modelo 3, com fluxo de gás invertido, apresentou o maior ganho real no tempo de resfriamento, além do menor número de focos de incêndio durante o descarregamento do carvão vegetal.

Palavras-chave: Trocadores de calor; Carbonização; Produtividade.

## ***ARTIFICIAL COOLING IN RECTANGULAR KILNS FOR CHARCOAL PRODUCTION***

**ABSTRACT** – *An important aspect to be considered in charcoal production is the long cooling period of the kilns, which results in low productivity and requires a large number of kilns to supply the production demand. Researches have been developed to reduce the cooling time of the rectangular kilns by using heat exchangers. Thus, the objective of this study was to evaluate three models of heat exchangers that promote significant reduction in cooling time. The research was conducted at ArcelorMittalBioflorestas Company, Buritis unit, located in the city of Martinho Campos, MG. Three different heat exchangers (Models 1, 2 and 3) were evaluated. Cooling time, in days, of rectangular kilns that used heat exchangers was compared to natural cooling until the temperature of 50°C. Model 1 showed a real gain of 12.5% in cooling time, while the real gain of Model 2 was 38%. Model 3 with conventional gas flow showed an average gain of 32% whereas for inverted gas flow the gain was 43%. It is concluded that the heat exchangers evaluated were effective in reducing the cooling time of*

<sup>1</sup> Recebido em 05.08.2013 aceito para publicação em 02.06.2015.

<sup>2</sup> Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Engenharia Florestal, Boa Esperança , Cuiabá, MT - Brasil. E-mail: <aylsoncosta@gmail.com>.

<sup>3</sup> Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa, MG - Brasil. E-mail: <cassiacarneiro1@gmail.com>.

<sup>4</sup> Camara&Barcellos, Bom Despacho, MG - Brasil. E-mail: <daniel@barcelloscamara.com.br>.

<sup>5</sup> Biomtec Biomassas e Tecnologia Ltda, Belo Horizonte, MG - Brasil. E-mail: <augusto.biomtec@gmail.com>.

<sup>6</sup> In memoriam.

<sup>7</sup> Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Engenharia Florestal, Boa Esperança, Cuiabá, MT - Brasil. E-mail: <babicorradi@gmail.com>.

*the rectangular kilns for charcoal production, which raised the kilns' productivity. Heat exchanger Model 3, with inverted gas flow, had the largest gain in cooling time and the lower number of fires during charcoal discharging.*

*Keywords:* Heat exchangers; Carbonization; Productivity.

## 1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal apresenta elevada importância para a economia do Brasil, principalmente pelo seu papel de termorredutor na transformação do minério de ferro em ferro-gusa, aço ou ligas metálicas nas siderúrgicas, que no ano 2010 tiveram participação de 2% no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro (SGM, 2011). Porém, grande parte da produção nacional de carvão vegetal ocorre em sistemas rudimentares de conversão da madeira em carvão.

Objetivando maior eficiência, produtividade e qualidade do carvão vegetal, nos últimos 20 anos os fornos de alvenaria utilizados na carbonização da madeira passaram por grandes modificações. Desenvolveram-se os fornos retangulares que continuaram a ser construídos com tijolo maciço cerâmico, porém a grande capacidade volumétrica desses fornos possibilitou a mecanização das operações de carregamento e descarregamento, tornando necessária a construção dos fornos numa mesma unidade de produção de carvão vegetal (OLIVEIRA, 2012).

Os fornos retangulares apresentam rendimento gravimétrico em carvão vegetal variando de 30 a 35%, mas, visando ao aumento da produtividade dos fornos e melhoria da qualidade e homogeneidade do carvão, o controle da carbonização tem sido executado pelo monitoramento da temperatura interna do forno, através de sensores infravermelhos ou sistema supervisório, conforme atestado por Arruda et al. (2011) e Carvalho et al. (2012).

O tempo médio de carbonização da madeira nos fornos retangulares é de quatro dias, enquanto o resfriamento pode durar de 8 a 14 dias. O tempo de resfriamento depende da geometria do forno, de suas dimensões, do material usado na sua construção e da massa de carvão produzida, entre outros (FRANÇA; CAMPOS, 2002). Assim, um importante aspecto a ser considerado na produção de carvão vegetal é o longo período de resfriamento dos fornos, acarretando baixa produtividade e exigindo maior número de fornos para suprir a demanda de produção.

A prática mais usual de resfriamento é o processo natural, em que o forno diminui sua temperatura lentamente, ocorrendo a troca de calor do carvão com o ambiente do forno e do forno com o ambiente externo. O procedimento mais empregado para se acelerar o resfriamento dos fornos é aplicar sobre eles uma mistura de água e argila, popularmente conhecida como “barrela”. Essa é uma prática comum, mas pouco tecnificada, o que implica ganho insignificante no tempo de resfriamento dos fornos retangulares, no entanto apresentando melhor efeito sobre a vedação do forno.

