



**Universidad  
de Holguín**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

# DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE COQUE CON INSUFLADO DE BIOGÁS DURANTE LA FUSIÓN DE HIERRO EN CUBILOTE

Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero  
Mecánico.

**ROLBERT MORA ÁVILA**

**HOLGUÍN**

Curso 2022





**Universidad  
de Holguín**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

# DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE COQUE CON INSUFLADO DE BIOGÁS DURANTE LA FUSIÓN DE HIERRO EN CUBILOTE

Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero  
Mecánico.

**Autor: ROLBERT MORA ÁVILA**

**Tutor: Dr. C. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo  
M. Sc. Julio Cesar Borrero Neninger**

**HOLGUÍN**

Curso 2022



## Resumen

La presente investigación realizada en la Empresa “Fundición de Acero - Hierro de Holguín” (HOLMECA), se tiene en cuenta la necesidad de ahorro del carbón coque bajo determinadas situaciones del taller de fundiciones. Se realiza un estudio de los antecedentes y el estado actual en la producción en Horno de Cubilote, se muestra en detalles todas las características que dispone la metodología para el cálculo de las medidas tecnológicas en la producción del Hierro Gris, además se expone la instrucción tecnológica a seguir para la inyección de Biogás durante la fusión, con lo cual se disminuye el consumo de Coque favoreciendo una producción de Hierro Gris de manera más competitiva y sustentable.

**Palabras clave:** Biogás, coque, ahorro, inyección

## **Abstract**

The present research carried out in the Company "Fundición de Acero - Hierro de Holguín" (HOLMECA), takes into account the need to save coking coal under certain situations of the foundry workshop. A study of the background and the current state in the production in Cubilote Furnace is carried out, all the characteristics available in the methodology for the calculation of the technological measures in the production of Gray Iron are shown in detail, in addition the technological instruction to be followed for the injection of Biogas during the fusion is exposed, which reduces the consumption of Coke favoring a production of Grey Iron in a more competitive and sustainable way.

**Keywords:** Biogas, coke, saving, injection

## Índice

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1. Hornos de cubilote para la obtención de hierro	7
1. Hornos de cubilote.	7
1.1. Análisis y evolución de su marco conceptual	7
1.2. Horno de cubilote gaseoso	10
1.3. Enriquecimiento al horno de Cubilote	11
1.3.1. El enriquecimiento con Oxígeno.	12
1.3.2. Enriquecimiento suplementario	12
1.3.3. Enriquecimiento Equivalente	12
1.4. Biogás. Características y usos	13
1.4.1 Usos del Biogás	13
1.4.2. Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad.	14
1.5. Características de los combustibles	14
1.5.1 Características principales de los combustibles más usados en fundición.	17
Capítulo 2. Tecnología alternativa de fusión en Horno de Cubilote	19
2. Análisis de la tecnología del horno de Cubilote del taller de fundiciones de (HOLMECA).	19
2.1. Estructura Metálica del Cubilote.	19
2.2 Tecnología alternativa de inyección de biogás en la fusión para cubilote.	31
2.2.1. Cantidad de Coque necesario por carga.	37
2.2.2. Cantidad de Carga Metálica por Carga	38
2.2.3. Fundente	38
2.2.4. Cantidad de Aire	39
2.2.5. Altura de la Cama de Coque	39
2.3. Valoración Técnico - Tecnológica	40
2.4. Valoración Económica.	41
2.5. Valoración para la defensa.	42
2.6. Valoración medioambiental.	42
CONCLUSIONES.	43
RECOMENDACIONES.	44
BIBLIOGRAFÍA	45



## INTRODUCCIÓN

El redimensionamiento del MINAZ, la no terminación de la Central Átomo eléctrica de Jaragua en Cienfuegos, que estaba proyectada para satisfacer toda la demanda energética de la industria metalúrgica cubana, provocaron que la industria metalmeccánica cubana que en lo fundamental estaba diseñada para abastecer de piezas de repuestos y agregados a la industria azucarera, fueran consideradas no factible, por la disminución sensible del mercado y la alta demanda de energía eléctrica para los agregados de fusión.

En el caso específico de la Empresa Mecánica de Holguín con nombre comercial "HOLMECA" esta afectación del mercado disminuyó de 11 000 ton/año de capacidad productiva, a una demanda de 350 ton/año de fundición de aleaciones ferrosas, esto trajo como consecuencia que tuviera que sufrir un redimensionamiento tecnológico, dirigido fundamentalmente a la zona de fusión y moldeo por ser las más consumidoras de portadores energéticos y se sustituyeran los fusores eléctricos que consumían 2,75 MW/ton, por un horno de cubilote para la fusión de hierro. Buscando la competitividad debido a que la construcción de este horno es simple, de operación económica y funde hierro continuamente con un mínimo de mantenimiento. De vez en cuando el metal se funde con el combustible, algunos elementos se aprovechan mientras otros se pierden.

El cubilote es un horno que funciona con combustible sólido y en el cual la carga metálica, el combustible y el carburante están en íntimo contacto entre sí. Esto permite un intercambio térmico directo y activo, y por lo tanto, un rendimiento elevado. Sin embargo, por causa de este mismo contacto entre el metal, las cenizas y el oxígeno, el hierro colado producido no puede ser rigurosamente controlado desde el punto de vista metalúrgico.

El coque que se emplea como combustible para la fusión en los cubilotes, se importa de Colombia y Europa en cantidades insuficientes para satisfacer las demandas industriales por lo que se ha hecho necesario implementar tecnologías que ahorren el consumo de portadores energéticos durante la explotación de la industria metalúrgica.

La taller de fundiciones de HOLMECA, es una de las entidades que ha incorporado a su entorno tecnológico alternativas para el ahorro de portadores energéticos, la misma está ubicada en la carretera a San Germán Km 3 ½, Holguín, fue fundada en julio de 1980 y redimensionada en el año 2003 y consta de dos talleres fundamentales para su producción.

El taller de producciones ferrosas con un horno de cuba alta discontinuo de 700 mm de diámetro interior. La capacidad calculada del mencionado taller es de 360 toneladas al año. Se producen piezas principalmente para la Industria Mecánica, el MINAZ, el MINTUR, el MINDUS, entre otras. El moldeo se realiza en cajas metálicas de dimensiones 1000 mm x 800 mm x 300 mm y 630 mm x 500 mm x 250 mm y se utilizan mezclas en verde. En la actualidad, la carga para la producción del hierro fundido gris presenta la siguiente composición: 70% de chatarra de hierro y 30 % de retorno.

El taller de fundiciones no ferrosa en su entorno tecnológico cuenta con: horno de crisol para la fusión de bronce, horno Wilkinson para la fusión de cuproaleaciones, horno tambor para la fusión de aleaciones de aluminio y se moldea con pisones neumáticos y mezclas en verde. La empresa tiene un taller auxiliar de herramental para la construcción de los modelos, accesorios, dispositivos y mantenimiento necesario para la ejecución de la producción.

El coque es comercializado en Cuba por la Empresa ACINOX Comercial perteneciente al SIME y obtiene este producto, del desecho de coque que queda luego de ser clasificado para la industria niquelífera por no cumplir con las

dimensiones tecnológicas, esta cantidad comercializada es insuficiente y provoca paros de producción frecuentes en las Empresas que emplean el coque como combustible en sus procesos tecnológicos.

Estas particularidades de nuestra industria han provocado el surgimiento de un **problema**, la necesidad de disminuir el consumo de coque en la fusión de hierro en hornos de cubilote, bajo las condiciones actuales en la Industria Sideromecánica Cubana.

Por ese motivo surge como **objeto de estudio**, el consumo de coque durante la fusión en hornos de cubilote y como **campo de acción** Inyección de biogás.

La investigación plantea como **hipótesis** que, si se utiliza la inyección de BIOGÁS durante la fusión, se disminuye el consumo de coque de manera más competitiva.

A partir de la hipótesis, se plantea como **objetivo general** de la investigación disminuir el consumo de coque inyectando BIOGÁS en la fusión de hierro en el horno de cubilote del taller de fundiciones de HOLMECA

Como **objetivos específicos** de la investigación se plantean:

- Evaluar los tipos de hornos de cubilotes clasificados por el tipo de combustible utilizado en la producción de hierro.
- Establecer una variante tecnológica que disminuya el consumo de coque inyectando BIOGÁS durante la fusión de hierro en el horno de cubilote de la EFAH, con una alta productividad y competitividad.

### **Tareas de investigación.**

1. Revisión bibliográfica, consultar los documentos técnico tecnológicos de la Entidad e intercambio con expertos



2. Determinar la factibilidad del uso del BIOGÁS para ser inyectado durante la conducción de la colada en hornos de cubilote, que responda a las normas internacionales que rigen esta producción en el mundo.
3. Establecer una instrucción tecnológica que garantice la aplicación de la tecnología, de manera confiable, estable y eficiente.

Los **beneficios esperados** de la investigación se expresan en el establecimiento de una tecnología que permita la disminución del consumo de coque inyectando *biogás*, en la obtención de hierro con la composición química y propiedades mecánicas que establecen las normas que rigen este tipo de producción, adecuado a las condiciones actuales de la industria en Cuba, garantizando de esta forma el aumento de la productividad y competitividad de estas producciones.

Los métodos científicos cumplen una función fundamental en el desarrollo de la ciencia, ya que permiten obtener nuevos conocimientos sobre el fenómeno que se estudia y ejercen un papel importante en la construcción y desarrollo de la teoría científica.

En las ciencias se aplican una variedad de métodos teóricos, dentro de ellos están: el método de análisis y la síntesis, el hipotético-deductivo, el análisis histórico y el lógico, el de tránsito de lo abstracto a lo concreto, la modelación y el enfoque de sistema. Cada uno cumple funciones gnoseológicas determinadas, por lo que en el proceso de realización de una investigación científica se complementan entre sí. A continuación se exponen los **métodos** fundamentales utilizados en la investigación:

- **Método Empírico:** Se realiza en la consulta con expertos y revisión de la documentación tecnológica del taller de fundiciones de HOLMECA.
- **Método histórico-lógico:** Este se aplica para establecer el estado del arte del tema de investigación, como marco teórico referencial, permitiendo

conocer que se ha investigado sobre el tema objeto de estudio y que leyes o aspectos generales se abordan en el fenómeno que se estudia.

- **Método de inducción-deducción:** A partir del estudio de diferentes casos particulares se llega establecer aspectos que son generales y leyes empíricas, que constituyen puntos de partida para inferir o confirmar formulaciones teóricas, de las cuales se deducen nuevas conclusiones lógicas que son sometidas a prueba de acuerdo con las generalizaciones empíricas. Se aplicará para la evaluación de los diferentes criterios que intervienen en la tecnología para la fusión de hierro en cubilote disminuyendo el consumo de coque inyectando biogás.
- **Método de análisis y síntesis:** Se utiliza para identificar los factores principales y sus características que influyen en el fenómeno que se estudia, así como su interrelación. Se aplica para identificar las etapas que intervienen en la tecnología para la fusión de hierro en cubilote disminuyendo el consumo de coque inyectando biogás.
- **Método computacional:** Se utiliza durante la concepción y desarrollo de la aplicación informática para asistir en el cálculo de los parámetros que intervienen en la tecnología para la fusión de hierro en cubilote disminuyendo el consumo de coque inyectando gas.

