

INFORME DE LA QUINTA QUEMA EN EL HORNO PROTOTIPO

A : Jon Bickel – Director del Programa EELA
De : Luis Zapata Pardo y W. Julio Lechuga Canal – EELA Cusco
Fecha : Cusco, 07 de abril de 2012

Contenido

Resumen.....	1
1. Preparación del horno.....	1
2. Sistema de ventilación.	2
3. Cargado del horno	2
4. Quema.....	4
5. Resultados de la quema	14
6. Enfriamiento y apertura del horno	14
7. Consumo energético.....	15

Resumen.

Durante el proceso de validación del horno denominado como “horno mejorado” se han realizado 05 pruebas de validación y transferencia al beneficiario, la misma que ha ido evolucionando favorablemente en aspectos de operación y de transferencia al beneficiario. En forma paralela, el Estado peruano ha sacado una norma en consulta pública, que regularía el tema de las emisiones del sector ladrillero nacional, ha publicado los Límites Máximos Permisibles – LMP que deberían emitir las ladrilleras a nivel nacional, la misma que permite medir el nivel de emisiones del horno mejorado en el proceso de operación, las emisiones del horno conducido en forma apropiada podría cumplir con suficiencia los valores de 1000 mg/m³ de CO dados en la propuesta de norma. Por otro lado, el consumo tradicional de combustible en los hornos tradicionales del sector ladrillero utilizan entre 6 a 17 MJ/kg de cerámico producido, mientras que en este horno se ha logrado utilizar 3 MJ/kg cerámico, pudiendo bajarse este valor aún ms con la experticia del uso del horno.

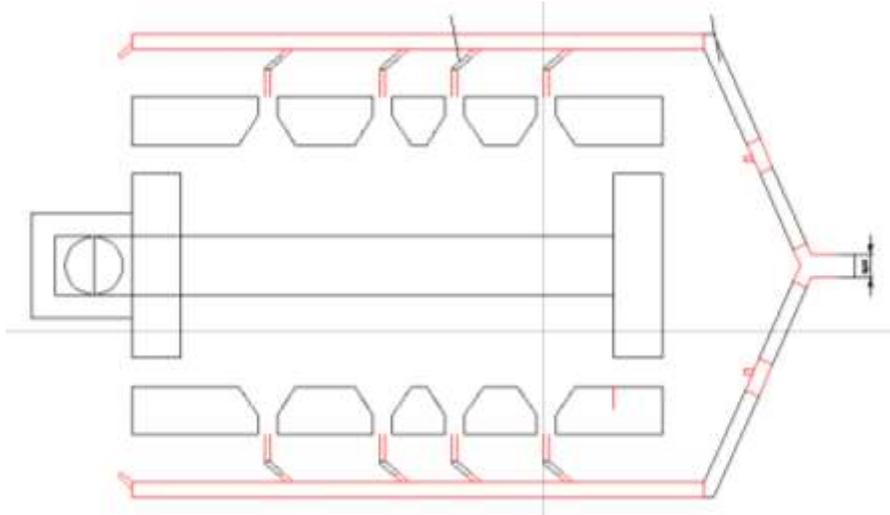
1. Preparación del horno.

El horno prototipo ha requerido de modificaciones para operar en la quinta quema, así en este informe se detallan las modificaciones realizadas. Se ha hecho la limpieza de la escombrera y revocado las grietas producidas por la anterior quema, nivelado y limpieza del

piso del horno, incremento de puntos de medición de temperatura. Se han retirado todas las paredes cortafuegos para esta quema, ganándose más espacio para material a coccionar.

2. Sistema de ventilación.

Figura 1: sistema de ventilación del horno



En la cuarta quema se tenía instalado un sistema de ventilación con 04 bocas de alimentación de aire, siendo ineficiente e insuficiente este sistema de alimentación de aire. Para esta quema se ha utilizado un sistema de ventilación de 3 HP con 3600 rpm, el sistema de ventilación tiene 12 bocas de salida para insuflar aire por cada una de ellas según sea el requerimiento de alimentación de combustible y aire, en ese sentido se ha diseñado un sistema de ductos principales de 6" de diámetro y 12 derivaciones de 3", 06 bocas de suministro de aire por cada lado; que se han dispuesto de la siguiente manera:

- 02 bocas de alimentación por el frente
- 01 boca de alimentación por la parte posterior que a su vez alimenta aire para el encendido de la chimenea.
- 01 boca de alimentación por la parte posterior
- 08 bocas de alimentación por los laterales del horno – 04 por lado.

Cada una de las alimentaciones de 03" tienen un segmento de tubo plástico para darle flexibilidad, esto para poder orientar la flama dentro de cada una de las puertas de alimentación de combustible.

