

# Desarrollo de un Modelo Matemático para el Control Operativo de un Horno para Fundición de Vidrio

Sr. Carlos E. Aguilar P.

Ing. Jorge Duque R.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 via Perimetral

Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador

[Carlos.aguilar@o-i.com](mailto:Carlos.aguilar@o-i.com)

[Jorge.duque@espol.edu.ec](mailto:Jorge.duque@espol.edu.ec)

## Resumen

*El presente trabajo desarrolló el Diseño de un Modelo Matemático para el Control Operativo de un Horno de Producción de Vidrio, buscando la Optimización del consumo de combustible y un incremento de la capacidad de extracción del horno.*

*El modelo determina la cantidad de combustible requerida para la operación diaria, considerando como parámetros principales el Pull (Cantidad de vidrio que sale del horno en 24 horas de operación), porcentaje de casco (cantidad de vidrio reciclado que se utiliza como parte de materia prima) y el color del vidrio que se esta produciendo. Además el modelo calcula la cantidad de energía que se requiere para el funcionamiento del horno en MJ/Ton y los parámetros de operación como son temperatura óptica de la cámara del horno, la temperatura de precalentamiento de combustible, el porcentaje de humedad de la mezcla antes de entrar al horno y el porcentaje de exceso de oxígeno que debe de tener los gases de combustión que sale de la chimenea.*

*Una vez concluido el proyecto y con las mejoras hechas se observo adicionalmente a la disminución del consumo de combustible, un incremento del 6% del total de toneladas extraídas debido a la optimización de la combustión.*

*La implementación de las herramientas Lean Six Sigma utilizadas para el desarrollo de la presente tesis nos demuestran que esta metodología no solo se relaciona con la rama de control de calidad sino que puede desarrollarse varios modelos matemáticos que determinen el comportamiento de diferentes procesos.*

**Palabras Claves:** *Modelo Matemático, Optimización del Consumo de Combustible, Incremento de Capacidad, herramientas Lean Six Sigma*

## Abstract

*The following thesis developed a Mathematic Model for the Operative Control for a Glass manufacturing furnace, looking for a combustion optimization and a increment of the furnace capacity.*

*The model determines the daily fuel requirement for the operation, considering as the main inputs: the Pull (Quantity of glass that comes out of the furnace in 24 hours), the cullet (recycling glass used as a part of the raw material) and the color of the glass that is been produced. Also the model estimates the energy required in MJ/Ton and the operation parameter of Optic Temperature of the furnace, the pre-heat temperature of the fuel, the percentage of raw material humidity and the excess of oxygen in the chimney.*

*Once the project was concluded and after all the improvements done we observed a fuel reduction together with an increase of 6% of tonnage pull from the furnace, due to the combustion optimization.*

*The implementation of the Lean Six Sigma tools used in this thesis demonstrates that this is not a methodology used only in the quality control area but in all the areas that we are capable to develop a model to determine the different process behaviors.*

**Key Words:** *Mathematic Model, Fuel Optimization, Capacity Increase, Lean Six Sigma tools*

## 1. Introducción

La manufactura de envases de vidrio se efectúa mediante la fusión de diferentes materiales, pero principalmente de arena con alto contenido de sílice. Dependiendo de los compuestos usados se obtienen los diferentes colores disponibles en el mercado, ya sean Flint (blanco), ámbar o verde. Las materias primas ingresan en forma de polvo fino y además se agrega casco, que es vidrio reciclado para bajar los costos.

La adición de otros óxidos a la sílice actúa como fundentes y reduce la temperatura líquida del material cerámico. El más poderoso es la soda,  $\text{Na}_2\text{O}$ , la cual reduce la temperatura de fusión de  $1720^\circ\text{C}$  a  $800^\circ\text{C}$  en la composición eutéctica.

En las condiciones actuales el horno en análisis tiene un consumo de energía muy elevado y con variación de temperatura. Se requiere diseñar un modelo matemático que nos dé el comportamiento del horno y los parámetros con los que se debe trabajar.

Existen varias técnicas de fundición dependiendo de las características del vidrio que se fabrique. Uno de los hornos utilizados en la industria de envases de vidrio son los Regenerativos. Estos utilizan los gases de la combustión para calentar el regenerador y después transferir esta energía que queda en los refractarios al aire de combustión. Los quemadores se colocan en las lumbreras de los gases de escape.

## 2. Operación de hornos regenerativos

### 2.1 Materia prima para el proceso de fabricación de vidrio

La materia prima utilizada para la fabricación de envases de vidrio tiene como elemento base la arena con alto contenido de sílice. Este tipo de arena en el país se la puede encontrar únicamente en las provincias fronterizas de Loja y Zamora, de donde viene para su procesamiento. Dependiendo del color, la composición del vidrio varía. (Ver Tablas 1)

Tabla 1  
Composición del Vidrio

Material	Porcentaje Vidrio Flint	Porcentaje Vidrio Ambar	Porcentaje Vidrio Verde
Arena Sílica	40	43	25
Caliza	15	10	7
Soda Ash	14	11	8
Feldespató	7	5	3
Componentes menores *	1	1	1
Casco	23	30	56

\* Los componentes menores para vidrio Flint son el Sulfato de Sodio, Selenio y Carbón

\* Los componentes menores para el vidrio ámbar son el Sulfato de Sodio, Escoria de hierro, Pirita de Hierro y Carbón.