La investigación identifica como **aportes:**

- Establecer una tecnología que permita el ahorro de coque en la obtención del hierro, bajo las condiciones cubanas, que permita salir al mercado con un producto más competitivo, sostenible y sustentable.
- Establecer una tecnología de fusión de hierro en hornos de cubilote disminuyendo el consumo de coque inyectando biogás, bajo las condiciones específicas del taller de fundiciones de HOLMECA de una manera competitiva, sostenible y sustentable.

**El informe de tesis se estructura en la siguiente forma:**

Introducción.

**Capítulo 1. Características de los Hornos de Cubilote para la obtención de hierro.** En este capítulo se realiza un estudio de los antecedentes y el estado actual de los hornos de cubilotes, la utilización del biogás en los procesos de fundición.

**Capítulo 2. Tecnología alternativa de fusión en Horno de Cubilote.** En este capítulo se expone en detalles todos los elementos que componen la metodología para el cálculo de los parámetros para la obtención de hierro en hornos de cubilote disminuyendo el consumo de coque y se realiza una valoración socio económica, con un análisis del costo y consumo de coque aplicando la tecnología tradicional comparándola con el costo y consumo de coque aplicando la tecnología alternativa de fusión.

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

## Capítulo 1. Hornos de cubilote para la obtención de hierro

### 1. Hornos de cubilote.

#### 1. 1.1. Análisis y evolución de su marco conceptual

Los hornos fueron utilizados desde los tiempos prehistóricos. Existen sobre su origen narraciones fabulosas, de las cuales la más popular es el mito de Prometeo, quien con el uso del fuego había enseñado a la humanidad la práctica de la metalurgia. Generalmente se admite que los primeros hornos fueron destinados a cocer pan, pero desde épocas remotas se usaron también para la cocción de objetos de barro, así como para licuar determinados metales y sus aleaciones (oro, plata, plomo, cobre y zinc).

Los colados de hierro, se hacen volviendo a fundir chatarra junto con arrabio, en un horno llamado cubilote. La construcción de este horno es simple, de operación económica y funde hierro continuamente con un mínimo de mantenimiento. De vez en cuando el metal se funde con el combustible, algunos elementos se aprovechan mientras otros se pierden.

El cubilote es un horno que funciona con combustible sólido y en el cual la carga metálica, el combustible y el carburante están en íntimo contacto entre sí. Esto permite un intercambio térmico directo y activo, y por lo tanto, un rendimiento elevado. Sin embargo, por causa de este mismo contacto entre el metal, las cenizas y el oxígeno, el hierro colado producido no puede ser rigurosamente controlado desde el punto de vista metalúrgico. [Abramov, 1983]

El cubilote consiste en un tubo de acero vertical con una altura de 10 m aproximadamente y un diámetro que varía entre los 4 m y 6 m, recubierto con material refractario: los ladrillos refractarios, tienen la disposición necesaria para introducir una corriente de aire cerca del fondo, tal y como se muestra en la figura 1.1.

Todo el cubilote descansa sobre una placa circular que es soportada arriba del piso mediante cuatro columnas separadas convenientemente para que las puertas abisagradas puedan caer libremente. Estando en operación, estas puertas giran hasta una posición horizontal y se mantienen en su lugar por medio de una estaca vertical.

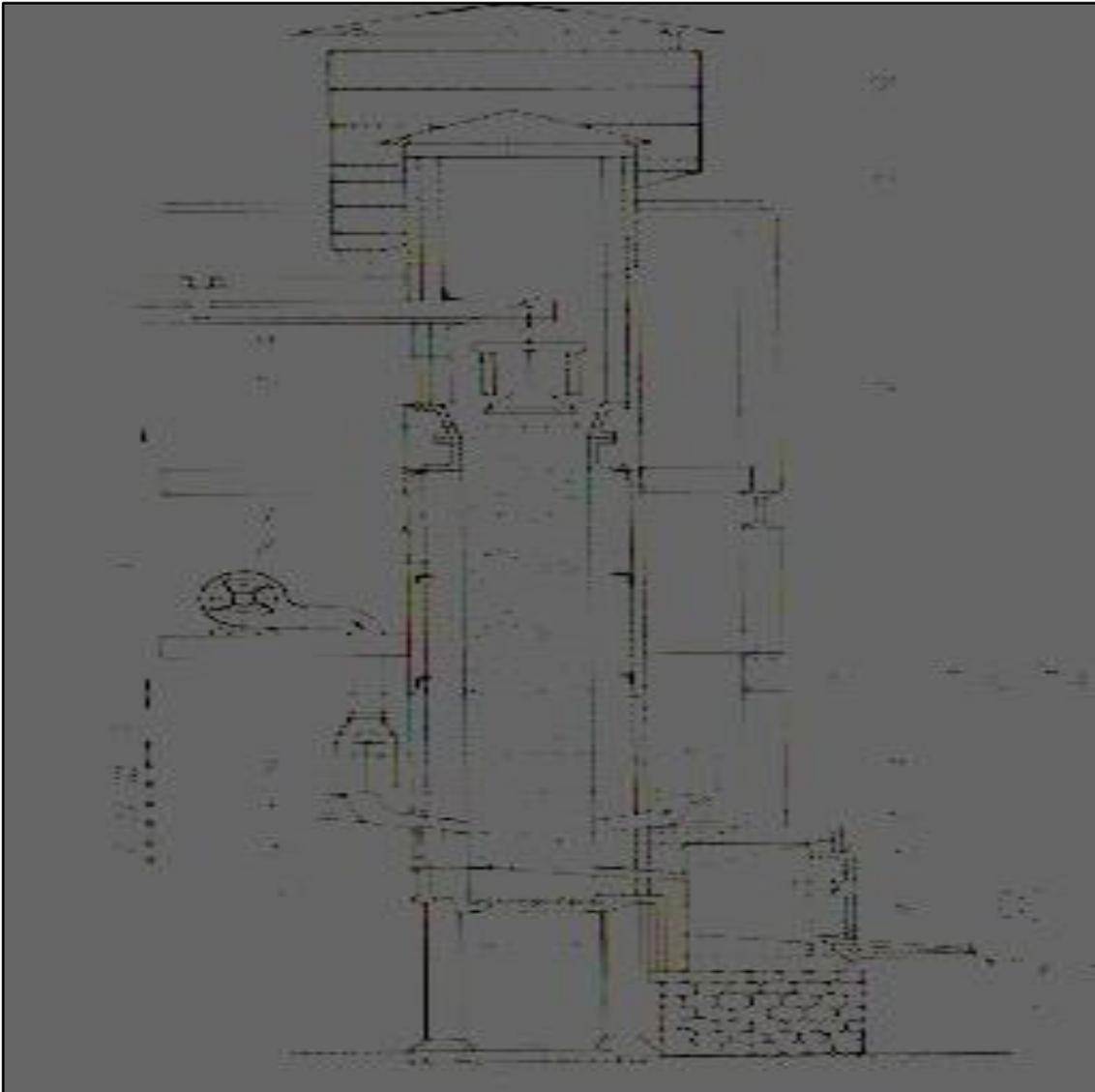


Figura 1.1. Horno de cubilote de combustible sólido (coque). (Fuente elaboración propia)

La puerta de carga está localizada más o menos a la mitad de la cubierta vertical y la parte superior del cubilote queda abierta, a excepción de una pantalla de

metal o para chispas. Las aberturas para introducir el aire a la cama de coque se conocen como toberas. La práctica común es la de tener sólo una serie de toberas en una circunferencia de la pared, aun cuando algunos cubilotes grandes tienen dos hileras. Las toberas de forma acampanada, tienen el extremo mayor en el interior del horno para provocar que el aire se difunde uniformemente, van distribuidas a distancias muy precisas unas de otras, para obtener la distribución del aire tan uniforme como sea posible. El número de toberas varía con el diámetro del cubilote, siendo desde cuatro en los cubilotes pequeños y hasta ocho o más en los cubilotes grandes. [Abramov, 1983, JD Morales 2019]

Alrededor del cubilote y en la zona de las toberas, se encuentra una caja, para el suministro del aire. Opuestas a cada tobera se encuentran unas pequeñas ventanas cubiertas con mica de tal forma que puedan inspeccionarse las condiciones dentro del cubilote. El aire suministrado por un ventilador centrífugo entra por un lado de la caja, opuesto al vertedero de colada, se encuentra otro vertedor para la escoria, en la parte de atrás del cubilote. Esta abertura está colocada debajo de las toberas para evitar un posible enfriamiento de la escoria, provocado por la corriente de aire.

La primera operación al preparar el cubilote consiste en limpiar de escoria, de los desechos que quedan en el refractario del entorno de las toberas, de coladas anteriores. A continuación se repara cualquier zona dañada con arcilla fina y arena sílice refractaria para recubrimiento de hornos. Después de limpiarlo y repararlo se giran las puertas del fondo a posición de cerrado y se coloca la estaca debajo de ellas. En el piso de la solera se coloca una capa de arena negra de moldeo, la cual se apisona y se le da una pendiente hacia el vertedero. La altura no debe ser menor a 10 cm, en el punto más bajo, se le deja un pequeño agujero para la sangría de aproximadamente 25 mm de diámetro.

El encendido del cubilote se hace de 2 a 3 horas para que alcance una temperatura entre los 1200 y 1500 grados centígrados, antes de que se deba tener el primer metal fundido, deberá utilizarse la suficiente cantidad de leña para quemar la primera cama de coque.

Cuando se inicia un tipo natural, se añade coque poco a poco hasta que la cama crece a una altura conveniente. La altura de la cama de coque es importante, ya que determina la altura de la zona de fundición y afecta tanto a la temperatura como a la oxidación del metal.

Cuando la cama del coque está encendida completamente se carga arrabio y la chatarra con una proporción de una parte de coque por diez de hierro, esta relación es en masa. Además se suministra alrededor de 34 kg de fundente por tonelada de hierro, por lo general es piedra caliza, cuyo objetivo es eliminar impurezas en el hierro, protegerlo de la oxidación y hacer la escoria más fluida para retirarla con mayor facilidad del cubilote. [Batista, 1994]

Tanto los cubilotes de aire frío como los de aire caliente están en uso, en estos últimos el aire de entrada se precalienta en alguna forma de recuperador, utilizando los gases calientes del cubilote. El recuperador puede ser una unidad externa o por tubos verticales construidos en el propio cubilote. El aire de entrada pasa por estos tubos, calentándose así antes de llegar a las toberas.