A melhor alternativa de resfriamento de fornos retangulares para a produção de carvão vegetal seria a utilização de trocadores de calor. O trocador de calor é um equipamento que tem como principal objetivo transferir energia térmica de um sistema para a vizinhança ou entre partes de um sistema. Segundo Kreith (1998), o trocador de calor é um dispositivo que efetua a transmissão de calor de um fluido para outro, em que ambos os fluidos atingem a mesma temperatura final, e a quantidade de calor transferida pode ser destinada igualando-se a energia perdida pelo fluido mais quente à energia ganha pelo mais frio, tendendo, assim, a um equilíbrio dos fluidos.

O resfriamento artificial em fornos de alvenaria consiste na retirada do ar aquecido de dentro do forno durante o período de resfriamento, condução desse ar por um trocador de calor para, depois, retorná-lo a uma temperatura mais baixa para o interior do forno, acelerando a redução da temperatura interna do forno e diminuindo, assim, o tempo de resfriamento. Nesse processo, a boa conservação dos fornos (vedação das entradas de ar) é fundamental, pois a entrada de oxigênio ocasionará focos de incêndio no seu interior, aumentando, assim, o tempo de resfriamento.

Pelo exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar três modelos de trocadores de calor para acoplamento em fornos retangulares de produção de carvão vegetal que promovam redução significativa do tempo de resfriamento e, consequentemente, elevem a produtividade dos fornos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Local

A pesquisa foi realizada na unidade produtora de carvão vegetal Buritis da Empresa Arcelor Mittal Bioflorestas, localizada na cidade de Martinho Campos, MG. A referida cidade situa-se no Noroeste de Minas Gerais, cuja latitude é de 19°34'20" S, longitude de 45°20'30" W e altitude de 745 m, apresentando um índice médio pluviométrico anual de 1.230,3 mm e temperatura média anual de 22,1 °C.

Foram avaliados fornos retangulares com capacidade volumétrica de enfornamento de 320 m<sup>3</sup> de madeira com casca, com 32 m de comprimento, 4 m de largura e 4 m de altura das paredes com 1,27 m de flecha na cúpula. As paredes dos fornos são em alvenaria comum, com 10 cm de espessura, revestida externamente por uma camada de 4 cm de argamassa armada. As portas são de concreto armado e cinasita, com revestimento da barra da porta de concreto refratário.

O ciclo total da produção de carvão vegetal com resfriamento natural apresenta duração média de 12 dias, sendo quatro dias de carbonização e oito de resfriamento. O rendimento gravimétrico médio em carvão vegetal é de 33%.

Para avaliação dos três modelos de trocadores propostos, foram acompanhados diversos ciclos de carbonização. A temperatura foi medida através de sensor infravermelho em pontos instalados na porta dos fornos retangulares.

### 2.2. Modelo 1

Este Modelo 1 consiste na simples retirada do ar quente do interior do forno durante o período de resfriamento e sua condução por dutos metálicos instalados na parte externa do forno.

Durante a passagem do ar quente pelos dutos, ocorre a troca de calor com o meio ambiente, retornando o ar para o forno a uma menor temperatura. O sistema deve estar em circuito fechado, para que não haja a entrada de oxigênio no sistema que provocaria o aquecimento do forno, devido à ação oxidante do oxigênio, provocando a combustão do carvão dentro do forno.

Na Figura 1A são apresentados os esquemas de instalação do trocador de calor, Modelo 1, no forno retangular. A circulação de ar ocorreu pela parte superior

do forno, aproximadamente 3,7 m de altura, região mais aquecida, devido à circulação do ar, cuja tendência é a subida do ar quente. O ar quente do interior do forno foi succionado em uma extremidade, trocando calor com o sistema de dutos externos e retornando, a uma temperatura mais baixa, na extremidade contrária do forno retangular.

Para a construção desse trocador, foi necessário exaustor do tipo centrífugo em aço inox, com motor de 5 cv, tubos de diâmetro de 40 cm em chapa 22 pintados com tinta anticorrosiva e conexões realizadas com pasta mecânica resistente a alta temperatura.