\* Los componentes menores para el vidrio verde son el Sulfato de Sodio, Escoria de hierro, Pirita de Hierro y Carbón.

Los porcentajes de materia prima difieren en la medida que se utilice más o menos casco. La

importancia del abastecimiento del vidrio reciclado en las fábricas de producción de vidrio radica en la disminución de la temperatura de fundición de la materia prima, lo que implica menos energía. Se requiere de menos combustible para fundir el vidrio ya procesado que fundir materia prima virgen. La única fábrica de vidrio que tiene el Ecuador tiene un consumo de 1.000 toneladas mensuales de Casco.

El porcentaje de utilización de Casco como materia prima, tiene una gran influencia en un índice de Transmisibilidad del vidrio o Transmitancia (Ver tabla 2). Este índice determina la cantidad de luz que puede pasar a través del vidrio y está dada en nanómetros. Esta varía dependiendo del color del vidrio, es así que para el Vidrio Flint debe de ser entre 50 hasta el 60. Utilizando más casco como materia prima, puede originar que este índice baje y le dé un tono verdoso en la apariencia del vidrio.

Tabla 2  
Índice de transmisibilidad del vidrio

VIDRIO	INDICE (en nanómetros)
Flint (Blanco)	50 – 60
Verde	20 – 30
Ámbar (café)	15 – 25

### 2.2 Consumo de energía en un horno regenerativo

Los hornos realizan la reversión cambiando de puerto cada treinta minutos, pasando el aire que va a combustionarse por la cámara pre-calentada con los gases de escape. La temperatura de precalentamiento puede alcanzar hasta  $1500^\circ\text{C}$ , lo cual permite conseguir una eficiencia térmica muy elevada. Existen 2 tipos de hornos regenerativos, los endport y los sideport. Como su palabra lo indica, los endport tienen sus puertos regenerativos en un extremo de la cámara de fundición y el flujo de material se dirige hacia el otro extremo. Los sideport tienen sus puertos en las paredes laterales y el flujo de material corre paralelo a los puertos. Para el caso del horno en estudio, es del tipo endport y fue construido en 1996. Este horno ha tenido 3 reparaciones y actualmente tiene el regenerador izquierdo colapsado.

El Horno es alimentado por la compuerta de entrada a través de un sin fin denominado hidramix. Para el caso del horno endport se encuentra en uno de sus laterales. El hidramix alimenta la materia prima con una frecuencia determinada al horno dependiendo de la extracción que se esté dando en las máquinas formadoras.

Los quemadores están ubicados en la pared trasera del horno, funcionan con combustible (Fuel Oil 6) que es precalentado e inyectado dentro de la cámara, además utiliza aire comprimido que la atomización. La temperatura histórica de precalentamiento del combustible es de  $100^\circ\text{C}$  por los últimos 30 años de existencia de la empresa. El estado de los quemadores

es un punto muy importante para el análisis, además del mantenimiento de sus partes.

En la operación de los quemadores es necesario mantener una presión de atomización de 40 PSI en cada uno de los 8 quemadores. Los quemadores están distribuidos de 4 en 4 y prenden alternadamente cuatro en el lado izquierdo y cuatro en el lado derecho. Este proceso lo realizan cada 30 minutos, para poder realizar la transferencia de energía en los regeneradores.

Para entender la operación de los hornos regenerativos se debe de asumir un tiempo cero, el aire para la combustión ingresa por el regenerador izquierdo al horno, se realiza la combustión y los gases de escape salen por el regenerador derecho haciendo que los refractarios que lo conforman ganen temperatura. Después de 30 minutos, se realiza la reversión y por el lado donde salían los gases, empieza a ingresar el aire de combustión, haciendo que gane temperatura y disminuya la cantidad de energía necesaria para el proceso de combustión. Los gases de combustión salen por el regenerador izquierdo, haciendo que ahora éste gane la temperatura y lo prepare para el siguiente ciclo. Estos hornos se llaman regenerativos.

Del horno, el vidrio se traslada hasta el refinador, el cual es una cámara que distribuye el vidrio a través de los alimentadores a cada una de las máquinas.