## 2. 1.2. Horno de cubilote gaseoso

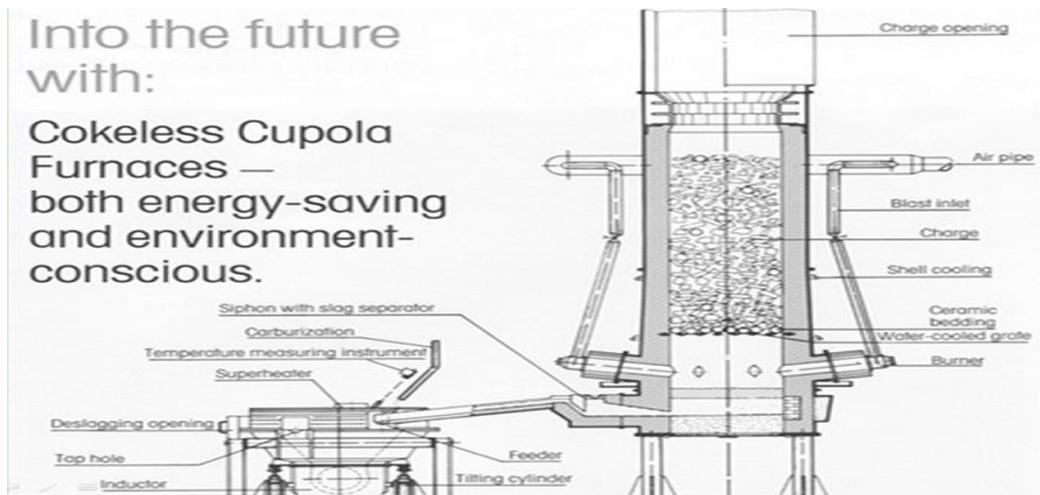


Figura 1.2. Horno de cubilote gaseoso. Fuente [Bakkerus, 1995]

La figura 1.2 muestra un modelo de horno de cubilote gaseoso diseñado por la Compañía Cokeless Cupola Furnace, el cual se diferencia de los cubilotes que

emplean combustible sólido en la altura del crisol, para permitir el insuflado del gas por las toberas. Estos hornos son muy eficientes y se utilizan en gran medida en Rusia y Estados Unidos, han desarrollado y optimizado los procesos de enriquecimiento al Horno de Cubilote con Oxígeno. [Bakkerus, 1995]

### **3. 1.3. Enriquecimiento al horno de Cubilote**

El cubilote es el tipo de horno más popular que actualmente se encuentra en las fundiciones. Un diseño sencillo, producción intermitente, bajos costos de inversión y operación son algunas de sus ventajas. [Chaikin, 1994]

En las últimas décadas el enriquecimiento del aire con Oxígeno en los hornos de cubilote, representa uno de los medios más comunes de ahorro en materia prima y aumento en la producción. Anteriormente, el uso del Oxígeno en hornos de cubilote no estaba muy difundido, debido a su alto costo, sin embargo, actualmente el avance en las técnicas de separación de los gases atmosféricos, así como el aumento en el costo de coque, arrabio, chatarra y las ferroaleaciones, han permitido que el enriquecimiento con Oxígeno pueda ser económicamente factible.

El mecanismo físico del enriquecimiento con Oxígeno es sencillo, se inyecta una cantidad medida de Oxígeno de alta pureza en el aire de inyección del cubilote, por cada por ciento de enriquecimiento con Oxígeno en la inyección, se eleva la temperatura adiabática de flama en la cama de coque hasta alcanzar los 65 °F. El mayor beneficio económico asociado al enriquecimiento con Oxígeno en el cubilote, es el incremento directo en la temperatura de la flama en la zona de combustión (Figura 1.3) y una zona de oxidación más corta en la cama de coque. Una alta temperatura de flama, incrementa la eficiencia en la transferencia de calor a la carga metálica.

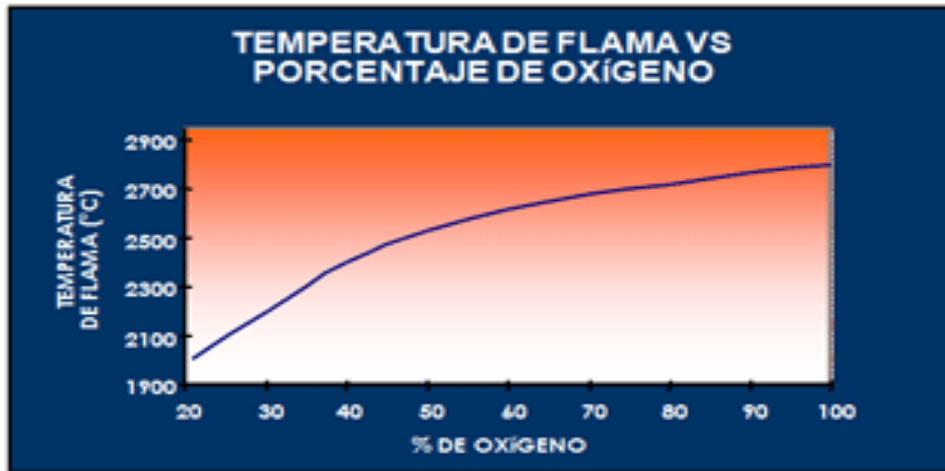


Figura 1.3. Relación de la temperatura de la llama y el porcentaje de Oxígeno.

#### 4. 1.3.1. El enriquecimiento con Oxígeno.

El enriquecimiento con Oxígeno puede aplicarse para tres propósitos básicos:

- Continuamente para optimizar los ahorros de materia prima.
- Continuamente para incrementar la producción.
- Intermitentemente para arranques más rápidos y mayor control del cubilote.

#### 5. 1.3.2. Enriquecimiento suplementario

En este tipo de enriquecimiento el flujo nominal de aire se mantiene constante y se agrega una cantidad de Oxígeno suplementaria, la cual es calculada de acuerdo al porcentaje de enriquecimiento deseado.

La cantidad de Nitrógeno se mantiene constante, no así su porcentaje en el soplo. Por lo que el flujo de aire enriquecido es mayor que el original y la capacidad de fusión del horno aumenta.

#### 6. 1.3.3. Enriquecimiento Equivalente

Consiste en una reducción del soplo nominal, el volumen de Oxígeno eliminado con el aire se sustituye por Oxígeno puro; el Oxígeno total que entra al sistema se mantiene constante y su porcentaje en el soplo aumenta; mientras que el Nitrógeno se reduce en cantidad y en porcentaje causando un incremento en la

temperatura de la flama, por lo que existe más energía para fundir la carga metálica.

## 7. 1.4. Biogás. Características y usos

El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano (50 a 70 %) y dióxido de carbono (30 a 50 %), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí. La cantidad de gas producido es muy variable, aunque generalmente oscila alrededor de los 350 l/kg de sólidos degradables, con un contenido en metano del 70 %. (ICIDCA, 2005). No cabe dudas que este gas natural posee valores significativos para su producción y empleo debido a la composición química que este posee, además de su valor energético.

Tabla 1.1 Características del biogás para 70% CH<sub>4</sub>, 28% CO<sub>2</sub> y % de otros gases. (Lipp/GMBH).

Valores	BIOGÁS	Gas natural	Gas Propano	Gas Metano	Hidrógeno
Valor Calorífico (kW/m <sup>3</sup> )	7,0	10	26	10	3
Densidad t/m <sup>3</sup>	1,08	0,7	2,01	0,72	0,09
Densidad con respecto al aire	0,81	0,54	1,51	0,55	0,07
Límite de explosión (% de gas en el aire)	6-12	5-15	2-10	5-15	4-80
Temperatura de encendido (K)	687	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	0,31	0,39	0,42	0,47	
Requerimiento teórico de aire (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	6,6	9,5	23,9	9,5	

## 8.

### 9. 1.4.1 Usos del Biogás

Existen diversas opciones para la utilización de biogás. Dentro de estas destacan la producción de calor o vapor, la generación de electricidad y combustible de vehículos.

El uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). En muchos países se han fabricado diversas plantas de biogás para apoyar diversos

sectores de la economía como el sector urbano o particular, industrial y en varias ocasiones en campos donde no alcanza los tendidos eléctricos.

#### 10. 1.4.2. Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad.

Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se genera. Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria. Otros sistemas producen principalmente electricidad y el calor residual se utiliza para calentar el agua del proceso. En ambos casos, se aumenta la eficiencia del proceso en contraste si se utiliza el biogás sólo para producir electricidad o calor.

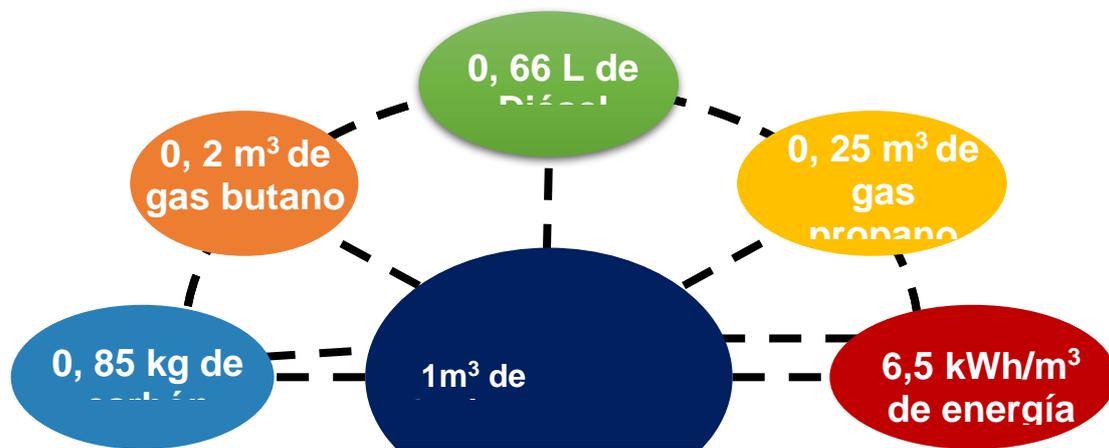


Figura 1.4 Equivalencias del biogás en volumen. (Lipp/GMBH) (Fuente

#### 11. 1.5. Características de los combustibles

Para el funcionamiento del horno de cubilote es necesario un combustible de tipo sólido. En la Tabla 1.2 se observa la clasificación de los combustibles sólidos. Cada combustible sólido es idóneo para un cierto tipo de aplicación dependiendo de las características que identifiquen a los de su clase. Es necesario identificar las características que definen a un combustible para poder determinar el más eficiente para la fabricación de fundición de hierro gris en horno de cubilote. A continuación se describen las características más importantes de los

combustibles sólidos:

Tabla 1.2 Clasificación de combustibles sólidos

<b>Sólidos</b>	<b>Naturales</b>	<b>Maderas</b>
	<b>Carbón</b>	<b>Turbas</b>
		<b>Lignitos</b>
		<b>Hullas</b>
		<b>Antracitas</b>
	<b>Artificiales</b>	<b>Coque</b>
		<b>Aglomerado</b>
		<b>Carbón</b>

### **Materiales volátiles (ASTM D-3175)**

Las materias volátiles son desprendimientos, en forma de gas o líquido, de la materia orgánica e inorgánica durante el calentamiento. A medida que el combustible se calienta se desprenden elementos como el agua, hidrógeno, compuestos aromáticos, etc. Esto disminuye la calidad del combustible. (ASTM D-3175. American Society for Testing Materials, 2017).