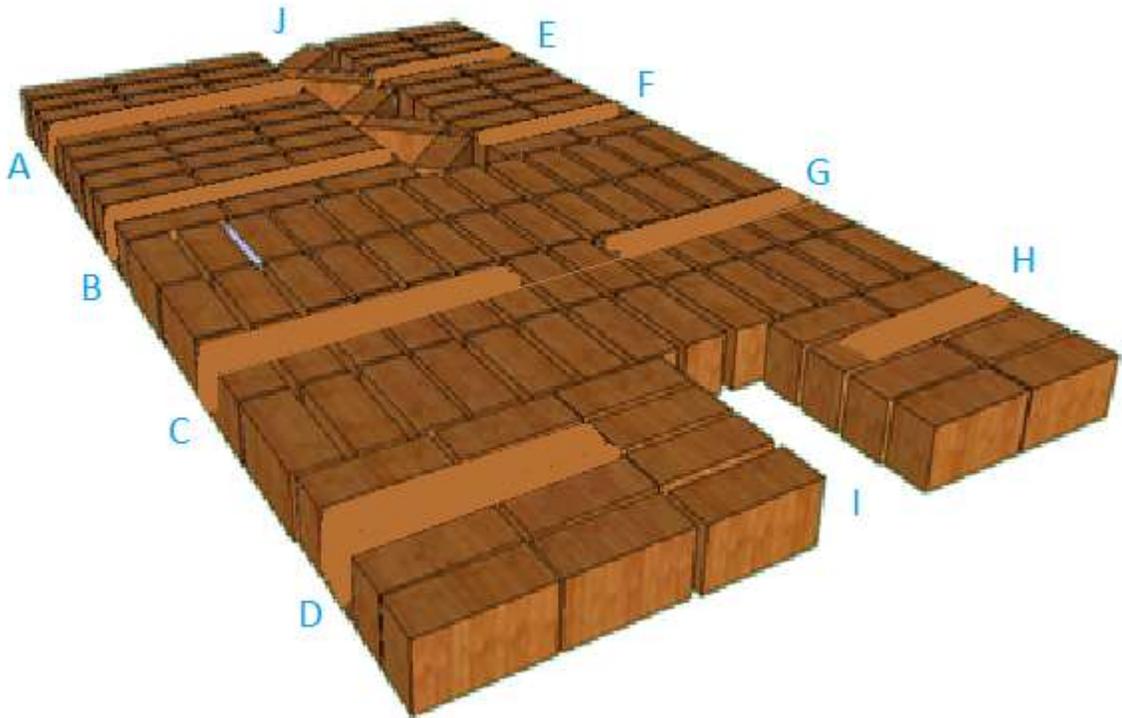
3. Cargado del horno

Los ladrillos han sido trasladados desde el lugar de la compra (aproximadamente 0.8 km de distancia por una trocha en pésimo estado de conservación) hasta el horno en 03 viajes, dañándose muchos de las piezas por la vibración producido por el viaje, esto ha originado el despostillado y agrietamiento de los mismos.

Se han alimentado 2700 bloqueros de 12x10x20 cm con un peso medio de 5.70 kg dispuestos de la siguiente manera:

Primera y segunda capas: La primera y segunda capas (ver Fig. 2) se ha planificado realizar para lograr que el calor se distribuya en forma homogénea, sobre todo en el segmento "IJ" que corresponde a la zona de evacuación de los gases de chimenea, los mismos que son los gases más fríos del horno, otro problema que se ha advertido de otras quemas es la zona DHI que fue la que no llegó a adquirir la temperatura homogénea del resto del horno.

Figura 2: Primera y segunda capas de carga de ladrillos



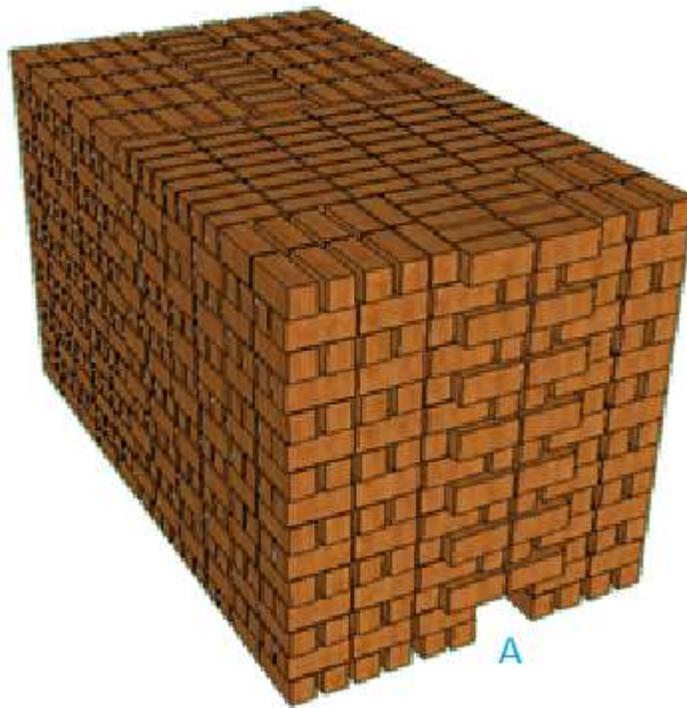
Para la presente quema se han tomado las siguientes acciones:

- Se han creado canales (sin ladrillos) a la altura de las puertas de alimentación de combustible (A, B, C, D, E, F, G y H), armándose corredores que conducen hacia el centro del horno.
- En la zona J, se ha realizado el armado de la manera mostrada en el esquema, con ladrillos formando zigzag para dar la posibilidad a los gases de combustión circulen con mayor libertad.
- En el eje formado entre los puntos IJ se han cargado los ladrillos de manera holgada, con separaciones en promedio de 2", para dar mayor posibilidad de flujo a los gases de combustión.

- Se ha creado una zona de quema, (zona "I") para alimentar combustible por esta zona y así lograr la cocción de los ladrillos (que en anteriores ocasiones no eran cocionados).

Tercera y más capas: Posterior a la segunda fila, se ha cerrado progresivamente el espaciamiento de los ladrillos, de 2" a menos de 1", dado que la mayor presión se da en la parte superior del horno, cayendo la misma a medida que bajan los gases a través de los ladrillos, esta es la razón por la que se toma esta determinación, además de ser una práctica usual entre los ladrilleros.

Figura 3: Armado de ladrillos en el horno



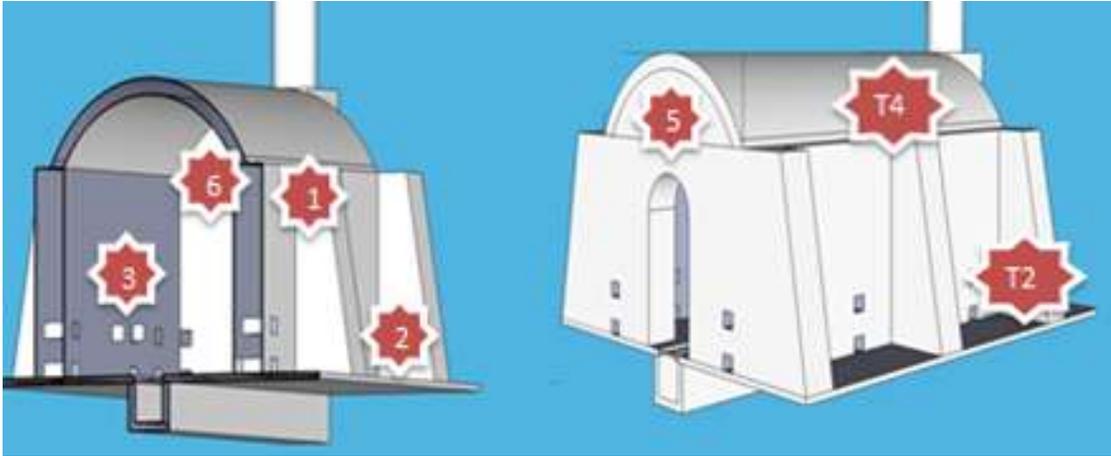
Los ladrillos se arman con los ductos de cada ladrillo, posicionados en forma vertical para permitir el flujo de los gases a través de los ladrillos en forma descendente, dado que los gases de combustión se concentran en la bóveda del horno, atravesando los ladrillos de arriba hacia abajo hasta concentrarse en el ducto de evacuación de gases que luego conducen a la chimenea. La zona denotada como A en la Fig. 3 forma parte del hogar de combustión para el mejor quemado de los ladrillos de esa parte del horno.