### 3. Herramientas Lean Six Sigma

Los conceptos LEAN fueron propuestos por Toyota y posteriormente adoptado por otros fabricantes japoneses. Originalmente se centra en reducir los desperdicios en la fabricación:

Las herramientas y terminologías Lean son:

- Reducción del Tiempo de Configuración
- Mantenimiento Total Productivo
- Balance de Procesos
- Mejoramiento del flujo de proceso
- Prueba de errores
- Herramientas de Control Visual
- Aplicación del flujo de valor
- Análisis de la trampa de tiempo
- Sistema Genérico de Arrastre
- Arrastre de Abastecimiento
- Análisis del tamaño del lote
- Estrategia de Abastecimiento
- 5S

Los conceptos SIX SIGMA incluyen el uso de herramientas estadísticas y enfoque estructurados de solución de problemas. Enfatiza la necesidad de controlar el promedio y la variabilidad del proceso. El Nivel de Calidad Sigma o SQL (por sus siglas en inglés Sigma Quality Level), es la medida que se usa para indicar la frecuencia con la que ocurren los defectos. Las herramientas Six Sigma son:

- Indicadores de Repetibilidad y reproducibilidad

- Cp y Cpk, son los índices que miden la capacidad del proceso para estar dentro de los límites deseados.
- Cuadro Multivariable
- Mapa de efectos principales
- Mapa de interacciones
- Análisis de regresión
- Análisis de varianza (ANOVA)
- Matriz Causa y Efecto
- Análisis de Modalidad de falla y efecto (FMEA, por sus siglas en inglés, Failure mode effect analysis)
- Diseño de experimentos
- Pruebas de hipótesis
- Metodología de superficie de respuesta

El enfoque estructurado se debe a la Metodología de las cinco etapas DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Implementar y Controlar). Además la introducción de modelos matemáticos  $Y = F(x_1, x_2, \dots)$  para concentrarse en mejorar el proceso crítico de entradas, en lugar de sólo el de las salidas

Lean Six Sigma se ha extendido para cuantificar y atacar los costos de la complejidad. La complejidad producto/servicio es la gestora del desperdicio que no añade valor y origina problemas de calidad.

### 3.2 Lanzamiento de un Proyecto DMAIC

El procedimiento para el lanzamiento de un proyecto en el enfoque Lean Six Sigma, sigue el siguiente esquema:

- Creación de la carta del proyecto
- Aplicación de la Metodología DMAIC
- Término del proyecto

La carta del proyecto es la parte donde se describe el problema y su magnitud. El proyecto debe de tener un nombre con su descripción, respondiendo a las siguientes preguntas:

- ¿Qué está ocurriendo?
- ¿Cuándo empezó el problema?
- ¿Dónde ocurre?
- ¿Cuál es la magnitud del problema?

Los objetivos del proyecto deben de ser medibles. Los compromisos de tiempo deben ser claramente identificados, así como los costos del proyecto. Debe delimitarse el proyecto, es decir definir qué está dentro y qué está fuera del mismo.

Todo proyecto debe de tener: un patrocinador, un representante financiero y un Green o Black Belt

### 3.3 Herramientas DMAIC utilizadas

Todos los proyectos Lean Six Sigma siguen la metodología DMAIC y cada etapa utiliza una serie de herramientas que entraremos a detallar y que se utilizarán en el presente trabajo.

En la Fase DEFINIR se debe de determinar la Voz del Cliente VOC (Voice of Client por sus siglas en inglés), la Voz del Negocio VOB (Voice of Business

por sus siglas en inglés), el área de enfoque, desarrollar la carta del proyecto, el SIPOC (por sus siglas en inglés Supplier, Input, Process, Output, Client) y el Mapa del Proceso

La voz del cliente y la voz del negocio se levantan mediante tres herramientas:

- Entrevistas
- Encuestas
- Grupos de Enfoque (Son grupos formados por los clientes y por las personas involucradas con el negocio para obtener la información necesaria para el proyecto)

El área de enfoque, se determina definiendo el alcance del proyecto, que es la parte del proceso que se va a analizar. Con esto se desarrolla la carta o cuadro del proyecto.

Una vez definida la carta del proyecto, se debe de desarrollar el cuadro de SIPOC (Ver fig. 1), en el que se incluye todo el funcionamiento del proceso actual. Es necesario definir quienes son los proveedores del proceso, cuales son las entradas, cual es el proceso en análisis, cuales son las salidas y finalmente cuales son los clientes. Un ejemplo de esto vamos a ver en el capítulo 4. Dentro del proceso, es necesario el desarrollo del diagrama de flujo de cada uno de los pasos del proceso, también llamado Mapa del proceso.

En la fase MEDIR se debe definir las variables que afectan el proceso:

- Identificar la variable de salida " Y "
- Calcular el tiempo de espera total del proceso
- Desarrollar el plan de recolección de datos
- Realizar el análisis del sistema de medición
- Desarrollar cuadros de control
- Determinar la capacidad del proceso
- Establecer medición de la línea base
- Identificar oportunidades de mejoras rápidas

Una vez identificadas tanto las variables de entrada como las de salida del proceso, es necesario hacer un levantamiento de datos. Mediante cuadros de control se determina la variación natural del proceso actual y es necesario determinar la capacidad del proceso ( $C_p$  y  $C_{pk}$ ) de trabajar en los límites esperados.

Una parte muy importante en la fase medir es el análisis del sistema de medición. Las propiedades que son necesarias en un sistema de medición son la exactitud, precisión, discriminación, estabilidad y linealidad.