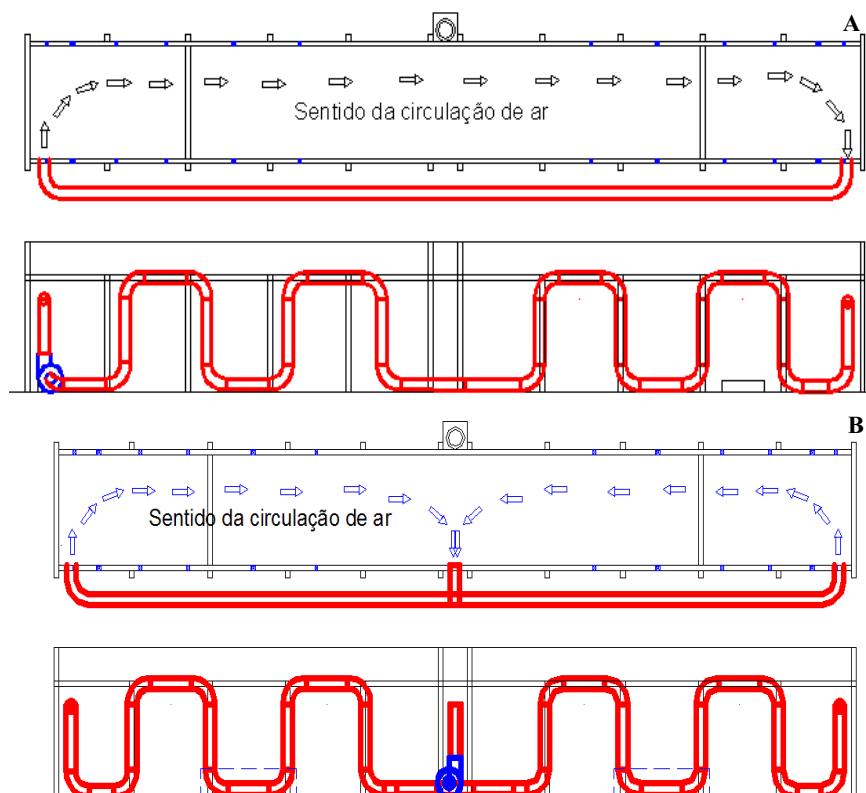
Para validação desse trocador de calor, foi avaliada a evolução da temperatura durante o resfriamento em quatro ciclos de carbonização, em forno retangular utilizando o trocador de calor como mecanismo para redução do tempo de resfriamento (Forno 50). Os resultados foram comparados com a evolução de temperatura em forno retangular (testemunha – Forno 52), no qual não havia sido instalado o trocador de calor. Para acelerar o resfriamento, realizava-se o barrelamento.

### 2.3. Modelo 2

Buscando maior redução no tempo de resfriamento dos fornos retangulares, a partir dos resultados obtidos pelo Modelo 1 foi observada a necessidade de aumentar a troca de calor. Para isso, instalou-se, em duas seções dos tubos metálicos utilizados no resfriamento, um sistema de troca de calor do tipo ar/água. A superfície de troca na água do Modelo 2 é de 35 m<sup>2</sup> e a superfície de troca no ar é de cerca de 90 m<sup>2</sup>, perfazendo um somatório das áreas igual a 125 m<sup>2</sup>. O volume total dos dois tanques é de aproximadamente 9.000 L de água, enquanto o volume real de água, descontando os tubos e caixas, seria de 6.500 L de água.

No Modelo 2, conforme apresentado na Figura 1B, o ar quente do interior do forno troca calor com o tubo metálico, que realiza a troca de calor com a água e esta, por sua vez, troca calor com o meio ambiente, através de um sistema de cascata. Pelo fato de a condutividade térmica da água ser 30 vezes superior à do ar, espera-se melhoria na taxa de resfriamento do forno retangular.

Buscando reduzir a incidência de focos de incêndio durante a descarga do carvão, homogeneizar e aumentar a taxa de resfriamento do forno, para o



**Figura 1 – (A)** Trocador de calor em forno retangular, Modelo 1; e **(B)** Trocador de calor em forno retangular, Modelo 2.  
**Figure 1 – (A)** Heat exchanger in rectangular kiln, Model 1; and **(B)** Heat exchanger in rectangular kiln, Model 2.

Modelo 2, o exaustor foi posicionado no centro do forno, exaurindo o ar aquecido no centro e insuflando o ar resfriado nas extremidades do forno próximas das portas (Figura 1B).

Para a construção desse trocador foi necessário: exaustor do tipo centrífugo em aço inox, com motor de 5 cv; tubos de diâmetro de 40 cm em chapa 22 pintados com tinta anticorrosiva; tanques de resfriamento construídos em alvenaria; trocador de calor para resfriamento da água, construído com chapa zincada; e conexões realizadas com pasta mecânica resistente a alta temperatura.

Para validação desse modelo de trocador de calor, foi avaliada a evolução da temperatura durante o resfriamento em cinco ciclos de carbonização em forno retangular, utilizando o trocador de calor como mecanismo para redução do tempo de resfriamento. Os resultados foram comparados com a evolução de temperatura em forno retangular (testemunha), sem a instalação de

trocador de calor. Foi realizado somente o barrelamento como forma de acelerar o resfriamento.