4. Quema

La quema se ha dado inicio a las 4:25 h del día viernes 23 de marzo, se han instalado 06 termocuplas en los lugares señalados en la Fig. 4, adicionalmente se han tomado lecturas de temperatura en la masa de cerámicos con un termómetro infrarrojo, adicionalmente se ha

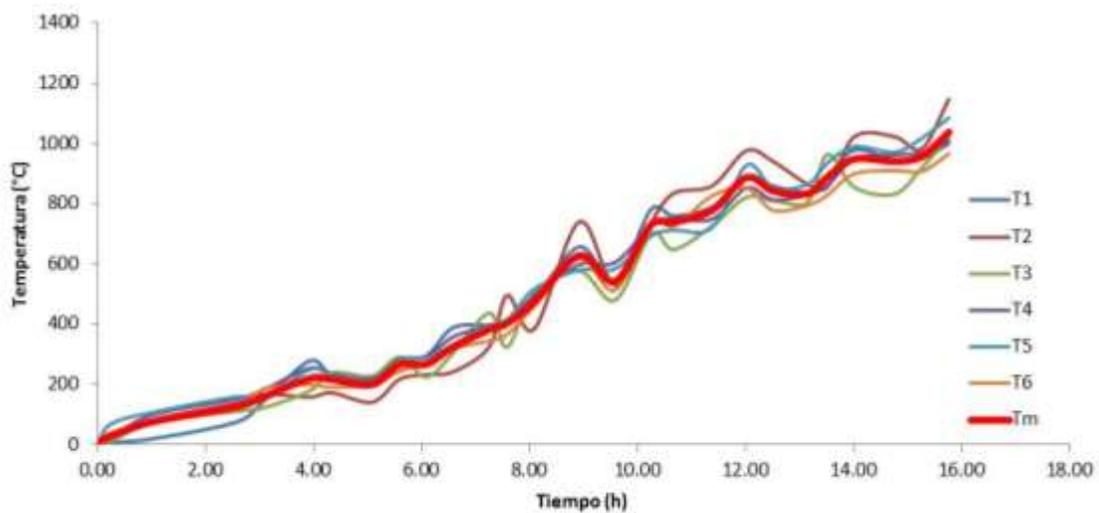
medido la temperatura en las paredes del horno, las lecturas han llegado hasta 30°C, mientras que en la bóveda llegó hasta 50°C.

Figura 4: Ubicación de las termocuplas



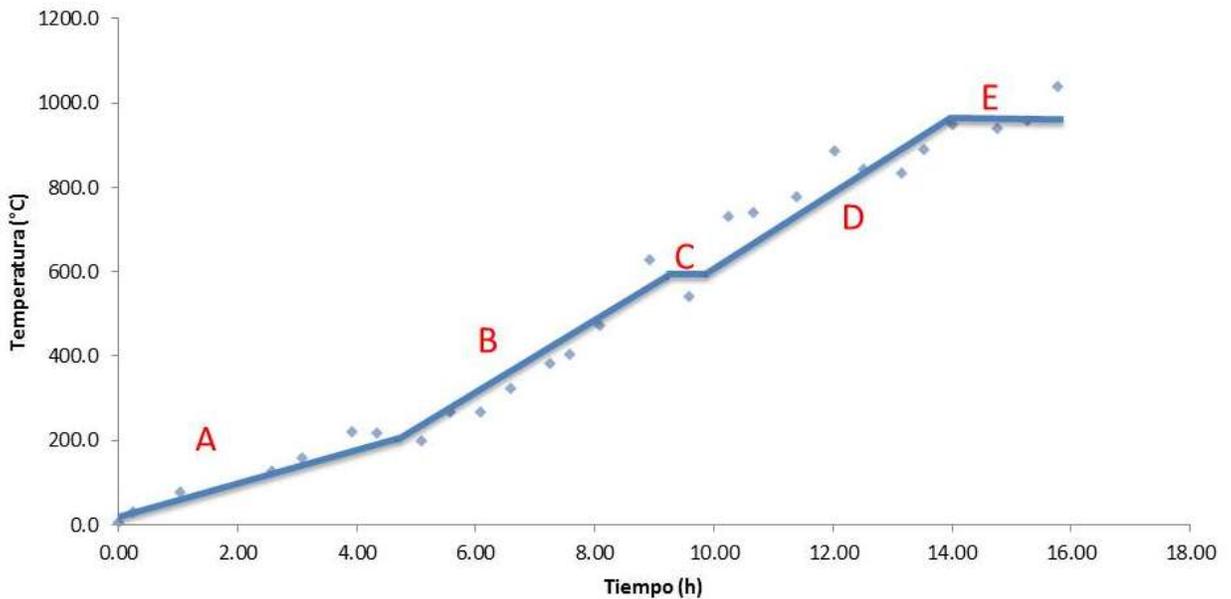
La Fig. 5 muestra la evolución de la temperatura en el horno, las 6 temperaturas se han promediado, la misma que se muestra en la figura, llegándose a una temperatura media en el horno de 1038.5°C, siendo necesarios 950°C para sinterizar la masa cerámica..

Figura 5: Perfil de temperaturas en el horno



Para un mejor análisis de la curva de quemado se toma únicamente la temperatura media mostrada en la Fig. 5 y se visualiza los diferentes puntos de esta curva en la Fig. 6.