En la fase ANALIZAR se determina las variables de entrada que afectan el proceso

- Identificar las variables claves del proceso " x "
- Matriz de Causa y Efecto
- Análisis de modalidad de fracaso y efecto - FMEA
- Análisis de Varianza - ANOVA
- Cuadros de efectos principales
- Análisis de regresión

Cuando se tiene muchas variables y no se conoce cual de ellas se puede expresar en términos de las demás; es decir, cual puede actuar como variable

dependiente, se debe tratar de analizar la relación de dependencia entre las demás variables. Esta relación de dependencia se puede ver de varias maneras:

- Entre pares de variables
- Entre una variable y las demás
- Entre pares de variables pero eliminando el efecto de las demás (análisis de correlación parcial)
- Entre todas las variables.

Al determinar la dependencia lineal entre dos variables nos permite conocer si estas están relacionadas; es decir si una de ellas se puede expresar en función de la otra, lo cual implicaría que una de ellas aporta la misma información que la otra. Por tanto si las dos variables están presentes en el modelo sería redundante. Esta relación de dependencia entre

dos variables  $X_i$  y  $X_j$  se puede visualizar mediante el gráfico de Matrix Plot (Ver figura 3.7) y calcular mediante el coeficiente de correlación lineal de Pearson, dado por:

$$r_{ij} = \frac{Cov(X_i, X_j)}{\sqrt{varX_i} \sqrt{varX_j}}$$

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas, determina que tan fuerte afecta una determinada variable sobre otra, y si la afecta en forma negativa o positiva, es decir si es inversa o directamente proporcional.

El Valor-P asociado a un resultado observado es la probabilidad de obtener un valor como el observado o más extremo si la hipótesis nula es cierta. Para que exista el 95% de probabilidad de que los datos observados tengan una relación, el Valor-P debe de ser menor que 0,05.

El número de relaciones incluidas en un modelo depende de los objetivos para los que se ha diseñado el mismo y el grado de explicación que se pretende obtener.

Desde el punto de vista matemático, la relación entre una variable y otra se expresa mediante el modelo  $y = f(x)$ , en el cual, los argumentos de la función constituyen las variables independientes o variables explicativas y la variable  $y$  constituye la variable dependiente o explicada. Igualmente este modelo puede estar regido por una relación lineal, cuadrática, logarítmica, etc.

Por otro lado, si la relación existente es una relación no lineal, se puede utilizar algún criterio matemático para transformar dicha relación en otra lineal equivalente. Por ello en este punto se pretende resolver el sistema o modelo lineal desarrollado mediante el uso del programa Minitab.

Después de haber comprobado la independencia de las variables, es necesario aplicar la herramienta < Best subsets regresión, o mejores subconjuntos.> que permite realizar un análisis más detallado usando el criterio del máximo  $r^2$ , examinando primero modelos de regresiones de un predictor, seleccionando después

los dos modelos que proporcionan el máximo  $r^2$ . Mintab muestra los resultados de dichos modelos y examina ahora los modelos de dos variables predictoras, selecciona dos de los modelos que tengan el mejor  $r^2$  y visualiza los resultados; este proceso continúa hasta que el modelo contenga todos los predictores.

Una vez determinados las variables predictoras, es necesario realizar regresiones o anovas para obtener el modelo.

En la fase IMPLEMENTAR se determina cuales son las variables principales que afectan el proceso y con el modelo ya determinado se busca las soluciones potenciales.

- "x" críticas confirmadas
- Desarrollar soluciones potenciales
- Seleccionar solución
- Optimizar el proceso
- Solución Piloto
- Desarrollar nueva capacidad del proceso

En la fase CONTROL se desarrolla un plan para mantener dentro de parámetros el proceso mejorado.

- Eliminar Defectos
- Escribir el plan de control
- Calcular mejoras financieras
- Documentar proyecto para futura implementación
- Traspasar el proyecto al patrocinador.

Para asegurar que el proceso permanezca bajo control es necesario el desarrollo de SOP's (por sus siglas en inglés Procedimientos Estándares de Operación), planes de control, control de procesos y SPCs (por sus siglas en inglés de Control estadístico de procesos)

#### 4. Optimización del proceso de fundición del vidrio.

En la fase DEFINIR del proyecto se determina que el problema de la Industria de vidrio era un elevado consumo de energía en la operación de su horno, alrededor de las 5000 MJ/ton. Se requiere de un plan de acción para reducir el consumo de energía. Cada MJ/Ton tiene un costo aproximado de \$ 26,3. Lo que agrava el problema es que el horno en estudio tiene un daño en la corona del horno lo que implica constante reparación en caliente. Se cree que al disminuir el consumo de combustible, va a generar una disminución en el mantenimiento y un posible incremento de pull que serán estimados.