#### 2.4. Modelo 3

O trocador de calor Modelo 3 apresenta maior área de troca de calor dos tubos metálicos com a água. A área de troca imersa é de 330 m<sup>2</sup> e a de tubulação aérea, de 30 m<sup>2</sup>, perfazendo um total de 360 m<sup>2</sup> de área de troca. A área de superfície de troca é 300% maior do que a verificada no Modelo 2. A área de troca da água com ambiente (torres de resfriamento) é cinco vezes maior, e o bombeamento de água nas torres é o dobro do Modelo 2. Nesse modelo, os dois tanques possuem capacidade de 55.000 L de água, em que, descontando os volumes dos tubos, se tem algo em torno de 36.000 L de água, 550% a mais do que o Modelo 2. O exaustor utilizado é do tipo limit load e possui vazão de ar de 12.000 m<sup>3</sup>/h, usando um motor de 10 cv.

Na Figura 2 são apresentados os esquemas de instalação do trocador de calor no forno retangular,

Modelo 3. Pretende-se com este modelo reduzir em quatro a cinco dias o tempo de resfriamento.

Um inversor de fluxo foi instalado juntamente com essa configuração de trocador de calor (Modelo 3). O inversor de fluxo de gás dentro do forno visa reverter o fluxo de gás quente/gás frio, buscando reduzir os focos de incêndios que ocorriam na parte central do forno retangular durante a utilização do trocador de calor Modelo 2.

Quando as válvulas 1 e 2 estiverem abertas e a 3 e a 4 fechadas, o fluxo ocorre no sentido convencional: aspira-se ar quente na parte central do forno e ventila-se ar frio nas extremidades, próximo às portas. Quando as válvulas 3 e 4 estiverem abertas e a 1 e 2 fechadas, aspira-se ar quente nas extremidades e ventila-se ar frio no centro, ou seja, com sentido de fluxo de gás invertido.

Para análise do trocador de calor Modelo 3, foram avaliados 30 ciclos de carbonização, em que o resfriamento ocorre de maneira natural, executando barreamentos periódicos; 21 ciclos de carbonização utilizando trocador de calor com sentido de fluxo de gás convencional (do centro para as portas); e nove ciclos com trocador de calor com sentido do fluxo de gás invertido (das portas para o centro).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Modelo 1

Na Figura 3 são apresentadas a evolução da temperatura dos fornos durante o período de resfriamento

dos fornos retangulares com o trocador de calor Modelo 1 e a testemunha nos quatro ciclos de carbonização avaliados.

Nesse sistema de resfriamento, a troca de calor ocorria entre ar/ar, ou seja, o ar aquecido do interior do forno trocava calor com os tubos metálicos que trocavam calor com o meio ambiente. O exaustor foi mantido ligado durante todo o período de resfriamento dos fornos retangulares.

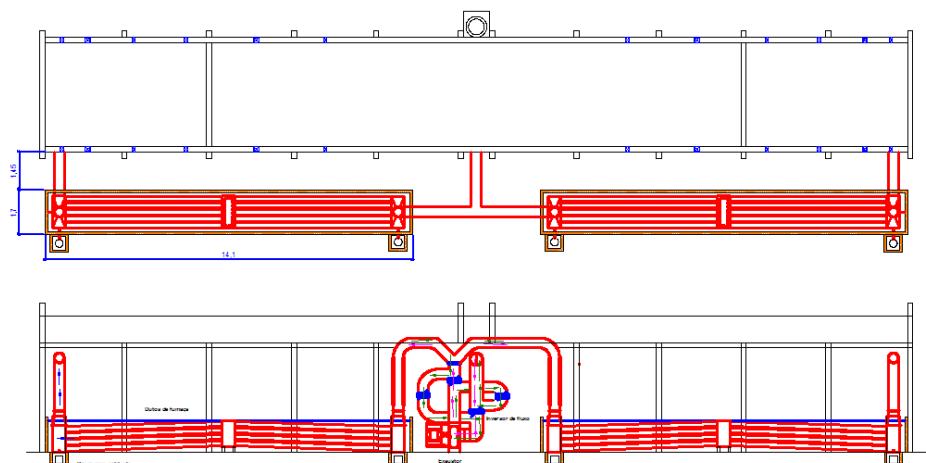
Durante a abertura do forno e o consequente descarregamento do carvão vegetal, detectou-se que a região do forno onde o ar era insuflado (Figura 1A) apresentava baixo índice de incêndio, enquanto a região onde o ar era aspirado (Figura 1A) apresentava elevada frequência de incêndios, indicando que apenas um dos lados do forno estava sendo resfriado efetivamente.