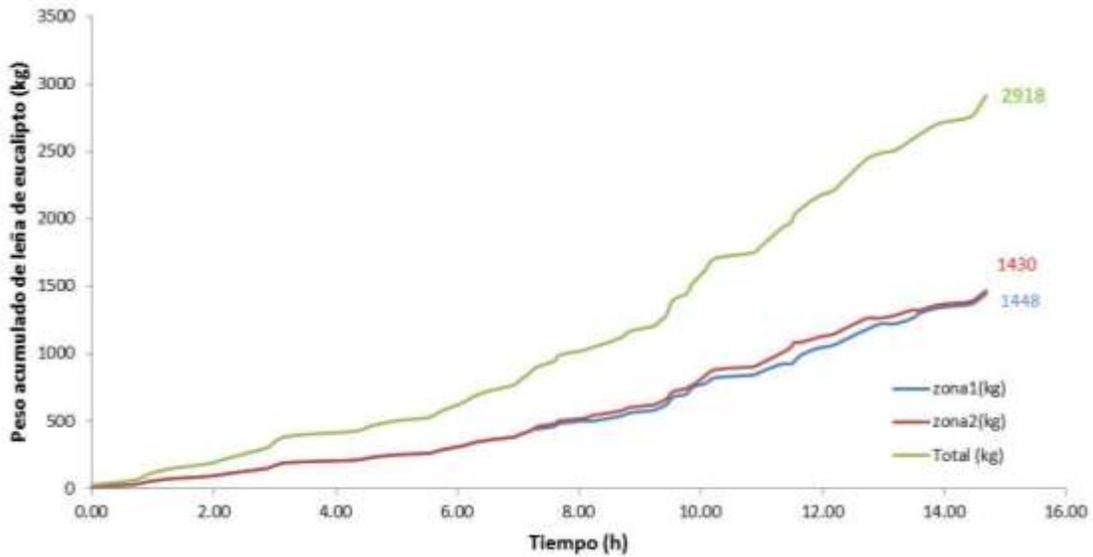
Figura 6: Comportamiento de la curva de cocción



Analizando la evolución del plan de quema preparado para la operación del horno la misma que describe la trayectoria que debe seguir un horno para cocer una pieza cerámica, se muestran cada una de las etapas seguidas. Así, en la zona A, se ha implementado la etapa de calentamiento donde se elimina el agua de mezcla de los ladrillos, esta etapa se ha llevado durante 5 horas, a temperatura por debajo de 200°C. Esta etapa de eliminación de agua debe hacerse en forma lenta para evitar la fractura o fisura en los ladrillos sometidos a cocción. Se ha controlado en los gases de chimenea la presencia de agua hasta agotamiento.

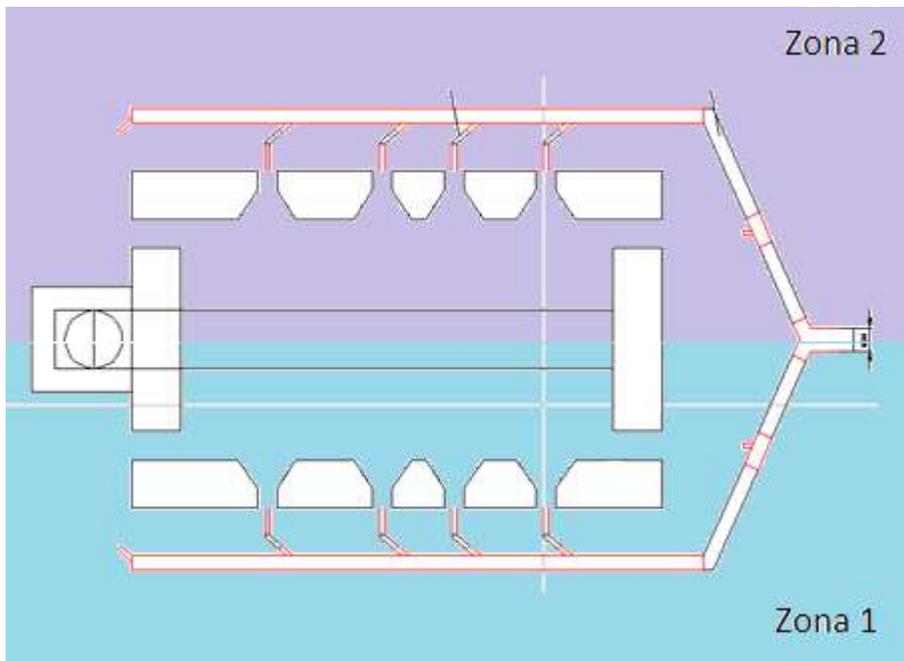
Después de haber eliminado la mayor parte de agua, se comienza la cocción de los ladrillos la misma que se muestra en la Fig. 6, zona B, en la que se lleva la temperatura desde los 200°C hasta 500 – 600°C esta etapa corresponde al cambio de la estructura cristalina del material cerámico, dado que por efecto de la temperatura, se genera una dilatación y se manifiesta con procesos de expansión, este es el caso de la dilatación isotrópica. Las transformaciones alotrópicas son propias de las fases cristalinas y pueden producir grandes perturbaciones en el material. Así, por ejemplo, el cuarzo (sílice) presenta una transformación $\alpha \leftrightarrow \beta$ a los 573 °C. Esta transformación va acompañada de una variación de volumen, para atenuar sus efectos el paso de esta temperatura se recomienda que sea gradual, si se realiza un cambio térmico rápido puede fisurar y/o fracturar la pieza del cerámico por esta razón se mantiene en este valor de temperatura por espacio de 30-40 min como muestra la zona C. A partir de esta zona, se ha calentado hasta la temperatura final que bordea los 1000°C (zona D) que ha durado 4 horas. A partir de la hora 14 del proceso de quema, se ha mantenido estable la temperatura en promedio de 1000°C por un espacio de 2 horas (zona D) para lograr sostener el proceso de sinterización del material cerámico, adicionalmente hacer que los bloques de ladrillos ubicados en la zona central inferior del horno puedan llegar a dicha temperatura de sinterización.

Figura 7: consumo de combustible del horno



La Fig. 7 muestra el consumo de combustible en el horno, para una mejor administración y seguimiento de las temperaturas se ha dividido en 02 zonas de alimentación de combustible, como muestra la Fig. 8.