### **Cenizas (ASTM D-3174)**

Las cenizas son producto de la combustión de la materia orgánica y la descomposición de la materia existente en el combustible. Un alto valor de cenizas indica un menor valor de poder calorífico y menor calidad del combustible. En un análisis químico se encuentran los siguientes compuestos que conforman a las cenizas:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_3$  y  $\text{SO}_3$ . (ASTM D-3174. American Society for Testing Materials, 2012)

### **Humedad (ASTM D-3302)**

Es la cantidad de agua presente en el combustible. Reduce el poder calorífico de manera directa respecto al contenido de agua. Durante la combustión en el cubilote, el agua es inerte y su evaporación consume energía. (ASTM D-3302).

American Society for Testing Materials, 2017).

### **Carbono fijo (ASTM D-3172)**

El carbono fijo es la parte no volátil y se quema desde el estado sólido. Se encuentra en el residuo que queda en el crisol luego que el proceso de fundición haya terminado. Se determina al restar del 100% de la composición del combustible, el porcentaje de humedad, materias volátiles y cenizas. (ASTM D-3172. American Society for Testing Materials, 2013).

### **Poder calorífico (ASTM D-5865)**

Es el calor de combustión referido a la unidad de masa. Energía liberada por el combustible en combustión debido a la reacción exotérmica de oxidación. El poder calorífico representa la energía en combustión del carbono e hidrógeno de la materia orgánica y del azufre pirítico, y parte del azufre orgánico. Es una de las características más importantes en la selección de un combustible sólido. (ASTM D-3172. American Society for Testing Materials, 2013).

### **Cloro (ASTM D-3176)**

La determinación de cloro suele realizarse como parte del análisis elemental. La existencia del cloro se debe a la presencia de cloruros ligados a la parte orgánica o debido a la presencia de minerales formados por aguas salinas. Este tiene efecto sobre la desulfuración ya que disminuye la relación Ca/S en un 12% por cada 0.25% de Cl. (ASTM D-3172. American Society for Testing Materials, 2015).

### **Contenido de azufre (ASTM D-4239)**

Se encuentra en proporciones variables desde trazas e incluso puede llegar a alcanzar valores de hasta 10%. Es una impureza problemática y preocupante luego de las cenizas. Está presente como pirita, sulfatos o combinado químicamente en compuestos orgánicos.

En la práctica se simplifica considerando azufre combustible (el que reacciona e ingresa a la fundición) e incombustible (permanece inerte y se hace presente en los desechos del combustible). (ASTM D-4239. American Society for Testing Materials, 2014)

Se hace necesario conocer el porcentaje del azufre ya que durante la combustión este puede originar gases venenosos que contaminen el ambiente, debido al íntimo contacto entre el combustible y el caldo, la composición química del último se ve afectada de manera directa y decanta en propiedades negativas para la pieza de fundición gris.

## 12. 1.5.1 Características principales de los combustibles más usados en fundición.

**Carbón de piedra:** Los carbones de piedra se pueden clasificar según su contenido en materias volátiles: así se habla de carbones con el 30 al 40% de materias volátiles (carbones de llama larga o carbones de gas), de otros con el 19 al 30%. La humedad natural varía del 3 al 5%, y las cenizas del 3 al 10%.

Su tamaño es muy variado, para adaptarse a los hornos de distintos tipos en los que es empleado, es decir, en los llamados de reverbero, sean fijos, sean giratorios, que están en uso especialmente en las fundiciones de hierro colado maleable y de bronce. Algunas de estas instalaciones utilizan el carbón muy finamente molido e insuflado en la cámara de combustión con aire comprimido. (Cfr. Manual de Carbones y Coquización, Báez, 2004).

**Antracita:** Por su bajísimo contenido de cenizas y de materias volátiles es especialmente adecuada para la carburación del hierro colado y del acero líquido. En determinadas proporciones se puede usar también en los cubilotes, sustituyendo en un 10% al coque de carga. Es el carbón más denso y duro, contiene menos del 8% en materias volátiles y 92% de carbono fijo. (Cfr. Manual de Carbones y Coquización, Báez, 2004).

**Hulla:** Es sin lugar a dudas el combustible sólido más importante, tanto para las reservas mundiales como el uso que se hace de ellas. Es la más empleada, por su buen poder calorífico, abundancia, buena combustión 10 y diversos usos. Sus características son variadas ya que pueden contener de 8% a 48% de materias volátiles. Un aspecto en contra de la hulla es que contiene elevadas cantidades de azufre que son una fuente muy importante de contaminación del aire. Algunos

carbones de este tipo, cuando se calientan en ausencia de aire, se restablecen y liberan volátiles para formar un sólido poroso, duro y negro: el coque. (Cfr. Manual de Carbones y Coquización, Báez, 2004).

**Coque:** Se emplea en los cubilotes de las fundiciones de hierro colado, en los hornos de crisol de las fundiciones de metales y aleaciones férreas y no férreas. El coque se obtiene destilando fuera del contacto del aire hulla de llama larga (reducida a fragmentos menudos) en baterías de retortas o de cámaras. Los establecimientos donde se realiza esta operación reciben el nombre de coquerías. El coque para fundición debe ser un coque de baja reactividad, denso, poco poroso, con buena organización estructural, buena resistencia mecánica. Se puede tolerar un máximo del 0.08% de azufre, del 8% de cenizas, del 2% de materias volátiles y del 5% de humedad. (Cfr. Manual de Carbones y Coquización, Báez, 2004).

En la Tabla 1.3, se observa los 3 carbones más aptos para el combustible utilizado en el horno de cubilote:

Tabla 1.3. Resumen de características de antracitas, hullas y coque.

	<b>%C</b>	<b>Azufre</b>	<b>Humedad</b>	<b>Cenizas</b>	<b>Volátiles</b>	<b>PCI(a)</b>	<b>PCS(b)</b>
<b>Antracita</b>	86-98	1%	≤15%	4-12%	2-10%	8198	8293
<b>Hulla</b>	69-86	2%	15-20%	4-10%	14-31%	7314	7505
<b>Coque</b>	84-90	0.8%	-3%	7-10%	2%	7003	8054

**Fuente:** Elaboración Propia Datos tomados de: Norma ASTM D388; Manual de Carbones y Coquización por Báez 2004

## Conclusiones Parciales

Con las consultas con expertos y la revisión bibliográfica no se ha encontrado una metodología para disminuir el consumo de coque inyectando BIOGÁS en la fusión de hierro en hornos de cubilote.

## Capítulo 2. Tecnología alternativa de fusión en Horno de Cubilote

### 13. 2. Análisis de la tecnología del horno de Cubilote del taller de fundiciones de (HOLMECA).

Con el objetivo de establecer una tecnología alternativa que nos permita el ahorro de coque durante la fusión realizamos un análisis minucioso del horno de cuba alta discontinuo de 700 mm de diámetro interior instalado en el taller de producciones ferrosas en cuanto a su estructura e instrucción tecnológica de explotación.

#### 2.1. Estructura Metálica del Cubilote.

Esta investigación elige para la realización de la fusión al horno de cubilote de 700 mm de diámetro interior del taller de fundición de la Empresa Mecánica de Holguín, por ser este tipo de fusor el que propicia el caldo metálico menos indicado tecnológicamente para la obtención de fundición con grafito nodular esférico, debido al régimen térmico variable del metal y al alto contenido de azufre que es el principal modificador del caldo metálico una vez nodulizado. Además, constituye el proceso menos competitivo, para así demostrar con mayor fuerza criterial la hipótesis planteada para el cumplimiento del objetivo, para lo cual se desarrolla la siguiente metodología.

La estructura metálica del cubilote consiste en un cilindro vertical, formado por planchas de acero soldadas de 6 mm a 13 mm de espesor, montadas por secciones sobre una plancha base, que a su vez es soportada por cuatro columnas de apoyo, las cuales están fijadas al cimiento. En la Figura A3.1 se muestra una representación gráfica del Horno de Cuba Alta discontinuo de 700 mm de diámetro de trabajo (HCAD700) de la Empresa Mecánica de Holguín.

En el centro de la plancha base se encuentra una abertura de diámetro 700 mm, igual al diámetro interior del refractario del cubilote, donde se coloca la tapa de cierre y es fijada por medio de un puntal. La piqueta u orificio de descarga se encuentra en la superficie del cilindro, al frente de la posición de trabajo, a una

altura de 120 mm sobre la plancha base. En la misma situación se encuentra el canal de descarga con una inclinación de  $10^\circ$  hacia abajo para que el metal corra libremente.

La bigotera de escoria es un orificio de 50 mm de diámetro situado a  $90^\circ$  de la boca de descarga, a una distancia de 120 mm por debajo de las toberas, con un canal de descarga más corto que el de la piquera. Las toberas son cinco y están situadas a una altura de 720 mm, calculada desde la plancha base hasta la parte inferior de las mismas; esto constituye la altura de la cuba o crisol colector de metal. Las toberas son ventanas de mayor ancho que altura, cuya área total (AT) será igual al 20 % del área interior del cubilote y se calcula con la ecuación (1)