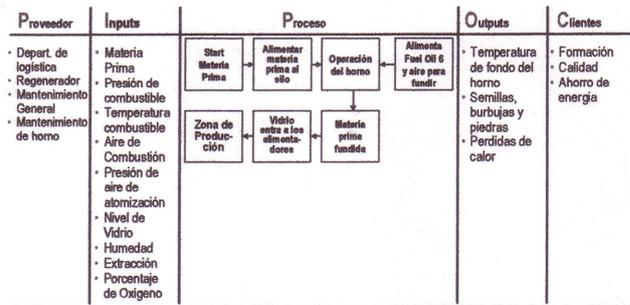
El alcance del proyecto empieza desde el silo de materia prima, la operación de los quemadores, la operación de los regeneradores hasta la garganta del horno. Además debemos de considerar las reparaciones hechas hasta el momento de la corona.

Para el análisis del proyecto se debe de considerar que el horno tiene un comportamiento diferente para los diferentes colores de vidrio y para los diferentes porcentajes de casco que se tenga en la mezcla.

Mediante encuesta realizada se determina la voz del cliente.

**Tabla 3**  
**Voz del Cliente**

Cliente	VOC Voz del Cliente	Problema Clave del Cliente	Requerimiento Crítico del Cliente
Quien es el cliente?	Que es lo que el cliente quiere del proyecto?	Se necesita especificar los problemas para prevenir el malestar del cliente	Determinar las necesidades críticas y transformarlas en requerimientos específicos y medibles
Zona Caliente. Área de fabricación de envases	Requiere de Vidrio con temperatura de fondo del horno dentro de control	Estabilidad en la temperatura de los alimentadores y no variación de la densidad	Temperatura de fondo estable No afectar al PTM
CEO	Reducir el consumo de MJ/Ton en el horno	Estabilidad en el proceso	Disminuir el consumo de bunker en el horno
Calidad	Buena calidad de vidrio	Sin semillas, ni burbujas ni piedras	Conteo de semillas, burbujas y piedras



**Figura 1. SIPOC**

Mediante entrevistas y reuniones de grupo se busca analizar los diferentes riesgos que se puedan presentar en la ejecución del proyecto. (ver Tabla 4)

**Tabla 4**  
**Análisis de Riesgo**

Riesgo (Identificado, categorizado)	Probabilidad de ocurrencia del riesgo (10 Low-10 No)	Impacto del riesgo (10 No-10 High)	Prioridad (Probabilidad x Impacto) (10 No-100 High)	Acciones para reducir la probabilidad	Acciones para reducir el impacto	Dueño	Día en forma de acción	Status of Acción
Temperatura de fondo fuera de control	2	8	16	Incrementar el consumo de combustible	Realizar movimientos ligeros en operación	Raymond	01/01/09	
Problemas de producción	1	8	8	Incrementar el consumo de combustible	Evaluar los datos y haciendo seguimiento a los incrementos	Tomás	01/01/09	Done
Resistencia del Personal	1	10	10	Involucrar al personal con ideas	Comunicación de la ideas al equipo	Carlos	01/02/09	Reunion con personal
Sin soporte por parte de la Gerencia	1	10	10	Revisar alimentación de avances	Feedback constante a la gerencia de resultados	Carlos	12/12/08	Informe semanal a CEO

#### 4.1 Análisis de Parámetros Operativos.

Una vez determinados los parámetros que afectan el proceso de fundición de vidrio se realizó las mediciones para determinar las pérdidas de energía del proceso, esto se lo realizó en las fases Medir y Analizar de las herramientas Lean Six Sigma.

Durante la fase MEDIR, se determinó el consumo promedio y la capacidad del proceso actual, además se realizó un mapa del flujo del proceso con sus respectivas variables. Mediante un diagrama de espina de pescado se definió las variables críticas del proceso.

Para la determinación de la LÍNEA BASE, se levantan los datos del MJ/Ton y se los muestra en el gráfico I-MR. (Ver Fig. 2)

El MJ/Ton contiene datos desde Enero hasta Septiembre del 2008. Esta es nuestra línea base, la que

nos dio un promedio de 5141 MJ/Ton. Se levantaron 159 datos con cero subgrupos.

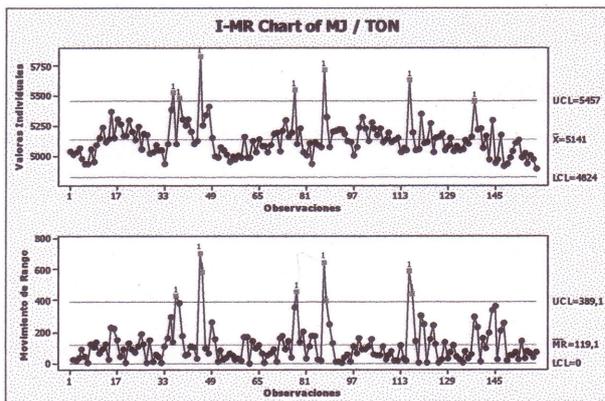


Figura 2.. I-MR, Carta de Control de MJ/Ton diario.

Con los datos, se determinó la Capacidad actual del proceso (ver Fig. 3). Se obtiene una desviación estándar de 150,19 MJ/Ton, el CP es 1.00 lo que indica que el proceso necesitaba ser centrado a los límites. El proceso actual tiene un nivel sigma de 3,31.

