

ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO DE GAS
LICUADO DE PETRÓLEO (GLP) EN UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE
GALLETAS TIPO CRACKER

PALOMA CAROLINA AGUDELO TRIANA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2018

ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO DE GAS
LICUADO DE PETRÓLEO (GLP) EN UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE
GALLETAS TIPO CRACKER

PALOMA CAROLINA AGUDELO TRIANA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

DIRECTOR

LUIS JAVIER LÓPEZ GIRALDO
INGENIERO QUÍMICO, Ph.D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

A Dios, por todas sus bendiciones.

A mis padres, por su dedicación, amor y ejemplo, quienes siempre me han inspirado y a quienes agradezco inmensamente por todas las oportunidades que me han brindado y por hacerme la persona que soy hoy.

A mi hermana, por todo su cariño e incondicionalidad.

A mi familia, por cada palabra de apoyo y por creer en mí.

Este logro, de una u otra manera, les pertenece a ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería química por su formación a lo largo de estos años como profesional y como persona íntegra.

Al doctor Luis Javier López Giraldo, Director del Trabajo de grado, por su orientación, dirección y por creer y confiar en mí y en este proyecto.

A la empresa, por la gran oportunidad de hacer parte de su equipo de trabajo.

A Julián, por su increíble ayuda, paciencia y apoyo en la elaboración de este trabajo.

A Manuel Hidalgo, por toda su colaboración y apoyo en la empresa y su amistad en mi estadía en Guayaquil.

A los operarios de la empresa por su buena disposición siempre y su espíritu de ayuda.

A todos aquellos que aportaron en mayor o menor medida para la elaboración de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1. MARCO TEÓRICO	15
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	15
1.2. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	15
1.3. DESCRIPCIÓN DEL HORNO	16
2. OBJETIVOS	19
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. ALCANCE	20
4. METODOLOGÍA.....	21
4.1. ACCIONES DE GESTIÓN INTERNA	22
4.2. PROPUESTAS PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO DE GLP	23
4.2.1. Relación entre variables fisicoquímicas medibles en el proceso	24
4.2.2. Combustión y eficiencia del horno	25
4.2.3. Calidad del GLP	29
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	32
5.1. ACCIONES DE GESTIÓN INTERNA	32
5.2. PROPUESTAS PARA LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE GLP	34
5.2.1. Relación entre variables fisicoquímicas medibles en el proceso	34
5.2.2. Combustión y eficiencia del horno	38
5.2.3. Calidad del GLP	43
6. CONCLUSIONES.....	45
7. RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de zonas del horno.	18
Figura 2. Componentes principales del horno en cada zona	18
Figura 3. Diagrama de pescado	22
Figura 4. Simulación de horno en Aspen Hysys.....	28
Figura 5. Condiciones de las corrientes de simulación de eficiencia de horno.	28
Figura 6. Simulación de la mezcla de GLP.	31
Figura 7. Condiciones de las corrientes de simulación de mezcla de GLP.	31
Figura 8. Quemadores de una zona del horno en el panel de control.	33
Figura 9. Histograma del flujo de agua evaporada	35
Figura 10. Densidad de datos de flujo de agua evaporada	35
Figura 11. Consumo de GLP vs flujo de agua evaporado	37
Figura 12. Composición de GLP.	39
Figura 13. Composición de gases de chimenea	39
Figura 14. Consumo actual vs consumo con relación de mezcla ajustada.	40
Figura 15. Pérdidas de calor con diferentes relaciones de aire/combustible. ...	41
Figura 16. Flujo volumétrico vs exceso de aire	42
Figura 17. Eficiencia de la combustión vs exceso de aire	43
Figura 18. PCI y fracción de GLP vaporizado vs fracción de propano a la entrada.	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Temperatura de agua a agregar en masa según Temperatura ambiental.	23
Tabla 2. Estándar de especificaciones de la harina.	34
Tabla 3. Resultados de ANOVAS.....	37

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD y visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

ANEXO A. Análisis univariado.

ANEXO B. Análisis paramétrico.

RESUMEN

TITULO: Estudio de alternativas para la reducción de consumo de gas licuado de petróleo (GLP) en un proceso de producción de galletas tipo cracker*.

AUTORES: Paloma Carolina Agudelo Triana**.