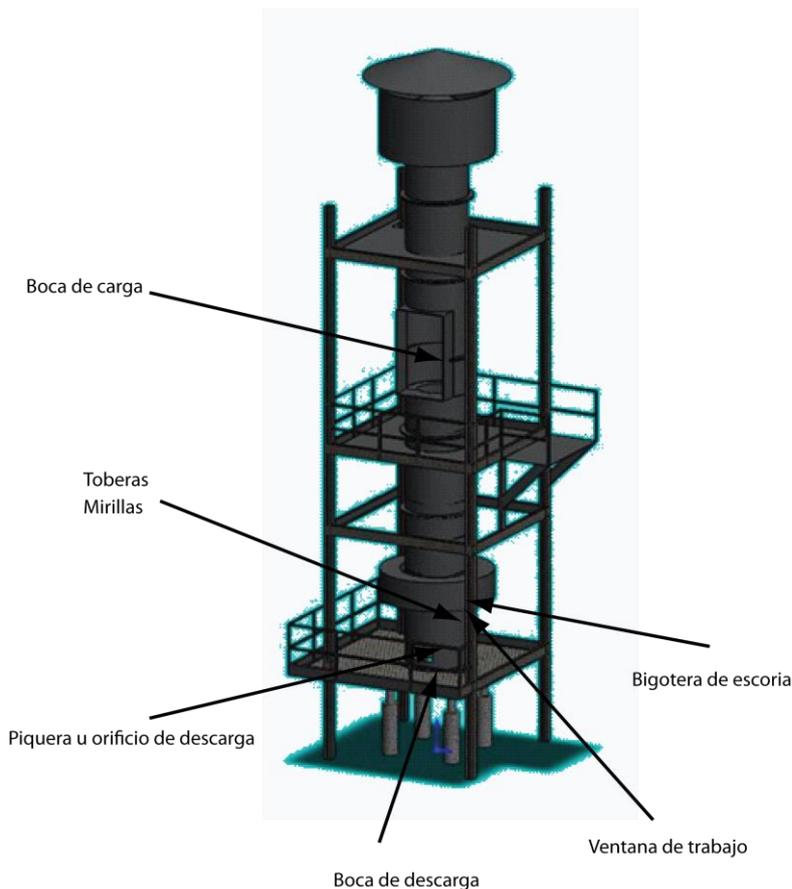


Figura 2.1. Horno de cuba alta discontinuo de 700 mm de diámetro de trabajo (HCAD700) de la Empresa Mecánica de Holguín.

$$A_r = \frac{20\% \cdot \Pi \cdot d^2}{100} \quad (1)$$

Entonces, se determina según (2).

$$d = d_t + d_r = 7 + 4,8 = 11,8 \text{ dm} \quad (2)$$

Sustituyendo, se obtiene (3).

$$A_r = \frac{20\% \cdot 3.1416 \cdot (11,8)^2}{100} = 87,5 \text{ dm}^2 \quad (3)$$

Por lo tanto, el área de una tobera ( $A_{1t}$ ) será igual al área total dividida por las cinco toberas según (4).

$$A_{1t} = \frac{87,5}{5} = 17,5 \text{ dm}^2 \quad (4)$$

La forma de la tobera será rectangular, con mayor ancho que altura, rectas en la parte exterior del cubilote y cónicas, aumentando el ancho y disminuyendo la altura en el interior de cubilote, manteniendo el área con relación al eje tangencial del cubilote, es decir 185 mm x 80 mm. Las mirillas se encuentran en el extremo exterior de las toberas, compuestas por ventanillas de cristal, por donde se observa el proceso de la fusión y a través de ellas se puede barretear el coque para su mejor descenso.

La ventana de trabajo se encuentra a 180° con relación a la piquera y se protege con refractario durante la fusión. A través de la ventana se realiza la reparación del crisol del horno y se construye el piso, las dimensiones son de 300 mm x 400 mm. La caja de aire comienza en la parte superior de las toberas y tendrá una altura de 570 mm y un ancho de 360 mm, separado 100 mm desde la pared del cubilote. El fondo de la caja de aire se comunica con las toberas para el suministro de aire al horno.

La boca de carga se encuentra a 180° con relación a la piquera, en la parte posterior del horno, a una altura tomada desde el piso o solera hasta su borde inferior igual a seis veces

el diámetro interior del cubilote. Su tamaño varía de acuerdo al método de carga utilizado, entonces se obtiene según (5).

$$H = 700 \cdot 6 = 4200 \text{ mm} \quad (5)$$

La altura de la chimenea debe sobresalir el techo del edificio, con su correspondiente cobertura a la que algunas veces se adiciona un apaga chispas. El ventilador puede ser de tipo centrífugo o de émbolo rotatorio, cuya capacidad deberá estar de acuerdo al volumen de aire necesario según la productividad del cubilote.

A partir de conocer el diámetro interior del cubilote (700 mm), el área interior del cubilote se determina con la ecuación (6).

$$A_{IC} = d^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 7^2 \cdot \frac{3,1416}{4} = 49 \cdot 0,7854 = 38,48 \text{ dm}^2 \quad (6)$$

Para el cálculo de la altura de la cuba se utiliza la expresión (7).

$$H_{cuba} = \frac{A_{IC}}{d_i} = \frac{38,48 \text{ dm}^2}{7 \text{ dm}} = 5,5 \text{ dm} \quad (7)$$

$$H_{toberas} = H_{cuba} + H_{bigoteras} + 120 = 550 + 50 + 120 = 720 \text{ mm} \quad (8)$$

La productividad es igual al área interior del cubilote por el factor empírico (f) según la relación carga metálica – coque (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Factor Empírico

Relación	
Carga metálica	Factor empírico
6 : 1	0,047
8 : 1	0,0622
10 : 1	0,072
12 : 1	0,0925

Se calcula la productividad del cubilote HCAD700 ( $P_c$ ) para un área de  $38,48 \text{ dm}^2$  con la relación de 6:1 según (9).

$$P_{C6:1} = A_{IC} \cdot f = 38,48 \cdot 0,047 = 1,81 \text{ t/h} \quad (9)$$

Y la productividad del cubilote HCAD700 ( $P_c$ ) según (10), para un área de  $38,48 \text{ dm}^2$  con la relación de 8:1 según (10).

$$P_{c8:1} = A_{IC} \cdot f = 38,48 \cdot 0,0622 = 2,39 \text{ t/h} \quad (10)$$

La carga de coque (CC) del cubilote es fija y determinada, variando solo el tamaño del coque de acuerdo con el diámetro del horno. En la práctica se ha demostrado que la mejor operación se obtiene cuando el tamaño del coque es de 1/12 hasta 1/10 del diámetro del cubilote, con (11) y (12) se calcula el tamaño del coque para el HCAD700.

$$T_{c\frac{700}{12}} = \frac{700}{12} = 58,33 \text{ mm}^3 \quad (11)$$

$$T_{c\frac{700}{10}} = \frac{700}{10} = 70 \text{ mm}^3 \quad (12)$$

Por lo que el tamaño del coque está entre los límites de  $58,33 \text{ mm}^3$  hasta  $70 \text{ mm}^3$ . La altura de la carga de coque ( $H_{CC}$ ) debe estar entre 1 dm y 1,3 dm. Tomando la media, entonces será de 1,2 dm y con (13) se calcula el volumen de la carga de coque ( $V_{CC}$ ).

$$V_{CC} = A_{IC} \cdot H_{CC} = 38,48 \text{ dm}^2 \cdot 1,2 \text{ dm} = 46,18 \text{ dm}^3 \quad (13)$$

Para determinar la masa de la carga de coque se debe tener en cuenta que la masa del mismo varía según su tamaño, para un volumen determinado en la forma expresada en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Factor de masa de Coque según el tamaño

Tamaño del coque	Factor de masa ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )
25 a 60 mm	0,53
60 a 90 mm	0,48
75 a 100 mm	0,45
100 a 175 mm	0,43

Para el HCDDI 700, con un coque entre 58 mm y 70 mm, le corresponde una masa de  $0,48 \text{ kg}/\text{dm}^3$ . La masa de la carga ( $M_{CC}$ ) de coque se obtiene a través de (14).

$$M_{CC} = V_{CC} \cdot 0,48 \text{ kg} = 46,18 \text{ dm}^3 \cdot 0,48 \text{ kg} / \text{dm}^3 = 22,17 \text{ kg} \quad (14)$$

Los parámetros de calidad del coque se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Parámetros de calidad del Coque

Componentes	%
Carbón fijo	86
Cenizas	> 12
Azufre	> 0,8
Fósforo	> 0,21
Materias volátiles	> 2
Humedad	> 3

En el caso de la masa de carga metálica ( $M_{CM}$ ) por carga, debido a que, por la norma establecida la carga de coque se mantendrá fija, se varía siempre la carga metálica de acuerdo a la relación que se necesite aplicar. Los fragmentos de la carga metálica no deben ser mayores de  $1/3$  del diámetro interior del cubilote. Para la relación de 6:1 la carga metálica se calcula según (15).

$$M_{CM} = M_{CC} \cdot 6 = 22,17 \text{ kg} \cdot 6 = 133 \text{ kg} \quad (15)$$

Para obtener la fundición con grafito nodular esférico, en el cual se utiliza un porcentaje de chatarra de acero, será necesario disminuir la masa de la carga metálica de la siguiente manera: (a) 8 % menos de la masa total de la carga metálica para 20 % de chatarra de acero; (b) 14 % menos de la masa total de la carga metálica para 40 % de chatarra de acero; y (c) 20 % menos de la masa total de la carga metálica para 60 % de chatarra de acero. En el caso de esta investigación se utiliza 20% de chatarra de acero en la carga, por lo que la masa de la carga menos el 8% ( $M_{CM-8\%}$ ) será según (16).

$$M_{CM-8\%} = M_{CM} - \frac{8\% \cdot 133 \text{ kg}}{100\%} = 133 \text{ kg} - 10,64 = 122,36 \text{ kg} \quad (16)$$

Por lo tanto, el cálculo de la masa de chatarra de acero ( $M_{ChAc}$  será según (17)).

$$M_{ChAc} = \frac{20\% \cdot M_{M-8\%}}{100\%} = \frac{20\% \cdot 122,36 \text{ kg}}{100} = 24,5 \text{ kg} \quad (17)$$

Se recomienda que el espesor de la chatarra de acero nunca debe ser menor de 13 mm, los espesores menores se oxidan fácilmente, aportando poco metal y mucha escoria.

Como el rendimiento tecnológico general en la obtención de fundición con grafito nodular esférico por modificación “In mold” y el uso del método vibratorio es de 82,88 %, la masa de la carga de la chatarra de retorno ( $M_{CR}$ ) será de 20% y se calcula con la expresión (18).

$$M_{CR} = \frac{20\% \cdot M_{M-8\%}}{100\%} = \frac{20\% \cdot 122,36 \text{ kg}}{100} = 24,5 \text{ kg} \quad (18)$$

Entonces según (19) se calcula la masa de chatarra de hierro  $M_{ChFe}$ .

$$M_{ChFe} = M_{M-8\%} - (M_{ChAc} + M_{CR}) = 122,36 \text{ kg} - (24,5 \text{ kg} + 24,5 \text{ kg}) = 73,36 \text{ kg} \quad (19)$$

Se debe calcular la carga metálica para obtener hierro gris marca FG 18-36 como aleación base (Tabla 2.4), para obtener el hierro con grafito esferoidal AISI 400-12.

Tabla 2.4. Composición química del hierro gris FG 18-36.