Se desarrolla el mapa de flujo del proceso para el análisis de las variables que afectan el consumo de combustible, incluyendo información detallada de cada variable. (Ver Fig. 4)

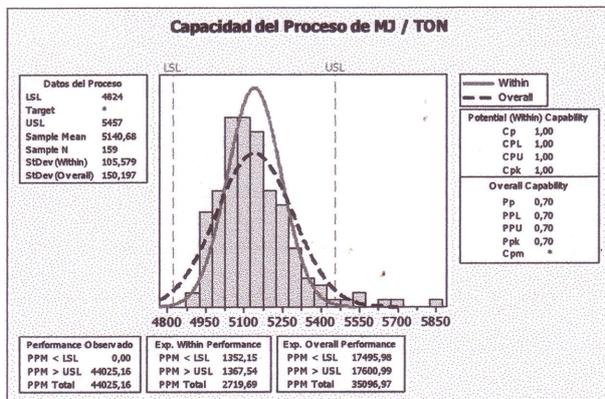


Figura 3. Capacidad del proceso, consumo MJ/Ton

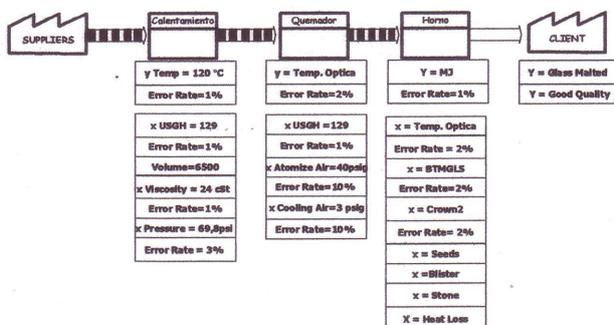


Figura 4. Mapa de flujo del proceso de fundición. Se determina las VARIABLES DE OPERACIÓN que afectan el consumo.

Y – Se definió como Variable de Salida los Galones de Combustible por día. (OILDAY) Este es la variable

utilizada por el operador para su operación y la que afecta los MJ/Ton.

X – Se definió como Variables de Ingreso las siguientes:

- Presión de Atomización
- Temperatura de Combustible
- Temperatura de Corona 1 (Crown2)
- Temperatura de Corona 2 (Crown3)
- Temperatura de Fondo 1 (BTMBLK)
- Temperatura de Fondo 2 (BTMGLS)
- Nivel de Vidrio (GLEVEL)
- Temperatura Óptica
- % de Humedad de Mezcla
- % de Exceso de Oxígeno
- Porcentaje de Casco
- Extracción de Vidrio Diaria o Pull

Se crea la HOJA DE DATOS OPERACIÓN HORNO, para el levantamiento de las variables. Ver apéndice A, B y C.

Durante la fase ANALIZAR y después de haber realizado el levantamiento de los datos, se realizan un análisis para encontrar la relación que se tienen entre ellos y descartar influencias relativas. El Matrix Plot muestra en forma gráfica las tendencias de las seis variables analizadas que afectan al consumo diario de combustible. Se observa que en la medida que se incrementa el pull y la temperatura óptica se incrementa el combustible. En cuanto al porcentaje de casco, la temperatura del fondo del horno BTMGLS, el porcentaje de humedad y la presión de atomización no se observa mayor efecto (Ver Fig. 5).

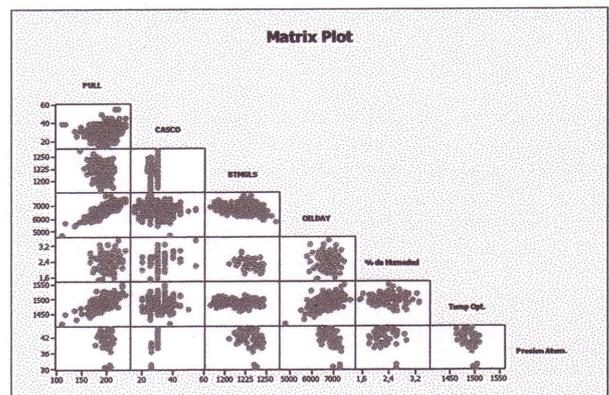


Figura 5 Matrix Plot de variables de operación del horno

Después de haber analizado las variables que afectan el proceso de fundición de vidrio, se aplicó Best Subsets o mejores subconjuntos, para lo cual es necesario entender como trabaja el estadística Mallows Cp:

Si la ecuación con  $p$  parámetros es adecuada, esto es, no tiene falta de ajuste, se tiene que la estimación de  $\sigma^2$  con  $p$  variables ( $CM_{Error(p)}$ ) debe estar muy cercana a la estimación de  $\sigma^2$  con todas las  $k$  posibles variables predictoras ( $\sigma^2$ ).