Figura 8: Zonificación para control de uso de leña

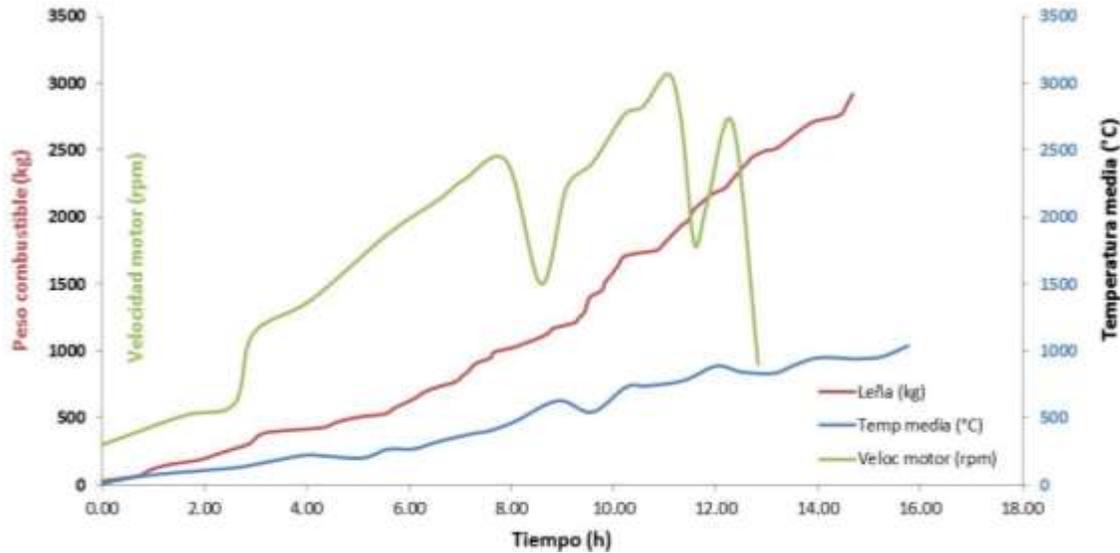


La zona 1 utilizó 1448 kg de combustible (leña de eucalipto) frente a los 1430 kg de la zona 2; cabe mencionar que en la zona 1 esta la boca de calentamiento de la chimenea (que en los primeros momentos del encendido del horno no genera tiro por que la temperatura de la

misma no es elevada, por esta razón se calienta desde la base de la chimenea) aunque la diferencia es de 18 kg que no es significativa.

Analizando la trayectoria de la curva de consumo total de leña es concordante con la curva de cocción de ladrillos (Fig. 6). La Fig. 7 muestra el consumo acumulativo de combustible.

Figura 9: Correlación entre temperatura, cantidad de combustible y velocidad de motor



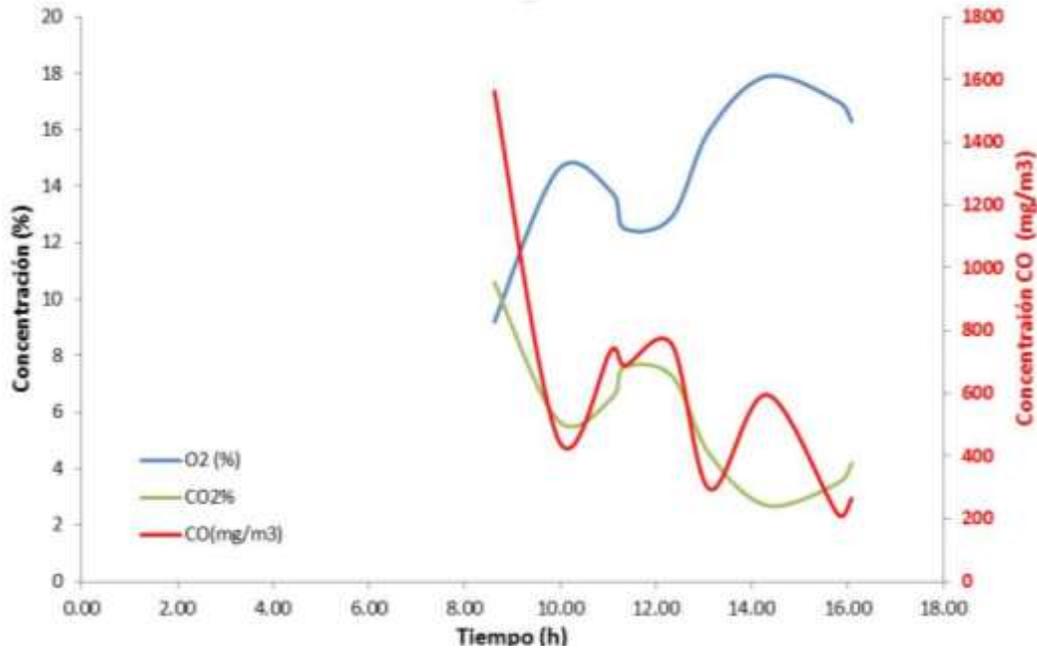
La Fig. 9 muestra la correlación que existe entre la cantidad de combustible, velocidad de giro del motor del ventilador y la temperatura lograda, se puede observar que a mayor cantidad de leña utilizado, mayor es la temperatura lograda y en forma indirecta se ve representada la cantidad de aire suministrado a través de la velocidad de giro del motor del ventilador, en determinados momentos se baja la velocidad del motor con el sistema de variación de frecuencia del motor para regular la cantidad de aire que ingresa al horno; esto es, se hicieron mediciones de los gases de chimenea, observando los valores de emisiones y temperatura, se tomaba la determinación de regular o sostener la alimentación de aire y combustible. El sistema de distribución de aire (Fig. 1) y la regulación del variador de frecuencia permitieron sintonizar de mejor manera al horno, haciéndolo versátil cuando se deseaba modificar las condiciones de operación.

Para realizar las mediciones de velocidad y concentración de gases se ha hecho un agujero a 2.50 cm de altura aguas arriba de la perturbación más próxima (cambio de sección rectangular a circular de la chimenea), siendo el diámetro de la chimenea de 0.60 m. según el procedimiento de medición de la EPA, recomienda hacer mediciones de velocidad (cargas de presión positiva y negativa en la chimenea), de la tabla 1 se aprecia las distancias a las que se han tomado dichos datos con un tubo pitot tipo "S".