Marca de la aleación base	Contenido promedio de los elementos en %								
	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	P	S	
Según recomendaciones	3,2-3,8	1,9-2,6	0,5-0,8	-	-	-	≤0,10	≤0,03	
Aleación base (FG 18-36)	3,57	2,55	0,52				≤0,10	≤0,03	

Aplicando la ecuación de Rasulov (20) para el cálculo de la masa de los elementos en los materiales de carga metálica, se determina la masa de los elementos componentes de la chatarra de acero, retorno y chatarra de hierro.

$$M_E = \frac{M_{MC} \cdot E_{RC} \cdot \frac{(100 - V_{\pm})}{100}}{100} \quad (20)$$

Para realizar los cálculos de las cargas es necesario conocer las altas y las bajas que se producen en cada uno de los agregados metalúrgicos que se utilizan en la fundición de hierro. En la Tabla A3.5 se plantean las varianzas de altas y bajas ( $V_{\pm}$ ) de los elementos en el horno de cubilote HCAD700 de la Empresa Mecánica de Holguín, que son válidos cuando se cumple con la disciplina tecnológica, de lo contrario estos porcentajes señalados pueden variar en rangos considerable. Es decir, se debe cargar y efectuar la hornada de acuerdo a las tecnologías establecidas.

Tabla 2.5. Altas y bajas de los elementos en los hornos cubilotes.

Elementos	Pérdida	Ganancia
Si	15 -30	-
Mn	15 - 25	-
Cr	10 - 20	-
S	-	40 - 60
C	-	10 - 30
Ni	-	-
P	-	-

Para el cálculo de la cantidad de elementos en la chatarra de acero, de las Tablas 2.4 y 2.5 se toman los datos necesarios para los cálculos necesarios. La masa de carbono en la chatarra de acero se obtiene a través de (21).

$$M_{EC} = \frac{M_{MC} \cdot \% C_{RC} \cdot \left[ \frac{100 + V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{24,5 \cdot 0,3 \cdot \left[ \frac{100 + 30}{100} \right]}{100} = 0,0956 \text{ kg} \quad (21)$$

Con (22) se calcula la masa de Si en la chatarra de acero.

$$M_{ESi} = \frac{M_{MC} \cdot \% Si_{RC} \cdot \left[ \frac{100 - V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{24,5 \cdot 0,4 \cdot \left[ \frac{100 - 22}{100} \right]}{100} = 0,076 \text{ kg} \quad (22)$$

De la misma forma con (23) se calcula la masa de Mn en la chatarra de acero.

$$M_{EMn} = \frac{M_{MC} \cdot \% Mn_{RC} \cdot \left[ \frac{100 - V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{24,5 \cdot 0,47 \cdot \left[ \frac{100 - 20}{100} \right]}{100} = 0,092 \text{ kg} \quad (23)$$

Se continúa con los cálculos de la masa de los elementos componentes principales en la chatarra de retorno. La masa de carbono en la chatarra de retorno se obtiene con (24).

$$M_{EC} = \frac{M_{MC} \cdot \% C_{RC} \cdot \left[ \frac{100 + V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{24,5 \cdot 3,54 \cdot \left[ \frac{100 + 30}{100} \right]}{100} = 1,1274 \text{ kg} \quad (24)$$

Con (25) se obtiene la masa de Si en la chatarra de retorno.

$$M_{ESi} = \frac{M_{MC} \cdot \% Si_{RC} \cdot \left[ \frac{100 - V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{24,5 \cdot 2,1 \cdot \left[ \frac{100 - 22}{100} \right]}{100} = 0,4 \text{ kg} \quad (25)$$

De la misma forma con (26) se calcula la masa de Mn en la chatarra de retorno.

$$M_{EMn} = \frac{M_{MC} \cdot \%Mn_{RC} \cdot \left[ \frac{100 - V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{24,5 \cdot 0,6 \cdot \left[ \frac{100 - 20}{100} \right]}{100} = 0,12 \text{ kg} \quad (26)$$

La masa de los elementos componentes principales en la chatarra de hierro también se calcula. La masa de carbono en la chatarra de hierro se obtiene con (27).

$$M_{EC} = \frac{M_{MC} \cdot \%C_{RC} \cdot \left[ \frac{100 + V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{73,36 \cdot 3,3 \cdot \left[ \frac{100 + 20}{100} \right]}{100} = 3,147 \text{ kg} \quad (27)$$

Con (28) se determina la masa de Si en la chatarra de hierro.

$$M_{ESi} = \frac{M_{MC} \cdot \%Si_{RC} \cdot \left[ \frac{100 - V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{73,36 \cdot 2,1 \cdot \left[ \frac{100 - 22}{100} \right]}{100} = 1,2 \text{ kg} \quad (28)$$

De la misma forma con (29) se calcula la masa de Mn en la chatarra de hierro.

$$M_{EMn} = \frac{M_{MC} \cdot \%Mn_{RC} \cdot \left[ \frac{100 - V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{73,36 \cdot 0,6 \cdot \left[ \frac{100 - 20}{100} \right]}{100} = 0,35 \text{ kg} \quad (29)$$

El fósforo no varía durante la fusión y no se tiene en cuenta para la chatarra de acero. El cálculo de la masa de fósforo en la chatarra de retorno se calcula con la expresión (30).

$$M_p = \frac{M_{PC} \cdot \%P_{RC}}{100\%} = \frac{24,5 \text{ kg} \cdot 0,2\%}{100\%} = 0,05 \text{ kg} \quad (30)$$

El cálculo de la masa de fósforo en la chatarra de hierro se determina según la expresión (31).

$$M_p = \frac{M_{PC} \cdot \%P_{RC}}{100\%} = \frac{73,36 \text{ kg} \cdot 0,1\%}{100\%} = 0,073 \text{ kg} \quad (31)$$

La masa de azufre en la chatarra de retorno se obtiene con (32).

$$M_{SC} = \frac{M_{MC} \cdot \% S_{RC} \cdot \left[ \frac{100 + V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{24,5 \text{ kg} \cdot 0,15\% \cdot \left[ \frac{100 + 50}{100} \right]}{100} = 0,06 \text{ kg} \quad (32)$$

El cálculo de la masa de azufre en la chatarra de hierro se calcula de manera similar y se obtiene igual a 0,11 kg.

El cálculo de la cantidad de ferroaleaciones que se necesita adicionar, se obtiene según la ecuación de Chernov para el cálculo de la masa de la aleación de aporte (33).

$$M_E = \frac{M_{MC} (E_M - E_{RC}) \cdot 100}{(100 - V_F) \cdot L_E} \quad (33)$$

Luego de conocer la composición del caldo metálico sangrado del cubilote se procede al afinado e inoculación en la cazuela.

Con (34) se calcula la cantidad de FeSi que se necesita adicionar.

$$M_{FeSi} = \frac{M_{Mcv} (E_{\%SiM} - E_{\%RC}) \cdot 100}{(100 - V_{\pm F}) \cdot L_{Si}} = \frac{1200 \cdot (2,55 - 1,37) \cdot 100}{(100 - 15) \cdot 75} = 22,21 \text{ kg} \quad (34)$$

Dónde:  $M_{Mcv}$  – Masa del caldo metálico en la cazuela de vertido 1200kg.

Cálculo de la cantidad de Mn necesario según (35)

$$M_{FeMn} = \frac{M_{Mcv} (E_{\%MnM} - E_{\%RC}) \cdot 100}{(100 - V_{\pm F}) \cdot L_{Mn}} = \frac{1200 \cdot (0,52 - 0,51) \cdot 100}{(100 - 20) \cdot 75} = 0,2 \text{ kg} \quad (35)$$

En la Tabla 2.6 se incorporan los resultados del cálculo de las masas de los materiales de la carga metálica.

Tabla 2.6. Materiales componentes de la carga metálica.

Materiales de carga	Masa (kg)	C		Si		Mn		P		S	
		%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
Chatarra de acero	24,5	0,3	0,096	0,4	0,076	0,47	0,092	-	-	-	-
Chatarra de retorno	24,5	3,54	1,127	2,1	0,4	0,6	0,12	0,2	0,05	0,11	0,037

Chatarra de hierro	73,36	3,3	3,147	2,1	1,2	0,6	0,35	0,1	0,07	0,1	0,073
Masa total de la carga	122,36	3,57	4,37	1,37	1,676	0,51	0,562	0,3	0,12	0,12	0,110
<b>Cantidad de ferroaleaciones que se necesita en los procesos de afino e inoculación</b>											
FeSi 75%	22,21	-	0,009	1,18	-	-	-	-	-	-	-
FeMn 80%	0,2	-	0,000	-	-	0,01	-	-	-	-	-
<b>Tratamiento con 1,85 % de CaO</b>											
Composición del metal base	-	3,57		2,55	-	0,52	-	0,10	-	0,03	-

Como fundente se utiliza generalmente de 1,5 % a 2,2 % por kg de metal cargado, dependiendo del grado de oxidación de los materiales de la carga metálica. El tamaño del fundente debe estar entre 25 mm y 75 mm, se colocará sobre la carga metálica y para el caso se utiliza la piedra caliza de 56 % a 85 % de CaO. Esta investigación aplica un tratamiento con 1,85 % de CaO.

El gasto de aire en  $m^3$  se calcula de acuerdo al peso de la carga de coque. Teóricamente para la combustión completa de 1 kg de coque, se requieren  $8 m^3$  de aire, referido a  $0^\circ C$  y 760 mm de la columna de mercurio. En la práctica se prevé un ligero exceso referido a una temperatura media de  $15^\circ C$  y se toman  $9 m^3$ , considerando la resistencia y las fugas en el sistema y se calcula según la expresión (36).

$$V_{Aire} = M_{CC} \cdot V_{T,aire} = 22,17 \cdot 9 \frac{m^3}{kg} = 199,5 m^3 \quad (36)$$

Entonces, para conocer el volumen de aire necesario para producir una t/h ( $V_{Aire/t}$ ) de caldo metálico se determina con (37).

$$V_{Aire/t} = \frac{1000 \frac{kg}{h}}{M_{MC}} \cdot V_{Aire} = \frac{1000 \frac{kg}{h}}{122,36 kg} \cdot 199,5 m^3 = 1630,4 \frac{m^3}{h} \quad (37)$$

La altura de la cama de coque (HCC) puede variar desde 710 mm hasta 1 345 mm sobre el borde superior de las toberas. La altura depende de la presión de aire en cm de  $H_2O$ , medida en la caja de aire (P), que puede variar desde 38 cm de  $H_2O$  a 55 cm de  $H_2O$  para

cubilotes de 700 mm de diámetro, por lo que la altura de la cama de coque podrá obtenerse por la ecuación de Jiménez (38).

$$H_{cc} = (\sqrt{P} \cdot 124) + 150 \tag{38}$$

Para el cálculo tomamos las dos presiones, para 38 mm se calcula con (39).

$$H_{cc} = (\sqrt{P} \cdot 124) + 150 = (\sqrt{38} \cdot 124) + 150 = 914,4 \text{ mm} \tag{39}$$

Entonces, para 55 mm se utiliza (40).

$$H_{cc} = (\sqrt{P} \cdot 124) + 150 = (\sqrt{55} \cdot 124) + 150 = 1069,6 \text{ mm} \tag{40}$$

En la práctica es preferible tomar siempre la altura mayor.