PALABRAS CLAVE: Gas licuado de petróleo, GLP, galleta, cracker, horno, combustión, eficiencia.

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo se realizaron propuestas para la reducción de consumo de gas licuado de petróleo (GLP), en un horno industrial para la producción de galletas tipo cracker, dentro del marco de una práctica empresarial hecha en una fábrica de alimentos ubicada en Guayaquil, Ecuador.

Partiendo de una observación y diagrama de Ishikawa de las problemáticas, se enfocó el desarrollo de las propuestas en tres pilares principales: Primero, determinar si existe una posible relación entre las variables fisicoquímicas del proceso y el consumo de GLP, para tal fin se hicieron análisis univariados y multivariados por medio del programa R y se pudo concluir que ninguna de las variables fisicoquímicas estudiadas presentaba una correlación con el consumo de GLP. Segundo, se calculó la eficiencia energética del horno haciendo uso del simulador Hysys evaluando el impacto del exceso de aire sobre la eficiencia energética del horno. Los resultados obtenidos muestran que el exceso desproporcionado de aire que se ingresa a la combustión afecta significativamente la eficiencia del mismo y utilizar la cantidad adecuada de aire podría aumentarla en aproximadamente 20%. Tercero, se determinó la composición de GLP que favoreciera la combustión durante el proceso de horneado de galletas tipo cracker. Para tal fin, se simuló el horno en Hysys y se determinó la mejor relación entre composición del GLP, poder calorífico inferior y la fracción vaporizada del combustible. Los resultados sugieren que la composición más adecuada de GLP para la empresa es una en la cual no decaiga la fracción de propano por debajo de 0,72.

* Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Químico.

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. Luis Javier López Giraldo.

ABSTRACT

TITLE: Study of alternatives for the reduction of consumption of liquefied petroleum gas (LPG) in a process of cracker production*.

AUTHORS: Paloma Carolina Agudelo Triana**.

KEY WORDS: Liquefied petroleum gas, LPG, biscuit, cracker, oven, combustion, efficiency.

SUMMARY:

In this study, some proposals were made for the reduction of consumption of liquefied petroleum gas (LPG) in an industrial bakery oven for the production of crackers, within the framework of a business practice made in a food factory located in Guayaquil, Ecuador.

Based on an observation and the Ishikawa diagram of the problems, the development of the proposals was focused on three main pillars. First, to determine if there is a possible relationship between the physicochemical variables of the process and the consumption of LPG, for this purpose, some analyzes with univariate and multivariate through the R program were made and it was concluded that none of the physicochemical variables studied showed a correlation with the consumption of LPG. Second, the energy efficiency of the bakery oven was calculated using the Hysys simulator, evaluating the impact of excess air on the energy efficiency of the oven. The results obtained show that the disproportionate excess of air that enters the combustion significantly affects the efficiency of the oven, and using the appropriate amount of air could increase it by approximately 20%. Third, the composition of LPG that favored combustion during the cracker-type cookie baking process was determined. For this purpose, the oven was simulated in Hysys and the best relationship between LPG composition, lower calorific value and the vaporized fraction of the fuel was determined. The results suggest that the most suitable composition of LPG for the company is one in which the propane fraction does not fall below 0,72.

* Project to choose the title of Chemical Engineer.

** Faculty of physic and chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: PhD. Luis Javier López Giraldo.

INTRODUCCIÓN

En el mundo existen diferentes fuentes de energía, que pueden ser divididas en 3 categorías: combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural), energía nuclear y renovable (biomasa, residuos, energía solar, energía eólica, energía geotérmica y agua). Sin embargo, cerca del 85% de los requerimientos energéticos son suministrados por combustibles fósiles¹.

El GLP (gas licuado de petróleo) es un término usado para describir un grupo de gases basados en hidrocarburos derivados del petróleo crudo y/o del gas natural. Es principalmente propano, butano, o una mezcla de los dos, que también puede incluir etano, etileno, propileno, butileno, isobutano, isobutileno o pentano.

En Ecuador, el consumo de GLP se incrementa a una tasa de crecimiento anual del 6%; sin embargo, la producción nacional es insuficiente y para satisfacer esa demanda el Estado importa más del 80% del GLP comercializado².