Tabla 1: Ubicación de los puntos de medición de velocidad en chimenea circular (D=60 cm)

Punto de muestreo	Porcentaje de diámetro (%)	Ubicación de Puntos de muestreo (cm)
1	3.2	1.9
2	10.5	6.3
3	19.4	11.6
4	32.3	19.4
5	67.7	40.6
6	80.6	48.4
7	89.5	53.7
8	96.8	58.1

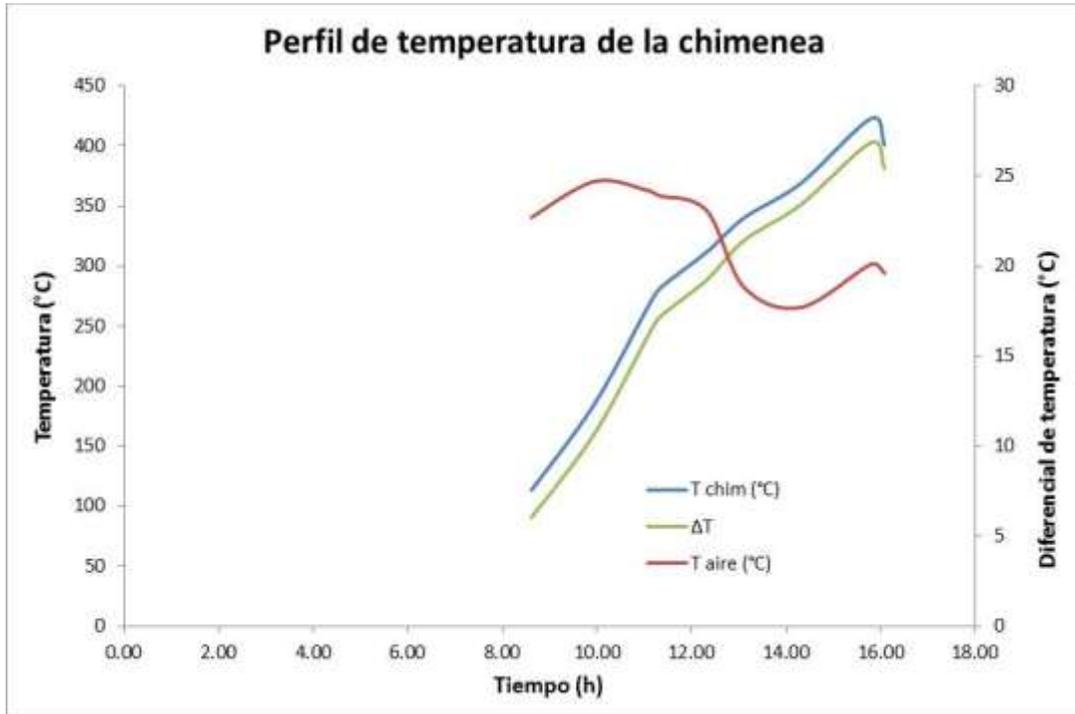
Figura 10: Concentración de gases de chimenea



Las mediciones de los gases de combustión se realizaron después del periodo de secado de los ladrillos (zonas B, C, D y E de la Fig. 6), en los primeros momentos de la quema estaba a las 8.56 hs se tenía una emisión 1563 mg/m³ de CO, valor por encima de la propuesta de norma de LMP para emisiones del sector ladrillero, tomándose los correctivos necesarios (regulación de la cantidad de aire insuflado al horno) para luego mantenerse por debajo de 800 mg/m³ de CO. Una forma de controlar este hecho fue por observación directa a los gases evacuados a través de la chimenea; cuando los valores de emisiones gaseosas eran elevados, el humo de la chimenea era perceptible (por presencia de material particulado), por el contrario, cuando los valores de emisiones eran bajos, no se advertían humos en la chimenea. De la figura, se puede apreciar que los valores de oxígeno consumido que eran medidos en la chimenea son inversos a las emisiones de CO y CO₂, mostrando el mayor aprovechamiento del combustible

y comburente (oxígeno). La relación de cantidad entre CO y CO₂ es bastante significativa por cuanto hay mayor cantidad de CO₂ dado en términos de porcentaje referido al CO (dado en mg/m³) lo que es deseable.

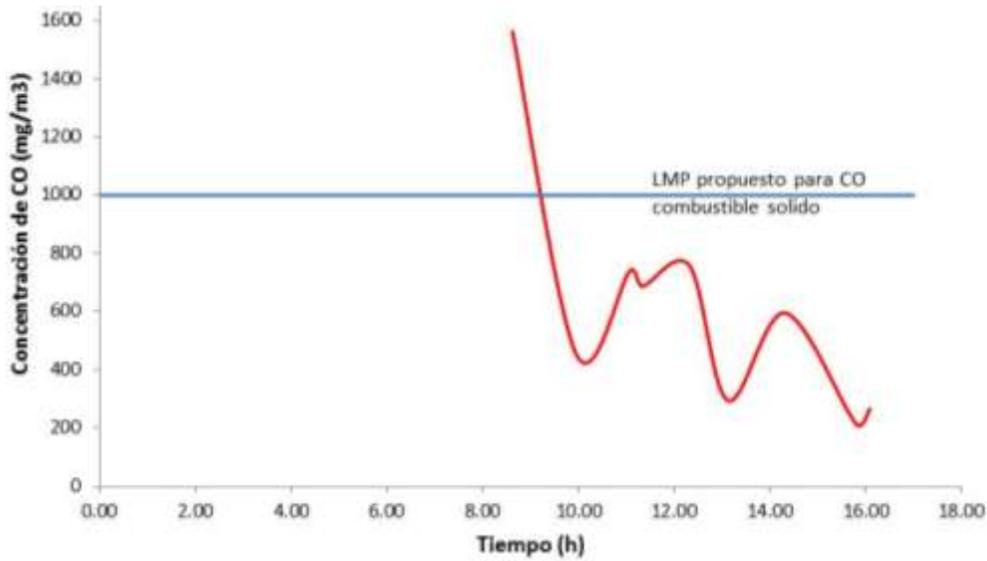
Figura 11: Perfil de temperatura de la chimenea



En la Fig. 11 se muestra que la temperatura ambiental osciló desde 17.7°C hasta 24.7°C a lo largo del periodo de quema (no del periodo de calentamiento que estuvo a 7°C en la madrugada), una de las acciones tomadas es el tema de la apertura de la chapaleta de la chimenea, durante todo el periodo de calentamiento estuvo abierta al 100%, durante el periodo de quema se mantuvo entre 75% a 100%, porque en determinados momentos retornaba el fuego por la bocas de alimentación de combustible, razón por la cual se mantuvo por mucho mayor tiempo al 100% de apertura.

A mayor ΔT , mejor y más tiro ejerce la chimenea.

Figura 12: Concentración de CO en gases de chimenea



De la Fig. 12, las primeras horas de operación del horno corresponden a la eliminación de agua, etapa en la cual no se ha medido los gases de emisiones, cerca de las 9 horas de operación se comienza a medir el CO en los gases de chimenea y se regula la admisión de aire lográndose estar por debajo de la propuesta de normativa referente a las emisiones de CO para combustibles sólidos de la norma en proceso de Consulta Pública para los Límites Máximos Permisibles – LMP propuestos por el Ministerio del Ambiente -MINAM.