Figura 2.1. Horno de cubilote del taller de fundiciones (HOLMECA).

## 2.2 Tecnología alternativa de inyección de biogás en la fusión para cubilote.

Desarrollamos el cálculo de la combustión de la mezcla gaseosa para determinar los volúmenes posibles de sustitución del coque por biogás.

Cálculo de combustión del gas de coque. Con un calor de ignición de la mezcla gaseosa de 10 g joule/ m<sup>3</sup> y se muestra en la tabla 2.7

Tabla 2.7. Combustión del gas de combustión coque

CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Total
13,26	11,52	0,02	2,52	72,68	100,0

Calculamos la relación del gas seco al húmedo. Volumen de humedad en 100 m<sup>3</sup> y se incorpora a la tabla 2.8

$$\rho_{\pi.r.} = \frac{44CO_2 + 18H_2O + 28N_2 + 32O_2 + 64SO_2}{22,4 * 100} = 1,30 \text{ kg/m}^3 \quad (41)$$

Tabla 2.8. Relación del gas seco al húmedo

Gas	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	Humedad s/m <sup>3</sup>
De coque	2,35	7,44	56,42	3,97	26,05	3,14	0,63	35
De hogar	10,7	28,5	2,5	58,2	0,1	-	-	35

$$H_2O = \frac{W * 100}{803,6 + W} = \frac{35 * 100}{803,6 + 35} = 4,17\% \quad (42)$$

- Coeficiente del gas húmedo

$$k = \frac{100 - 4,17}{100} = 0,958$$

- Composición del gas de coque húmedo.

$$CO_2^{B\pi} = kCO_2 = 0,9548 * 2,35 = 2,25\% .$$

- Análogamente se calcula la humedad del gas de combustión del hogar.

$$CO_2^{B\pi} = kCO_2 = 0,958 * 10,7 = 10,25\% . \quad (43)$$

Tabla. 2.9. Composición de la humedad de los gases

Gas	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Total
Gas de	2,25	7,15	54,0	3,81	25,0	3,02	0,6	4,17	100,0
coque	10,25	27,3	2,39	55,8	0,09	-	-	4,17	100,0

El calor de ignición de los gases se calcula por la siguiente fórmula:

$$Q_H^P = 0,127 * 7,15 + 0,108 * 54 + 0,357 * 25 + 0,596 * 3,02 = 17,1 \text{mjoule}/m^3 . \quad (44)$$

Para el gas de combustión del hogar.

$$Q_H^P = 0,127 * 27,3 + 0,108 * 2,39 + 0,357 * 0,09 = 3,78 \text{mjoule}/m^3 .. \quad (45)$$

- Determinamos la composición de la mezcla

$$x = \frac{Q_{H.K\Gamma}^P - Q_{H.CM}^P}{Q_{H.K\Gamma}^P - Q_{H.\Pi\Gamma}^P} = \frac{17,1 - 10}{17,1 - 3,78} = 0,53 \quad (46)$$

- Para el calor de combustión del gas de coque.

$$1 - x = 1 - 0,53 = 0,47.$$

- Composición de la mezcla gaseosa

$$CO_{2m} = CO_2 x + CO_{2gh} (1 - x) = 10,25 * 0,53 + 2,25 * 0,47 = 65\% \quad (47)$$

Tabla 2.10. Composición de la mezcla gaseosa.

CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Total
6,5	17,82	26,66	31,35	11,8	1,42	0,28	4,17	100,0

- Cantidad de aire necesario teórico.

$$\begin{aligned}
 L_o &= 0,0476(0,5CO + 0,5H_2 + 2CH_2 + 3C_2H_4 - O_2) \times (1 + 0,00124d_B) = \\
 &0,0476(0,5 \cdot 17,82 + 0,5 \cdot 26,66 + 2 \cdot 11,8 + 3 \cdot 1,42 - 0,28) \times (1 + 0,00124 \cdot 10) = 2,40 \\
 &\text{m}^3/\text{m}^3
 \end{aligned}$$

- Cantidad de aire necesario real para  $n = 1,1$

$$L_r = 1.1 \cdot 2.40 = 2.64 \text{ m/m} \quad (50)$$

- Cantidad de los productos combustibles.

$$V_{CO_2} = (CO + CO_2 + CH_4 + 2 C_2H_4) 0,01 = (17,83 + 6,5 + 11,8 + 2 \cdot 1,42) 0,01 = 0,39 \quad (51)$$

$$\begin{aligned}
 V_{H_2O} &= (2CH_4 + 2C_2H_4 + H_2 + H_2O + 0,124 L_r d_B) 0,01 = (2 \cdot 11,8 + 2 \cdot 1,42 + 26,66 \\
 &+ 4,17 + 0,124 \cdot 2,64 \cdot 10) 0,01 = 0,606
 \end{aligned}$$

$$V_{N_2} = (N_2 + 79 L_r) 0,01 = (31,35 + 79 \cdot 2,64) 0,01 = 2,40$$

$$V_{O_2} = 0,21 (n - 1) L_o = 0,21 (1,1 - 1) 2,40 = 0,050$$

- Cantidad total de los productos de combustión

$$V_r = 0,39 + 0,606 + 2,40 + 0,050 = 3,45 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

- Composición de los productos combustibles.

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_r} * 100 = \frac{0,39}{3,45} * 100 = 11,3\% \quad (52)$$

El resultado de la composición de los productos combustibles se muestra en la Tabla. 2.11

Tabla 2.11 Composición de los productos combustibles.

CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Total
11,3	17,6	69,6	1,5	100,0

- Densidad de los productos de combustión

$$\rho_{p.c.} = \frac{44CO_2 + 18H_2O + 28N_2 + 32O_2}{22,4 * 100} = \frac{44 * 11,3 + 18 * 17,6 + 28 * 69,6 + 32 * 1,5}{22,4 * 100} = 1,25 \text{ kg/m}^3 \quad (54)$$

### Cálculo de combustión del Biogás

Tabla 2.12 Composición del Biogás

Componente	Fórmula	Porcentaje
Metano	CH <sub>4</sub>	40-70
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	30-60
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0,1
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,5
Monóxido de carbono	CO	0,1
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0,1
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	0,1

Fuente: Blanco et.al (2011)

Calculamos la combustión del biogás con un coeficiente de pérdida del gas n = 0,5 y una temperatura de 1300 °C

Cantidad de Oxígeno necesario O<sub>2</sub>

$$\begin{aligned}
 L_{O_2} &= 0,21nL_0; \\
 L_{O_2} &= 0,0476[2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} - O_2]x(1 + 0,00124d_B) \\
 L_{O_2} &= 0,0476(2 * 89,9 + 3,5 * 3,1 + 5 * 0,9 + 6,5 * 0,4 - 0,2)(1 + 0,00124 * 10) = 9,28 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \\
 L_{O_2} &= 0,21 * 0,5 * 9,28 = 3,48 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (55)
 \end{aligned}$$

Cantidad de Nitrógeno necesario N<sub>2</sub>

$$L_{N_2} = \frac{79}{21} L_{O_2} = \frac{79}{21} * 9,28 = 3,48 m^3 / m^3 \quad (56)$$

Cantidad total del nitrógeno en el combustible.

$$\sum L_{N_2} = L_{N_2} + 0,01 N_2 = 3,48 + 0,01 * 5,2 = 3,53 m^3 / m^3 \quad (57)$$

Balance del C

$$X + Y = (0,3 + 89,9 + 2*3,1 + 3*0,9 + 4*0,4)0,01 = 1,01 m^3/m^3$$

Balance del H<sub>2</sub>

$$Z + Q = (2*89,9 + 3*3,1 + 4*0,9 + 5*0,4)0,01 = 1,95 m^3/m^3 \quad (58)$$

Balance del O<sub>2</sub>

$$2X + Y + Z = (2*0,3 + 2*0,2)0,01 + 2*0,99 = 1,97 m^3/m^3$$

La constante de equilibrio de la reacción del vapor de agua a una temperatura de 1300°C, entonces  $k = 3$

(59)

$$Z = \frac{(1,01 - x)(1,97 - 1,01 - x)}{x(1,95 - 1,97 + 1,01 + x)}$$

Obteniéndose

$$2x^2 + 4,94x - 0,97 = 0$$

De donde

$$x = \frac{-4,94 + \sqrt{4,94^2 + 4*2*0,97}}{2*2} = 0,19 \quad (60)$$

Sustituyendo X en la fórmula obtenemos

$$Y = 1,01 - 0,19 = 0,82$$

$$Z = 1,97 - 1,01 - 0,19 = 0,77$$

$$Q = 1,95 - 1,97 - 1,01 + 0,19 = 1,18$$

La Cantidad total de los productos combustible es.

$$V_g = 0,19 + 0,82 + 0,77 + 1,18 + 3,53 = 6,49 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (61)$$

Composición de los productos de combustión parcial.

$$CO_2 = \frac{0,19}{6,49} * 100 = 2,93\% \quad (62)$$

$$CO = \frac{0,82}{6,49} * 100 = 12,63\% \quad (63)$$

$$H_2O = \frac{0,77}{6,49} * 100 = 11,85\% \quad (64)$$

$$H_2 = \frac{1,18}{6,49} * 100 = 18,20\% \quad (65)$$

$$N_2 = \frac{3,53}{6,49} * 100 = 54,39\% \quad (66)$$

*El enriquecimiento con biogás puede aplicarse para tres propósitos básicos:*

- Continuamente para optimizar los ahorros de materia prima
- Continuamente para incrementar la producción.
- Intermitentemente para arranques más rápidos y mayor control del cubilote.

Coincidiendo estos propósitos con los objetivos de la presente investigación, que luego de analizar los componentes tecnológicos del cubilote de 700 mm de diámetro interior instalado en el taller de fundiciones de HOLMECA y las opiniones de los expertos, valoramos que podemos establecer una tecnología para la inyección de biogás partimos de un ahorro de coque de 30% manteniendo invariable la estructura metálica del cubilote, la piquera de descarga, las toberas, las mirillas, ventana de trabajo, caja de aire, boca de

carga, chimenea y el ventilador e instalando una tubería en la parte superior de las toberas por donde se inyectará el biogás y se mantendría invariables los datos técnicos: diámetro interior del cubilote, área interior del Cubilote, altura de la cuba, cálculo de la productividad y adecuando el resto de los parámetros técnicos siguientes.

### 2.2.1. Cantidad de Coque necesario por carga.

La altura de la carga de coque debe estar entre 1.2 y 1.5 dm. La media será de 1.35 dm. El volumen de coque será:

$$V_{\text{Coque}} = 25.52 \text{ dm}^2 \times 1.35 \text{ dm} = 34.45 \text{ dm}^3 \quad (67)$$

Restándole el 30% de coque estimado, tenemos que:

$$V_{1 \text{ Coque}} = 34.45 \text{ dm}^3 - 11 \text{ dm}^3 = 23,45 \text{ dm}^3$$

En la práctica se utiliza para cargar el coque un recipiente con la capacidad volumétrica obtenida, sin la necesidad de pesar el mismo en repetidas ocasiones.