**TABLA 5**

**Best Subsets Regression: OILDAY**

Response is OILDAY

44 cases used, 734 cases contain missing values

Var	R-Sq	R-Sq(aj)	Mallows		S	L O M d . .	P % r e d s e i T o e H n m O u p C I m A P A L e t O U S T d o p L C E a m t
			Cp	S			
1	69,6	68,8	127,5	154,30	X		
1	67,8	67,0	137,1	158,69		X	
2	83,8	83,0	51,1	113,94	X		
2	83,1	82,3	54,8	116,25	X	X	
3	89,3	88,5	23,0	93,850	X		X X
3	89,1	88,3	23,7	94,391	X X	X	X
4	91,5	90,6	12,9	84,700	X X	X	X X
4	91,1	90,2	14,7	86,345	X	X	X X
5	92,7	91,7	8,1	79,400	X X	X	X X X
5	92,2	91,2	10,7	81,931	X X	X X	X X
6	93,3	92,2	7,0	77,272	X X	X X	X X X

De acuerdo con los análisis previos, para obtener finalmente el modelo matemático que explique el consumo de combustible por hora vamos a definir como variables que afectan al proceso las siguientes:

- Pull
- Porcentaje de Casco
- Color de Vidrio
- Temperatura Óptica
- Temperatura de Combustible
- % de Humedad de Mezcla
- % de Exceso de Oxígeno
- Presión de Atomización

**4.2 Optimización del Proceso.**

Durante la fase IMPLEMENTAR y luego de haber obtenido las ecuaciones para los tres tipos de vidrio producido en esta industria, se realizan variaciones de los diferentes parámetros para así poder obtener el consumo de combustible más óptimo para el proceso. Se observa que dentro del análisis realizado la medición de la presión del aire de atomización se la realiza en un punto situado a 8 metros del área de consumo en los quemadores. Se procede a medir la presión de atomización en cada punto de los quemadores y los 3 que se encuentran mas alejados del medidor obtienen presiones por debajo de lo requerido, lo que afecta finalmente con la atomización del combustible. La presión mínima requerida es de 40 PSI y las mediciones en estos quemadores daban 25 PSI. Se procede con el cambio del compresor que alimenta el aire a los quemadores, del compresor 50 PSI a alimentar con el de 70 PSI y se adaptaron

reguladores en cada quemador para poder obtener la presión requerida del sistema.

Otra de las variables que se empezó a modificar fue la temperatura de precalentamiento de bunker, combustible utilizado en el proceso. La temperatura máxima utilizada para la operación era de 100°C, con el fin de mejorar la atomización del bunker dentro de la cámara del horno, se incrementa progresivamente hasta 125°C, esto es 10°C menos del punto de inflamación recomendado por el proveedor de combustible. El enfoque en esta etapa, fue de mejorar el funcionamiento de los quemadores, para optimizar la combustión. El mantenimiento de los quemadores era realizado cada semana y dentro del plan de mejora, se empieza a realizar mantenimientos diarios con el personal que opera el sistema.

Debido al tiempo que tiene operando el horno, desde 1996, se observa un deterioro en la corona, la cual tiene un 25% menos de aislamiento. Esto origina pérdida de calor que actualmente no es estimada. Dentro del análisis de la presente trabajo, se a determino un procedimiento para realizar el recubrimiento con el aislamiento requerido.

En el área de los quemadores, se observa un espacio libre por donde ingresa aire del ambiente, lo que también produce pérdidas de temperatura. Para evitar esta pérdida se diseña unos aisladores que se instalan antes de los quemadores para sellar el paso de aire. (Ver figuras 6, 7, 8)

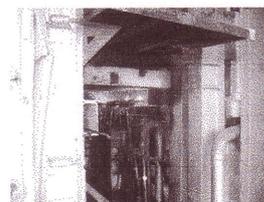


Fig. 6 Área de Quemadores (antes)

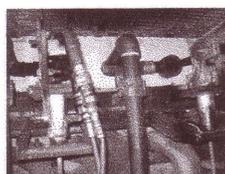


Fig. 7 Área de Quemadores (después)

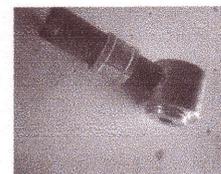


Fig. 8 Anillo sellador

**5. Análisis de Resultados.**

Mediante Regresión Múltiple se obtiene los siguientes modelos matemáticos, para cada uno de los colores de vidrio que se producen en la industria:

La ecuación obtenida de la regresión para vidrio Flint:

$$OILDAY = - 2370 + 12,1 PULL - 24,1 OILTEM - 217 \% \text{ de Humedad} + 14,3 \% O2 L - 11,9 Presion Atom. + 7,17 Temp Opt.$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	-2370	2272	-1,04	0,311	
PULL	12,137	1,841	6,59	0,000	2,784
OILTEM	-24,085	8,547	-2,82	0,012	2,145
% de Hum	-216,83	78,63	-2,76	0,013	4,109
% O2 L	14,25	14,76	0,97	0,348	1,545
Pres. Atom.	-11,90	7,537	-1,58	0,133	1,675
Temp Opt.	7,173	1,201	5,97	0,000	2,361