Tabla 2: Emisiones de la chimenea

t (h)	P _{estática} (mmH ₂ O)	O ₂ (%)	CO (%)	CO ₂ (%)	PM _{seco} (g/mol)	ΔP _{abs} (mm Hg)	T _{chimenea} (°C)
9.8	1.27	14.6	0.0016	5.7	29.50	513.10	185.2
11.3	1.59	12.5	0.0025	7.6	29.72	513.13	281.4
12.1	1.52	12.9	0.0027	7.3	29.68	513.12	311.4
13.4	1.39	16.0	0.0011	4.5	29.36	513.11	340.2
14.6	1.33	17.9	0.0021	2.7	29.15	513.10	369.0

La Tabla 2 muestra los valores de concentración de O₂, CO y CO₂, el cálculo del peso molecular de los gases de combustión asumiendo base seca (PM_{seco}) tomados para una presión barométrica de 513 mmHg.

Tabla 3: Velocidad y caudal de gases de chimenea

Clasificación de zona (Fig. 6)	Tiempo (h)	V _s (m/s)	Q _s (m ³ /s)
B	9.8	6.48	1.83
	11.3	8.93	2.52
D	12.1	8.72	2.47
	13.4	8.23	2.33
	14.6	8.12	2.30

Los valores calculados a través del método de medición de gases de chimeneas planteado por la EPA, muestran los valores de la tabla 3, para la zona B de la Fig. 6 se tienen valores de velocidad de 6.5 m/s equivalentes a 1.8 m³/s de gases de combustión, aumentando el régimen de emisiones en la zona D de la Fig. 6 a un promedio de 2.5 m³/s de flujo de gases de combustión.

Para verificar los valores calculados en la Tabla 3, se hacen cálculos a través del nomograma dado por la Dwyer Instruments, INC. (FR# 72-440778-00 Rev. 5), donde no es tan grande el cambio entre las zonas B y D.

Los valores calculados y leídos del nomograma tienen una diferencia media de 24.3%, manteniendo las zonas B y D.

Tabla 4: Calculo de velocidad por nomograma

Tiempo (h)	P (plg H ₂ O)	T _{chimenea} (°F)	V (pie/min)	V (m/s)	Q _s (m ³ /s)
9.8	0.052	365	1000	5.08	1.44
11.3	0.065	539	1300	6.60	1.87
12.1	0.062	593	1250	6.35	1.80
13.4	0.056	644	1220	6.20	1.75
14.6	0.054	696	1250	6.35	1.80

El resumen de las Tablas 3 y 4 se dan en la Fig. 13, siendo el sub índice 1 para los valores calculados y el sub índice 2 los valores leídos a través del nomograma.

Figura 13: Velocidad y caudal de los gases de chimenea

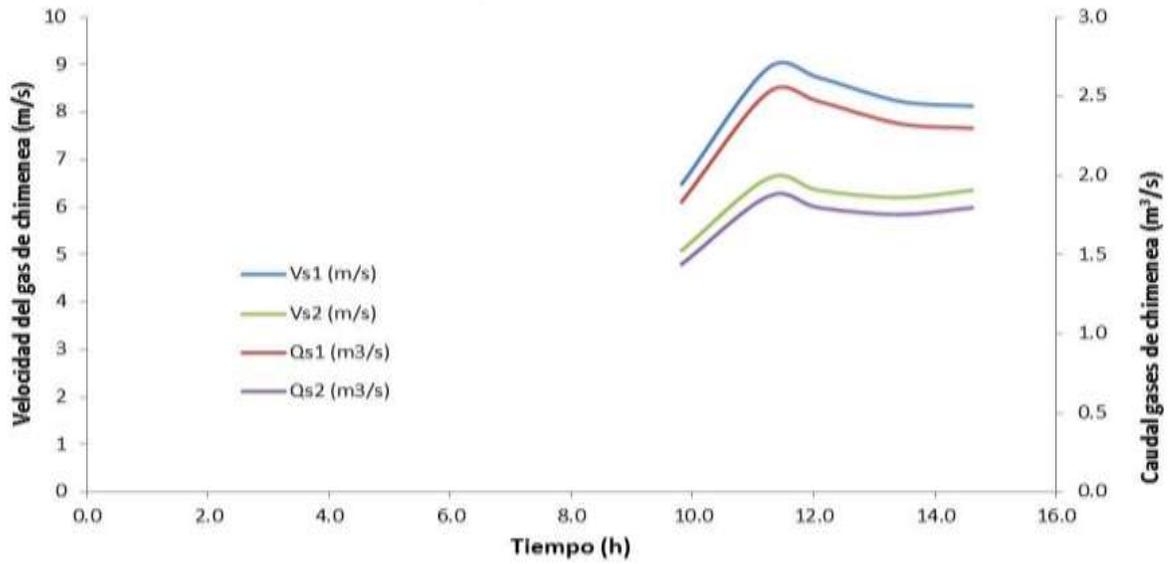


Figura 14: Emisiones habituales del sector ladrillero



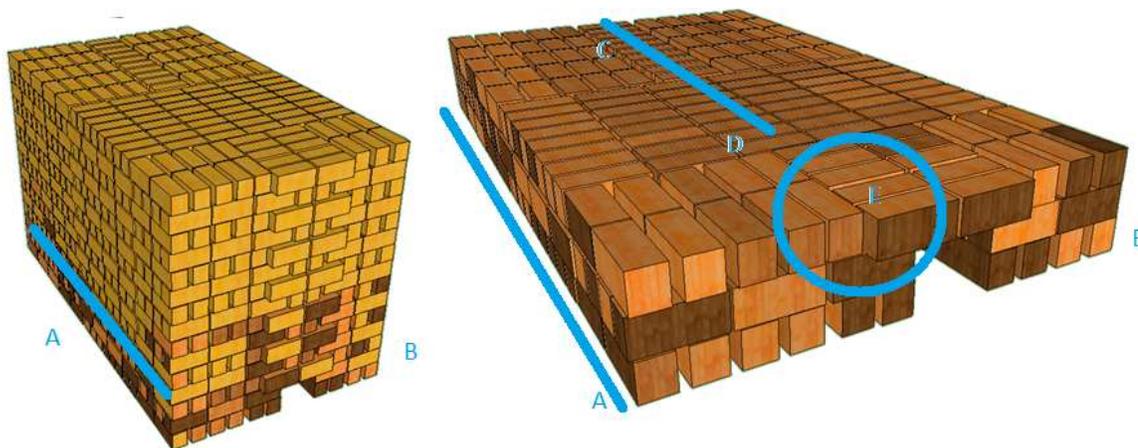
Figura 15: Emisiones del "horno mejorado"



5. Resultados de la quema

La Fig. 16 muestra el resultado de la quema realizada, los ladrillos que estaban en la base (primera y segunda capas) y cercanos a las puertas de alimentación de combustible (zonas A y B), se han fisurado y tomado coloración negra por el choque directo con el fuego, por lo que se recomienda colocar ladrillos cocidos en esta zona.