Tomamos en consideración que el peso del mismo varía según su tamaño, determinamos el peso según la relación establecida.

Tabla 2.13 Relación del tamaño con el peso

Tamaño del coque	Peso (Kg./ dm <sup>3</sup> )
25 a 60 mm	0,53
60 a 90 mm	0,48
75 <sup>a</sup> 100mm	0,45
100 a 175 mm	0,43

Aproximamos el tamaño del coque al segundo grupo y es igual a 0,53 kg. / dm<sup>3</sup>.

El peso de la carga de coque será de:

$$25 \text{ dm}^3 \times 0,53 \text{ Kg. / dm}^3 = 13.25 \text{ Kg.}$$

La cantidad de coque debe estar dentro de los parámetros siguientes se buscará en la tabla 2.13

### 2.2.2. Cantidad de Carga Metálica por Carga

Como norma establecida la carga de coque se mantendrá fija, variando siempre la carga metálica de acuerdo a la relación que se necesite aplicar.

Los pedazos de la carga metálica no deben ser mayores de 1/3 del diámetro interior del cubilote.

Como la relación que hemos seleccionado es de 8:1 nuestra carga metálica será de:

$$Q_{\text{Metálica}} = 13.25 \text{ Kg.} \times 8 = 106.0 \text{ kg.}$$

Cuando se desea hacer hierro de alta resistencia en el cual se utiliza un porcentaje de Chatarra de acero, será necesario disminuir el peso de la carga metálica de la siguiente manera:

- 8 % menos del peso total de la carga metálica para 20 % de chatarra de acero.
- 14 % menos del peso total de la carga metálica para 40 % de chatarra de acero.
- 20 % menos del peso total de la carga metálica para 60 % de chatarra de acero.

El espesor de la Chatarra de acero nunca debe ser menor de 13 mm, los espesores menores se oxidan fácilmente, aportando poco metal y mucha escoria.

### 2.2.3. Fundente

Se utiliza generalmente de 1,5 a 2,5 % por kg. de metal cargado, dependiendo del grado de oxidación de los materiales de la carga metálica.

$$106.0 \times 0.025 = 2.65 \text{ kg}$$

El tamaño del fundente debe estar entre 25 y 75 mm y se colocará sobre la carga metálica.

Como fundente se utiliza generalmente la piedra caliza de 56 a 85 % de  $\text{CaCO}_3$ .



#### 2.2.4. Cantidad de Aire

El gasto de aire en m<sup>3</sup> se calcula de acuerdo al peso de la carga de coque. Teóricamente la combustión completa para 1 kg. de coque se requieren 8 m<sup>3</sup> de aire, referido a 0 °C y 760 mm de la columna de mercurio.

En la práctica se prevé un ligero exceso referido a una temperatura media de 15 °C y se toman 9 m<sup>3</sup>, considerando la resistencia y las fugas en el sistema.

Se necesita un volumen de aire de:

$$V_{\text{Aire}} = 13.25 \text{ Kg.} \times 9 \text{ m}^3 / \text{Kg.} = 119.25 \text{ m}^3 \quad ()$$

Utilizando el enriquecimiento suplementario, tenemos que en este tipo de enriquecimiento el flujo nominal de aire se mantiene constante y se agrega una cantidad de Oxígeno suplementaria, la cual es calculada de acuerdo al porcentaje de enriquecimiento deseado.

La cantidad de Nitrógeno se mantiene constante, no así su porcentaje en el soplo. Por lo que el flujo de aire enriquecido es mayor que el original y la capacidad de fusión del horno aumenta. Por tanto para producir 1 t/h de metal líquido, mantenemos el volumen de aire de:

$$\frac{1000 \text{Kg} / \text{h}}{106.0 \text{Kg}} = 9,43 \text{Cargas} / \text{h de coque}$$

$$V_{\text{Aire} / \text{ton}} = 9,43 \times 119.25 \text{ m}^3 = 1125. \text{ m}^3 \text{ de aire} / \text{h.}$$

#### 2.2.5. Altura de la Cama de Coque

Esta puede variar desde 710 hasta 1345 mm sobre el borde superior de las toberas.

La altura depende de la presión de aire en cm. de H<sub>2</sub>O, medida en la caja de aire que puede variar desde 38 a 55 para cubilotes de 570 mm de diámetro, por lo que la altura de la cama de coque podrá obtenerse por la siguiente fórmula empírica:

$$( P \times 124) + 150 = \text{Altura de la Cama de Coque.}$$

Para el cálculo tomamos las 2 presiones.

$$(55 \times 124) + 150 = 1069.6 \text{ mm}$$

En la práctica es preferible tomar siempre la altura mayor. Tomaremos 1200 mm.

$$H_{Toberas} = H_c + H_{Bigoteras} + 120 = 447,72 + 50 + 120 = 617,72 \text{ mm}$$

$$H_{Cama \text{ de Coque}} = H_{Toberas} + H_{Cama \text{ de Coque}}$$

$$H_{Total \text{ Cama de Coque}} = 617,72 + 1200$$

$$H_{Total \text{ Cama de Coque}} = 1817,72 \text{ mm} = 18,1772 \text{ dm}$$

$$Q_{Cama \text{ de Coque}} = 25,52 \text{ dm}^2 \times 18,1772 \text{ dm} \times 0,48 \text{ Kg} / \text{dm}^3$$

$$Q_{Cama \text{ de Coque}} = 222,66 \text{ Kg}$$

Tomando solo el 30% del peso de la cama de coque tenemos que:

$$Q_{Cama \text{ de Coque}} = 66,80 \text{ Kg}$$

### 2.3. Valoración Técnico - Tecnológica

En la tabla. 2.14 incorporamos los parámetros técnicos de la tecnología tradicional comparándolo con los parámetros técnicos de la tecnología alternativa inyectando biogás

Tabla 2.14. Comparación de los parámetros técnicos de las dos tecnologías.

No	Parámetros	U/M	Tecnología Tradicional	Tecnología alternativa	Diferencia	Eficiencia (%)
1	Volumen del Coque	dm <sup>3</sup>	34,45	22,99	11.56	33,55
2	Peso del Coque	Kg.	146,0	106,0	40	27,39
3	Cantidad de aire	m <sup>3</sup>	164,25	119,25	45	27,39
5	Peso de la cama de coque	Kg	222,66	66,80	155.86	65

La tabla 2.14 muestra en cuanto es eficiente la aplicación de la tecnología de inyección de biogás con el objetivo de ahorrar coque en la fusión de hierro bajo las condiciones específicas del taller de fundiciones de HOLMECA

## 2.4. Valoración Económica.

La valoración económica la realizamos analizando las normas de consumos y los parámetros técnicos tecnológicos de la tecnología tradicional comparándola con la tecnología inyectando biogás.

En la Tabla 2.15 se realiza una comparación entre los consumos de diesel, coque y biogás.

Tabla 2.15 Comparación de la desagregación de los insumos fundamentales

Producto	U.M.	Norma de consumo		Importe		Eficiencia	
		Tecnología Tradicional	Tecnología inyección de biogás	Tecnología Tradicional	Tecnología inyección de biogás		
<b>Combustible diesel</b>	L	0, 118	0	0,6	0	0	0
<b>Carbón Coque</b>	T	0,34203	0,10615	66,84	20,74	0,23	46,83
<b>Biogás</b>	m <sup>3</sup>	0	1,17942	0	1,03	1,1794	1,03

La tabla 2.15 nos muestra aunque no es objetivo de esta investigación el ahorro de 0, 118 L de combustible diesel por tonelada de fundido al ser eliminado como elemento de ignición para un ahorro de \$ 0,6 por tonelada, se incorpora el consumo de biogás con una norma de consumo de 1,17942 m<sup>3</sup> por tonelada de fundido y se cumple con el objetivo de esta investigación al disminuir el consumo de carbón coque de 0,3403 hasta 0,10615 toneladas por fundido, para un ahorro 0,23 toneladas de carbón coque por tonelada de fundido y un ahorro monetario de \$ 46,83 por tonelada de fundido.

## 2.5. Valoración para la defensa.

El taller de fundiciones de HOLMECA, produce fundidos como piezas de repuestos y agregados para las Fábricas “Héroes del 26 de Julio” y “60 Aniversario de la Revolución de Octubre”, que han incluido en su objeto social la reparación y modernización la técnica militar, por lo que esta tecnología tiene una gran aplicación en la producciones necesarias para estos fines.

## 2.6. Valoración medioambiental.

Con la aplicación de esta tecnología utilizamos menos cantidad de coque por lo que disminuimos la generación de desechos sólidos cómo se muestra en la comparativa Tabla 2.16.

Tabla 2.16 Generación de desechos sólidos.

Componentes	%	Norma de Consumo		Eficiencia
		Tecnología Alternativa	Tecnología con Inyección de Biogás	
<b>Carbón fijo (Kg.)</b>	86	29.41458	9.1289	20.28568
<b>Cenizas (Kg.)</b>	12	4.10436	1.2738	2.83056
<b>Desechos Sólidos (Kg.)</b>		33,5198	10,4062	23,1162

Con la utilización del biogás la fusión es más sostenible al disminuir la generación de desechos sólidos de 33,5198 Kg hasta 10,4062 Kg. para una disminución de 23,1162 Kg.

## 15. CONCLUSIONES.

- 1 Con la aplicación de esta tecnología se cumplen los objetivos de este proyecto al disminuir el consumo de coque en este proceso tecnológico bajo las condiciones específicas del taller de fundiciones de HOLMECA.
- 2 Debido a las ventajas que posee la inyección de BIOGAS en la fusión de hierro, bajo las características específicas del taller de fundiciones de HOLMECA se entiende que este es el idóneo para su introducción en la industria.

## 17. RECOMENDACIONES.

1. Continuar profundizando en la aplicación de esta tecnología y una vez demostrada su eficiencia generalizarse en el resto de las fundiciones que utilizan cubilotes en su proceso de fusión.

## 18. BIBLIOGRAFÍA

- Abramov. A. 1983. "Manual del joven fundidor". Editorial Alta Escuela. Moscú.1983. 203 p.
- Bakkerus and Van der Holst. 1995. The T-Nock Process for Making Ductile iron. Modern Casting Tech. N. 711, july 1995.
- Batista Cabrera, A.; et al. 1994. "Propiedades de Fundición de los Metales y Aleaciones". Monografía, Universidad de Holguín.1994
- Chaikin A. A. 1994. Refinado del HGE modificado en el molde por medio de filtros Cerámicos. Liteinoe Proistbosta. N. 4 Año 1994.
- ASM International, 1992. «ASM Handbook» de ASM HandbookVolume 15 Castings, vol. 15, EE.UU., ASM Publications, 1992.