#### 3.2. Modelo 2

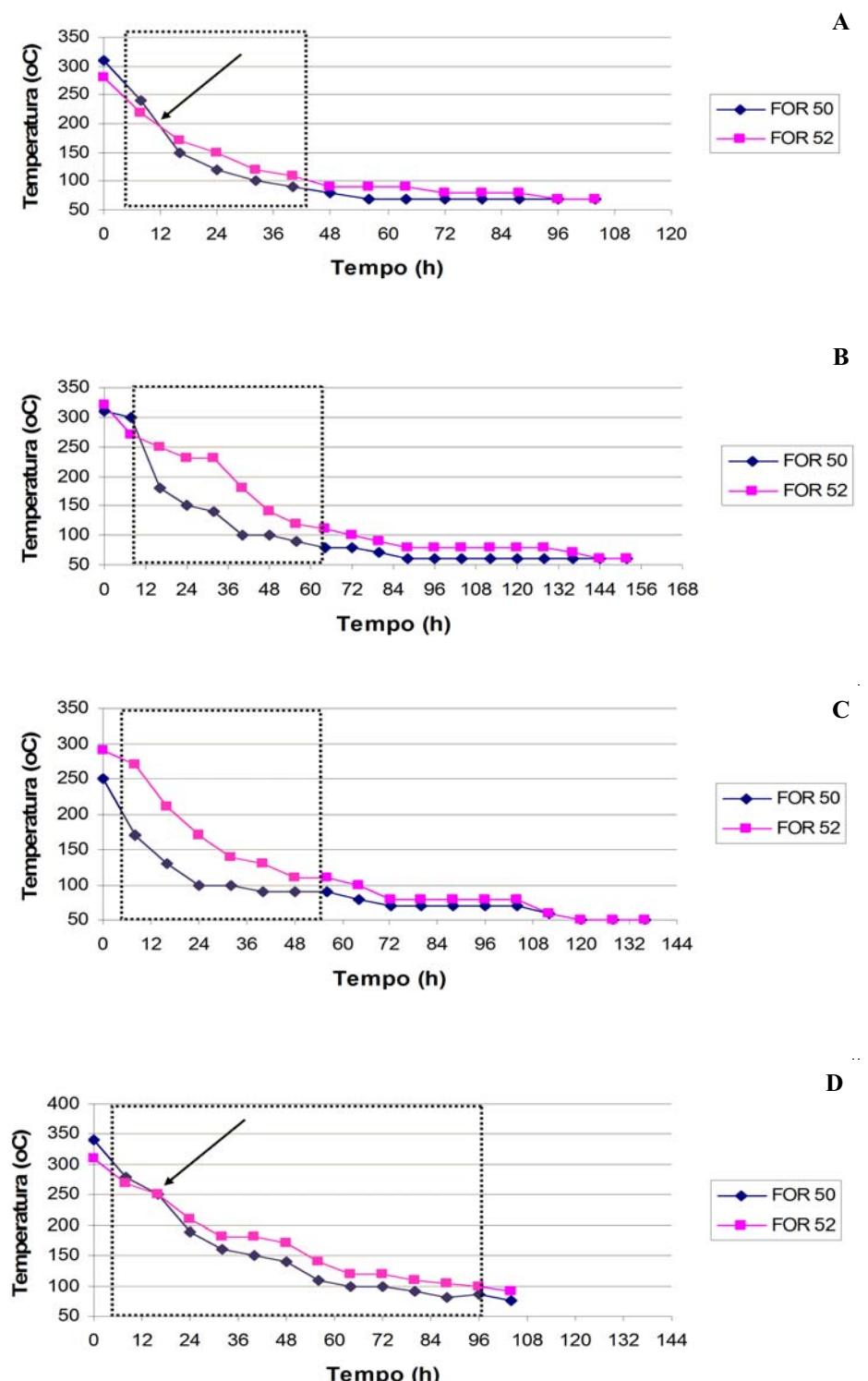
Na Figura 4 são apresentadas a média da temperatura dos fornos durante o período de resfriamento dos fornos retangulares com o trocador de calor Modelo 2 e a testemunha.

Verificou-se, em algumas carbonizações, que no momento em que o exaustor era desligado, seja por manutenção ou por outros motivos, ocorria o incremento da temperatura média do forno em 10 °C, diminuindo a eficiência do trocador de calor.

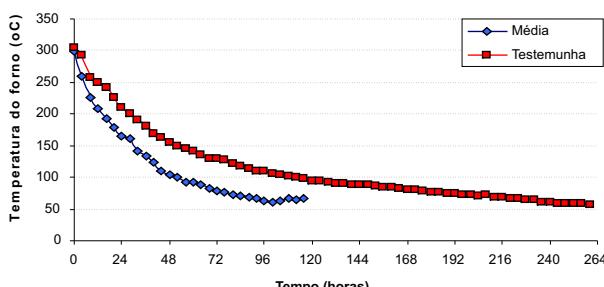
Para o Modelo 2, em termos percentuais, os gases do interior do forno de carbonização sofreram redução de temperatura de 36%, em média, nas primeiras 30 h



**Figura 2 – Trocador de calor em forno retangular, Modelo 3.**  
**Figure 2 – Heat exchanger in rectangular kiln, Model 3.**



**Figura 3 – Temperatura dos fornos durante o período de resfriamento, utilizando o trocador de calor Modelo 1 e a testemunha.**  
**Figure 3 – Temperature of kilns during the cooling period using the heat exchanger Model 1 and the control.**



**Figura 4** – Temperatura média dos fornos durante o período de resfriamento, utilizando o trocador de calor Modelo 2 e a testemunha.