Actualmente, la empresa objeto del presente trabajo cuenta con 7 hornos trabajando continuamente en el horneado de diferentes tipos de galletas, los cuales usan GLP como combustible y consumen alrededor de 50.000 m³ mensuales, siendo uno de los principales consumidores de GLP en Guayaquil.

A pesar de ser uno de los combustibles fósiles más amigables con el ambiente, es importante para la empresa mantener un carácter de responsabilidad ambiental y adicionalmente, reducir los costos relacionados al abastecimiento de dicho

¹ BAUKAL, Charles, et al. Industrial Combustion Pollution and Control. Combustion Fundamentals. New York. 2004. 890 p.

² MONTENEGRO, M. y PEÑAHERRERA, A. Modelo de mejoramiento de la productividad a través de herramientas de control y mejora caso: Repsol Duragas - Pífo. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito. 2012. pp: 1-18.

combustible; por esta razón se busca proponer alternativas para reducir el consumo de GLP en uno de los hornos, para la producción de una galleta tipo cracker.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

La fábrica objeto de este estudio se encuentra ubicada en Guayaquil – Ecuador y hace parte de una corporación multinacional creada en 1867, la cual está presente en Ecuador desde 1955 y cuya producción industrial se inició en 1970.

La corporación a la cual pertenece la fábrica comercializa diferentes productos alimenticios a lo largo de todo Ecuador como lo son: galletas, lácteos, bebidas envasadas, café, chocolate, culinarios, cereales, alimentos para mascotas, fórmulas infantiles, etc.

Sin embargo, la fábrica en la cual se realizó está centrada en la fabricación y empaque de galletas, waffers, chocolates y recubiertos (waffers o galletas cubiertas de chocolate).

1.2. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Para este estudio se tendrá en cuenta únicamente la fabricación de una galleta tipo cracker (g1), de acuerdo al requerimiento de la empresa por ser la de más alta demanda. La galleta g1 se fabrica en un horno que utiliza GLP como combustible, el cual trabaja las 24 horas del día de acuerdo a su programa de producción y en condiciones normales hornea alrededor de 1000 kilogramos de galleta g1 por hora, con un consumo promedio aproximado de 35 m³/h de GLP. La gerencia de la empresa propone estudiar alternativas que permitan reducir dicho consumo mediante cambios en las variables fisicoquímicas inmersas en el proceso; debido a que no se tiene conocimiento de la eficiencia del consumo de GLP en el horno, hace aproximadamente un año no se realizan calibraciones en la llama y no se tiene un

conocimiento claro con respecto a la proporción adecuada que se debe utilizar de aire y GLP, lo que permite suponer que se presenta un proceso de combustión que no es eficiente.

El estudio de este problema se justifica por razones técnicas, económicas, ecológicas y de responsabilidad social. El proceso técnico se mejora desde el punto de vista de los equipos y mantenimiento de ellos, lo cual es una premisa fundamental en la empresa. Desde el punto de vista económico ya que se disminuyen los costos presentes y desde el punto de vista ecológico y de responsabilidad social debido a que se reduce el consumo de un combustible no renovable que es sustentable pero no sostenible, lo que a su vez disminuye las emisiones de productos asociados con combustión incompleta que puedan estar produciéndose.

Si bien la justificación del problema se basa en los tres pilares descritos anteriormente; el alcance de este trabajo está destinado en la propuesta de alternativas que permitan eventualmente reducir el consumo de GLP, con lo cual se puede impactar en los pilares mencionados.

1.3. DESCRIPCIÓN DEL HORNO

El propósito principal del horneado es convertir la mezcla de masa en un producto atractivo y sabroso. Es considerado el proceso más importante durante la producción de galletas, en donde se transforma la masa en un producto ligero, poroso y de fácil digestión. Los cambios más importantes que se observan durante el horneado son el incremento del volumen, la formación de costra, la inactivación de

levaduras y enzimas, la estabilización de las proteínas, la gelatinización parcial del almidón y la pérdida significativa de humedad ^{3 4}.