Figura 16: Ladrillos quemados



Por otro lado en la zona demarcada por la línea CD de la primera y segunda capas, también no han llegado a la temperatura de cocción, clasificándose como crudos, esto ha ocurrido porque los gases que vienen de la parte superior del horno por el flujo en tiro inverso ha ido cediendo su energía y llega a este punto con poca cantidad de energía; por otro lado los canales diseñados para esta zona deben ser más anchos para que llegue el calor desde las puertas de alimentación de combustible (A, B, C, E, F y G de la Fig. 2) tengan mayor área, recomendándose abrir más los canales y el espaciado entre ladrillos.

Por el contrario a las anteriores experiencias, la zona demarcada con E, se han cocido satisfactoriamente y por estar directamente expuestos al fuego los ladrillos tienen una coloración negra.

El resto de ladrillos ha sido bien cocionado.

6. Enfriamiento y apertura del horno

La apertura de los tapones de la bóveda del horno se hizo a las 24 hs de concluida la quema, posteriormente se han abierto las bocas de alimentación de combustible y chapaleta de la chimenea a las 72 h (porque se tuvo un fin de semana en el que no se ha trabajado). Se ha observado que abierta la chapaleta y las bocas de alimentación de combustible la chimenea ejerce tiro y admite la entrada de aire fresco al horno, pudiéndose regular la velocidad de entrada de aire manipulando dicha chapaleta.

7. Consumo energético

El poder calorífico superior es de 15.87 mmBTU/ton madera con 12% de humedad (Wood and wood waste), el factor de emisión de dióxido de carbono es de 393.37 kg CO₂/ton combustible, con estos valores se han calculado las emisiones y el rendimiento del horno.

Tabla 5: Resumen de parámetros medidos en el horno

Parámetro	Valor	Unidades
Cantidad ladrillos	2700	unidades
Peso ladrillos	5.7	Kg/unidad
Cantidad combustible	2918	kg leña eucalipto
Humedad ladrillo	8.5	%
Calcita (CaCO ₂), presente en arcilla	7.5	%
Masa de ladrillo crudo	15390	kg
Masa de agua ladrillo	1308	kg
Masa de agua de humedad del combustible (15% Hu)	438	kg
Poder calorífico superior	15.38	mmBTU/ton leña
Energía usada en quema	47318	MJ
Uso de combustible	3.07	MJ/kg cerámico
Masa de CO ₂ emitido por combustión	1148.9	kg CO ₂ totales emitidos por el horno
Masa CO ₂ emitido por ladrillo	577.1	kg totales formados por cocción arcilla

La calcita presente en la arcilla típica del sector de San Jerónimo, por efecto de la temperatura se descompone produciendo CO₂ por esta conversión térmica se da entre 800 a 850°C, por este proceso se generarían 577 kg de CO₂ en el proceso de quema desprendida en la zona “D” de la Fig. 6.

La masa de ladrillo crudo total introducida al horno es de 15.39 TM, de la cual se tiene 1.3 TM de agua ligada que ha debido ser eliminada en la etapa de calentamiento (Zona A de la Fig. 6), más el agua desprendida de la masa de combustible es de 0.44 TM y el agua formada en el proceso de combustión formado por el hidrógeno del combustible, ambos liberados durante todo el proceso de quema en el horno.

Comparando con los valores listados en el Anexo 1, el horno tuvo un uso de energía de 3.1 MJ/kg de cerámico, valor dado para hornos intermitentes. Este valor puede reducirse por efecto de un mejor control de los gases de combustión con un mayor periodo de retención dentro del horno manejando la chapaleta de la chimenea.

8. Conclusiones:

1. El traslado de los ladrillos crudos ha rajado y despostillado muchas de las piezas, debe procurarse que los traslados sean menos complejos y en distancias lo más cortas posibles de no mejorar el sistema de transporte.
2. Se ha dispuesto el trabajo de 02 personas para el quemado, para poder controlar la evolución de la quema y un tercer peón que pesaba el combustible para llevar el control de la quema en el horno. En esta quema se ha evidenciado que solo una persona puede controlar la quema y un asistente que le abastezca de combustible.
3. El tiempo de quema es equivalente al actualmente utilizado por los ladrilleros que utilizan ventilador.
4. Se operó el horno con el 100% apertura chapaleta de chimenea, pudo haberse cerrado más y retener por más tiempo los gases de combustión, esto pudo haber reducido el consumo de combustible y bajar la cantidad de aire suministrado.
5. Más personal para realizar mediciones de gases de combustión en intervalos de tiempo menores lo que permitiría tener mejor panorama del proceso de quema.
6. Colocar ladrillos cocidos en la zona donde hay exposición directa del fuego para evitar daños al material.

Anexos

Table 1. Comparison of Kilns: Energy Use

Type of kiln	Specific Energy Consumption (MJ/kg of fired brick)	Specific coal consumption* (tons/100,000 bricks)
Continuous Kilns		
VSBK (India, Nepal, Vietnam)	0.7-1.0	11-16
Fixed chimney BTK** (India)	1.1-1.5	17.5-24
Moveable chimney BTK** (India)	1.2-1.75	19-28
Tunnel kiln (Nam Dinh, Vietnam)	1.4-1.6	22-25
Modern tunnel kiln (Germany)	1.1-2.5	17.5-40
Intermittent kilns		
Clamp and other batch kilns (Asia)	2.0-4.5	32-71

* Specific coal consumption corresponds to gross calorific value of coal as 18.8 MJ/kg (4500 kcal/kg) and for a fired brick weight of 3 kg

** discussed later in detail, the BTK is the continuous Bull's Trench Kiln

Fuente: Heierli, Urs. Maithel, Sameer and Fust, Walter. BRICK BY BRICK: THE HERCULEAN TASK OF CLEANING UP THE ASIAN BRICK INDUSTRY.