**Figure 4** – Average temperature of kilns during the cooling period using the heat exchanger Model 2 and the control.

de resfriamento e, no restante do período, essa queda foi de 22%, em média. Esses valores indicam que se pode melhorar a eficiência desse trocador de calor, buscando maior redução da temperatura dos gases antes de seu retorno ao interior do forno.

Durante a abertura dos fornos retangulares utilizando o Modelo 2 para aceleração do resfriamento, verificaram-se focos de incêndio na parte central do forno, onde ocorre a sucção dos gases aquecidos (Figura 1B). A ocorrência desses incêndios pode ser a má distribuição de ar no interior do forno, promovendo a reação do oxigênio com a massa aquecida de carvão ou, mesmo, pela má vedação dos fornos.

Considerando que o resfriamento artificial através de trocadores de calor promove a circulação forçada de gases no interior do forno, entradas de ar durante o período de resfriamento prejudicam os ganhos de tempo no resfriamento ao promoverem a combustão do carvão ainda no interior do forno, elevando a temperatura.

### 3.3. Modelo 3

Na Tabela 1 são apresentados os valores encontrados para tempo de resfriamento e temperatura, verificados na porta dos fornos no momento de abertura da descarga dos fornos retangulares sem o uso do trocador de calor (testemunha) e com o uso do trocador de calor Modelo 3 com sentido de fluxo de gás convencional e com sentido do fluxo de gás invertido.

De acordo com a Tabela 1, a temperatura média de abertura foi de 52,2 °C para os fornos retangulares sem a utilização de trocador de calor, para redução

do tempo de resfriamento. Os fornos com trocador de calor Modelo 3 apresentaram temperatura de 55,2 °C e 50,0 °C, respectivamente para fluxo de gás convencional e fluxo de gás invertido.

## 4. DISCUSSÃO

Quando o resfriamento dos fornos ocorre de maneira natural, ou seja, simples troca de calor do forno com o ambiente, essa troca ocorre de maneira mais lenta devido à resistência térmica dos materiais construtivos dos fornos. Essa resistência, que é adequada no momento da carbonização ao minimizar as perdas térmicas, dificulta o resfriamento (SANTOS, 2013). Justifica-se, assim, o uso de trocadores de calor em fornos de alvenaria para acelerar a troca de calor e, consequentemente, o resfriamento da massa de carvão para sua retirada e expedição.

### 4.1. Modelo 1

De acordo com a Figura 3, observa-se que, no forno retangular com trocador de calor Modelo 1, a curva de evolução da temperatura durante o período de resfriamento apresentou maior inclinação em relação ao forno com resfriamento natural. Assim, a utilização de trocador de calor proporcionou maiores reduções da temperatura nas primeiras 48 h de resfriamento, alcançando a temperatura média de 100 °C. Após atingir essa temperatura, não se verificaram ganhos significativos no tempo de resfriamento, permanecendo o forno estagnado nessa temperatura.

Nas carbonizações realizadas para avaliação do trocador de calor Modelo 1, houve, em duas carbonizações, maior redução da temperatura (Figuras 3BC). Tal fato foi devido à incidência de chuvas durante o período de resfriamento, o que proporcionou uma troca mais eficiente de calor do sistema com o ambiente. Isso indica que a utilização da água poderia ser boa alternativa para acelerar a troca de calor, devendo-se avaliar as consequências dessa prática dos pontos de vista econômico e ambiental. Esse fato subsidiou o projeto de trocador de calor Modelo 2 (Figura 1B).

O Modelo 1 de trocador de calor adaptado a fornos retangulares apresentou diminuição de 24 h no tempo de resfriamento, passando para 168 h (sete) em relação ao tempo verificado no resfriamento natural dos fornos retangulares, que era de 192 h, ou oito dias, ou seja, o ganho real no tempo de resfriamento foi de 12,5%, com a utilização do trocador de calor Modelo 1.

**Tabela 1** – Tempo de resfriamento e temperatura da porta do forno para a testemunha, trocador de calor Modelo 3, com fluxo de gases convencional e fluxo de gás invertido.

**Table 1** – Cooling time and temperature of kiln's door for the control, heat exchanger Model 3, with conventional gas flow and inverted gas flow.