Durante el horneado, el calor es transferido por conducción, convección y radiación. El vapor de agua, las moléculas de aire y los gases de combustión circulan a lo largo de la cámara de horneado y transfieren el calor por convección hasta que hacen contacto con las superficies sólidas de las paredes y la banda transportadora. Entonces el calor transferido se vuelve de conducción. El calor por radiación proviene de las superficies metálicas calientes y de los quemadores.⁵

Existen diferentes tipos de hornos utilizados para la cocción de galletas, el horno en el cual se realizó el estudio es de tipo túnel, el cual consiste en una cámara de 100 m de largo, 1,88 m de alto y 2 m de ancho cuya fuente de calor es el GLP y utiliza 160 quemadores de tuberías perforadas, quemadores de tubería con selector distribuidor de llama (3 zonas) y quemadores infrarrojos distribuidos a lo largo de toda la cámara del horno en la parte superior e inferior. Está dividido en 5 zonas y una precámara, cada una tiene un diferente control de temperatura y una regulación específica para efectuar los cambios que sean requeridos en el horneado de la galleta (ver Figura 1). La llama de los quemadores se activan directamente desde un panel de control digital y las galletas son horneadas en un tiempo que va en un rango de 4 – 12 min, siendo 4,4 min el tiempo aproximado de horneado de las galletas tipo g1 que son llevadas a lo largo de la cámara por una banda transportadora de 1,20 m de ancho.

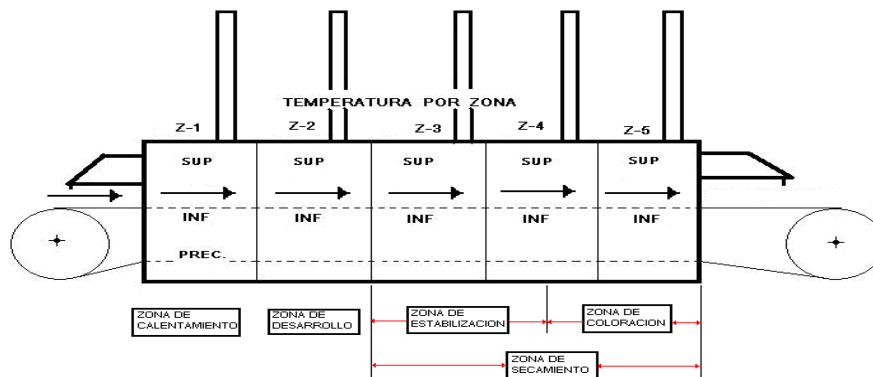
³ VARZAKAS, T. y TZIA, C. Handbook of food processing. Food safety, quality and manufacturing processes. Cap 7. Bakery Technology. 2015. P: 209.

⁴ FERREIRA, R. et al. Engineering Aspects of Cereal and Cereal-Based Products. Cap 8. Confectionary Baking. New York. 2014.

⁵ FARID, M. et al. Mathematical Modeling of Food Processing. National University of Singapore. Cap 13. Baking Process Mathematical Modeling and Analysis. New York. 2010.

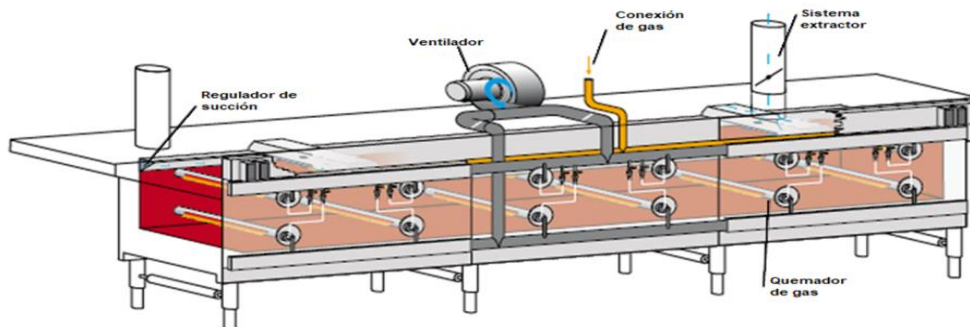
El horno también cuenta con 5 válvulas de extracción las cuales controlan la salida de humedad y/o gases que deben ser liberados (ver Figura 1 y Figura 2).

Figura 1. Distribución de zonas del horno.