S = 52,6859 R-Sq = 97,6% R-Sq(adj) = 96,7%

La ecuación obtenida de la regresión para vidrio Ambar:

$$OILDAY = 5825 + 15,8 PULL - 12,1 CASCO - 70,8 \% \text{ de Humedad} + 0,267 Temp Opt. - 20,9 Presión Atom. - 7,22 OILTEM$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	5825	1956	2,98	0,006
PULL	15,775	2,372	6,65	0,000
CASCO	-12,117	2,593	-4,67	0,000
% de Hum.	-70,75	23,31	-3,04	0,005
Temp Opt.	0,2673	0,9113	0,29	0,771
Pres. Atom.	-20,92	10,89	-1,92	0,064
OILTEM	-7,219	7,008	-1,03	0,311

S = 76,3127 R-Sq = 82,9% R-Sq(adj) = 79,5%

La ecuación obtenida de la regresión para vidrio Verde:

$$OILDAY = -7739 + 0,11 PULL - 11,1 CASCO - 7,9 OILTEM + 0,7 Presión Atom. + 10,1 Temp Opt.$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-7739	2486	-3,11	0,005
PULL	0,110	3,631	0,03	0,976
CASCO	-11,103	1,881	-5,90	0,000
OILTEM	-7,88	10,96	-0,72	0,480
Pres. Atom.	0,66	21,68	0,03	0,976
Temp Opt.	10,105	1,732	5,83	0,000

S = 65,9408 R-Sq = 88,9% R-Sq(adj) = 86,3%

Durante la fase CONTROLAR con los modelos matemáticos obtenidos, se desarrolla una Hoja de control en la cual se ingresan 3 parámetros:

- Color de Vidrio
- Pull o extracción
- Porcentaje de Casco que se está utilizando

Esta hoja va a ayudar al operador en la toma de decisiones en cuanto a la cantidad de combustible necesario y el MJ/Ton que se va a obtener. (Ver Fig. 9)

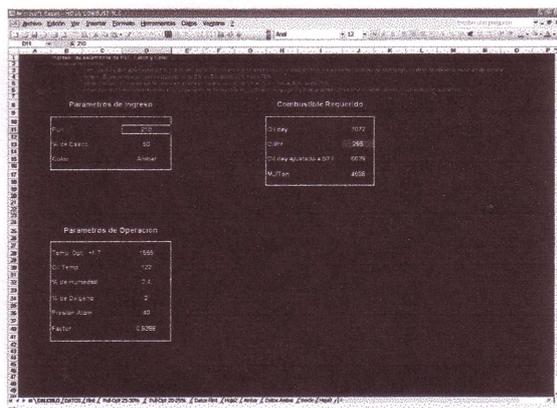


Fig. 9 Hoja de control para el combustible requerido.

Con las mejoras obtenidas en el proceso, el consumo de Bunker disminuyó un 5%, de un promedio de 205.000 galones en el 2008 hasta 194.000 galones en el 2009

Para el proyecto fue determinante el enfoque de optimización de la combustión y las pérdidas de calor que se observaron durante el desarrollo del mismo.

## 6. Agradecimiento

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo, de forma muy especial a esta prestigiosa Institución como es la ESPOL, que me a permitido desarrollarme profesionalmente, a mi familia y al Ing. Jorge Duque, por todo su apoyo.

## 7. Referencias

- [1] Lean Six Sigma for service, Autor George Michael. Copyright 2003 McGraw-Hill Companies
- [2] Manual de Entrenamiento Black Belt, George Group 2007
- [3] Manual de Operación de Hornos Regenerativos, Owens Illinois Glass Container 2005
- [4] Combustión de Combustibles Líquidos. Dr. Ing. E. Brizuela – Ing. J.C. Loza. 2001

## 8. Conclusiones

- Las herramientas Lean Six Sigma son una excelente herramienta para mejorar el control de calidad y para mejorar el comportamiento de cualquier proceso, siguiendo los pasos descritos en esta tesis.
- Mediante el desarrollo de la tesis se observó que la presión de atomización en todos los quemadores en un proceso en el que se trabaja con combustibles pesados, fuel oil, debe ser mínimo de 40 PSI para obtener una mejor pulverización del combustible en el horno.
- Para procesos que utilizan combustibles pesados la temperatura de precalentamiento es una variable crítica. Se pudo evidenciar que el consumo de combustible disminuyó al incrementar la temperatura de precalentamiento debido a que disminuye la viscosidad y mejora la combustión. Pero esta no debe de pasar la temperatura de inflamación del combustible, que para el caso del fuel oil 6 es de 140°C.
- Las pérdidas de calor que se originan por el desgaste natural del horno deben ser minimizadas mediante un programa de mantenimiento de la corona y siempre después de cada reparación es necesario volver a colocar el aislamiento para evitar estas pérdidas.
- Para optimizar el proceso de combustión es indispensable que todo el aire para la combustión ingresen por los regeneradores. Debido a esto se diseñaron los sellos de quemadores evitando que ingrese aire del ambiente a la cámara.