	Testemunha		Fluxo de gás convencional		Fluxo de gás invertido	
	Tempo (dias)	Temp. (°C)	Tempo (dias)	Temp. (°C)	Tempo (dias)	Temp. (°C)
Média	10,2	52,2	Média	6,9	55,2	Média
Máx	16,6	80,0	Máx	9,8	70,0	Máx
Mín	6,8	40,0	Mín	3,6	40,0	Mín
Desvio	2,5	10,7	Desvio	1,4	9,3	Desvio
CV(%)	24,0	20,5	CV(%)	20,8	16,8	CV(%)
						14,1

#### 4.2. Modelo 2

De acordo com a Figura 4, o resfriamento em fornos retangulares sem a utilização de trocador de calor, utilizando somente o barrelamento, teve duração média de 264 h (11 dias), valor superior ao normalmente verificado nesses fornos retangulares, que normalmente são resfriados em 192 h (oito dias). Utilizando o trocador de calor Modelo 2, verificou-se ganho significativo no tempo de resfriamento, alcançando em aproximadamente 120 h (cinco dias) a temperatura média de 60 °C, temperatura que garante a abertura do forno com menor risco de ocorrência de incêndios, reduzindo em dois dias o tempo de resfriamento dos fornos em relação à utilização do trocador Modelo 1 (sete dias).

Através da utilização do Modelo 2 de trocador de calor para fornos retangulares, obteve-se um ganho real de 38% do tempo de resfriamento em relação ao resfriamento natural. Dessa forma, a unidade de produção de carvão vegetal pode, através do aumento da produtividade dos fornos proporcionada pela diminuição do ciclo de carbonização, aumentar sua produção mensal.

Por apresentar maior área de troca de calor com o ambiente (125 m<sup>3</sup>) e utilizar a água como trocador, o Modelo 2 apresentou maior troca de calor do gás aquecido do interior do forno com o ambiente externo. Dessa forma, esse modelo possibilitou o resfriamento mais acelerado, sendo mais eficiente se comparado ao Modelo 2.

#### 4.3. Modelo 3

Os fornos retangulares com resfriamento natural apresentaram tempo médio de 10,2 dias para atingir a temperatura de 50 °C, com máximo de 16,6 e mínimo de 6,8 dias. Os maiores períodos de resfriamento e

elevadas temperaturas verificadas durante a abertura de alguns fornos sem sistema de troca de calor foram causados pela má vedação do forno, ou seja, entrada de oxigênio no seu interior durante o resfriamento e a necessidade de abertura para atender às metas de produção da unidade onde se realizou o estudo.

Nos fornos com sistema de resfriamento através do trocador de calor, Modelo 3 com fluxo de gás convencional, o tempo médio de resfriamento foi de 6,9 dias, tempo mínimo de 3,6 dias e máximo de 9,8 dias. Em relação ao resfriamento natural, o Modelo 3 com fluxo de gás convencional apresentou ganho médio de 32% no tempo de resfriamento. Porém, em 90% das carbonizações avaliadas houve focos de incêndio no interior do forno durante seu descarregamento, necessitando de grande consumo de água para extinção desses focos.

No resfriamento forçado utilizando o trocador de calor Modelo 3 com fluxo de gás invertido, o tempo médio de resfriamento foi de 8,9 dias, com tempo mínimo de 5,8 e máximo de 13,1 dias. Nessa configuração do Modelo 3, o ganho médio no tempo de resfriamento foi de 13%, valor inferior ao encontrado no Modelo 3, com fluxo convencional. No entanto, para as carbonizações com menor tempo de resfriamento, não se observou a incidência de focos de incêndio, obtendo ganhos de 43% no tempo de resfriamento com o trocador de calor Modelo 3 com fluxo de gás invertido em relação ao resfriamento natural.

Na utilização do trocador de calor Modelo 3 com fluxo de gás convencional, os focos de incêndios ocorriam com maior frequência na parte central dos fornos retangulares, em que o combate ao fogo é mais complicado e lento, levando ao alto consumo de água. Na

configuração do Modelo 3 com fluxo de gás invertido, a parte central do forno era mais bem resfriada, gerando menos focos de incêndios nesse local. Os focos de incêndio, quando observados, ocorriam próximos à porta, sendo mais facilmente combatido e com menor consumo de água.

Devido à maior área de troca de calor da tubulação com o ambiente externo, o Modelo 3, em ambos os fluxos avaliados, mostrou-se mais eficiente que os trocadores de calor Modelos 1 e 2. E o Modelo 3 com fluxo invertido mostrou-se mais recomendado para a utilização em fornos retangulares de alvenaria para a produção de carvão vegetal ao apresentar menor número de focos de incêndio durante a abertura do forno. Essa maior eficiência do Modelo 3 também se deveu ao fato de o seu combate ser facilitado em razão de a sua ocorrência ser próximo das portas.

As empresas produtoras de carvão vegetal que utilizam sistemas de troca de calor de diversas configurações em fornos retangulares vêm obtendo reduções de 30 a 40% no tempo total de resfriamento, o que eleva a produtividade desses fornos sem provocar alterações nos parâmetros de qualidade do carvão (SANTOS, 2013).

No processo de resfriamento natural desses fornos retangulares, o ciclo completo de carbonização que contempla as etapas de carregamento do forno, carbonização, resfriamento e descarregamento do carvão vegetal tem duração de 12 dias, o que possibilita a ocorrência de 2,5 ciclos de carbonização por mês por forno, resultando em 30 ciclos no período de 12 meses. Com a utilização dos trocadores de calor, verificaram-se reduções efetivas no tempo de resfriamento dos fornos, resultando no aumento da produtividade, ou seja, o aumento da quantidade de ciclos de carbonização.

No Modelo 1, cuja redução no tempo de resfriamento foi igual a 12,5%, verificou-se aumento no número de carbonização para 2,7 ciclos/mês, ou 33 ciclos ao ano por forno. No Modelo 2, cuja redução foi de 38%, podem-se realizar 3,3 ciclos/mês, ou 40 ciclos anuais por forno. Em relação ao trocador de calor Modelo 3 com fluxo convencional, cuja redução no tempo de resfriamento foi de 32%, torna-se possível realizar 3,2 ciclos/mês, elevando para 38 o número possível de realização de ciclos de cada forno. No Modelo 3

com fluxo invertido, verificou-se a maior redução percentual no tempo de resfriamento (43%), possibilitando a realização de 42 ciclos de carbonização por ano por forno, consequência do aumento dos ciclos de carbonizações mensais para 3,5. Com o uso de trocadores de calor, é possível o aumento da produção de carvão sem a necessidade de aumentar o número de fornos, que implica aumento da área da praça de carbonização e custos com construção de novos fornos.

Reis (2009), avaliando a injeção de vapor de água no interior do forno de alvenaria, obteve redução de 30% no tempo de resfriamento, permanecendo próximos os valores das propriedades do carvão avaliados com e sem o uso da injeção. Por sua vez, Santos (2013), avaliando um trocador de calor do tipo gás/ar, obteve ganhos de 60% no tempo de resfriamento em forno de alvenaria com capacidade de enfornamento de 9st de madeira, sem alterar os parâmetros de qualidade do carvão.

## 5. CONCLUSÃO

Conclui-se que os trocadores de calor avaliados foram eficientes na redução do tempo de resfriamento dos fornos retangulares para produção de carvão vegetal, em comparação com o resfriamento de forma natural, elevando, assim, a produtividade dos fornos e, consequentemente, da unidade de produção de carvão vegetal.

O trocador de calor Modelo 3 com fluxo de gás invertido apresentou o maior ganho real no tempo de resfriamento, além do menor número de focos de incêndio durante a abertura do forno e descarregamento do carvão vegetal.

O resfriamento artificial abre também novas fronteiras e investigação, a exemplo do efeito na qualidade e rendimentos de carvão vegetal, uma vez que o tempo reduzido pode estar contribuindo para a melhoria desses fatores.

## 6. AGRADECIMENTOS

À Empresa Arcelor Mittal, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), à Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (SECTES), ao Polo de Excelência em Florestas e ao Grupo Temático em Carvão Vegetal “G6”, pelo apoio.

## 7. REFERÊNCIAS

- ARRUDA, T.P.M.; PIMENTA, A.S.; VITAL, B.R.; LUCIA, R.M.D.; ACOSTA, F.C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. *Revista Árvore*, v.35, n.4, p.949-955, 2011.
- CARVALHO, S.R.; BORGES, V.L.; MULINA, B.H.O.; OLIVEIRA, R.L.M.; FIGUEIRA JÚNIOR, E.A.; PESSOA FILHO, J.S. Instrumentação térmica aplicada ao processo de produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria. *Revista Árvore*, v.36, n.4, p.787-796, 2012.
- FRANCA, G.A.C.; CAMPOS, M.B. Análise teórica e experimental do resfriamento de carvão vegetal em forno retangular. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100017&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100017&lng=en&nrm=abn). Acesso em: 05 nov. 2012.
- KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. 3.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.
- OLIVEIRA, A.C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.
- REIS, H.O. **Resfriamento de fornos de carbonização por injeção de vapor d'água**. 2009. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.
- SANTOS, I.S. **Resfriamento artificial de carvão vegetal em fornos de alvenaria**. 2013. 97f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.
- SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL – SGM. **Anuário Estatístico: Setor Metalúrgico 2011**. Brasília: 2011. 152p.