Fuente: PORTILLA, Stalin.⁶

Figura 2. Componentes principales del horno en cada zona



Fuente: DAVIDSON, Iain.⁷

⁶ PORTILLA, Stalin. Manual de operación del horno. Versión 2. 2012. 30 pp.

⁷ DAVIDSON, Iain. Biscuit Baking Technology. Processing and Engineering Manual. Chapter 7. Oven Construction: Direct Gas-Fired Ovens. Pp: 113-117. 2016.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer alternativas para la reducción de consumo de gas licuado de petróleo (GLP) en un proceso de producción de galletas tipo cracker.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar si existe una relación entre las variables fisicoquímicas del proceso de horneado y el consumo de GLP.
- Determinar la eficiencia energética del horno empleado para el horneado de galletas tipo g1 y proponer acciones para reducir el consumo de GLP.
- Determinar la composición de GLP que favorezca la combustión durante el proceso de horneado de galletas tipo g1.

3. ALCANCE

El presente proyecto incluye el estudio de la línea de producción de galletas g1 en la fábrica mencionada, haciendo énfasis especial en el horno y su comportamiento durante la fabricación de ese tipo de galleta únicamente, por requerimiento de la empresa.

El alcance del proyecto contempla la propuesta de alternativas de mejora en la línea de producción, que conlleven a lograr una reducción de consumo del combustible utilizado en el horno (GLP); a través de un análisis de las variables implicadas en este proceso. La ejecución de las alternativas de mejora está sujeta a la aprobación y desarrollo por parte de la empresa; la decisión de la realización depende de los costos implicados, la magnitud de los cambios a realizar y las repercusiones que conlleve; en consecuencia, no hacen parte del alcance de este trabajo.

4. METODOLOGÍA

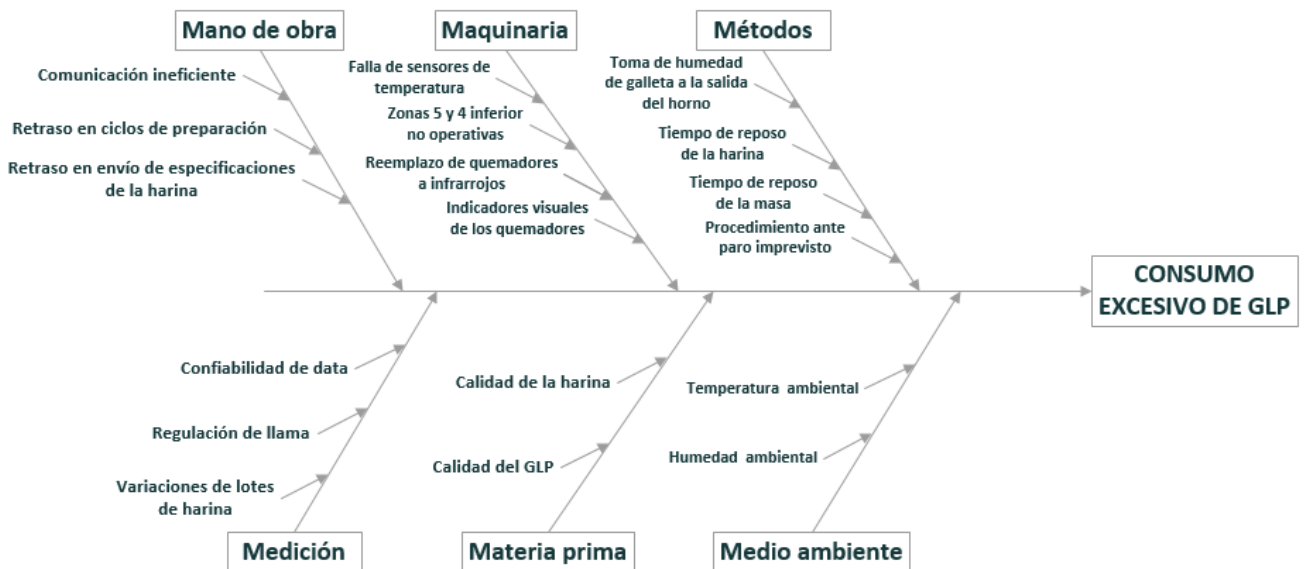
Para lograr la reducción de consumo de GLP en el horno, como primera medida durante el transcurso de la práctica se realizó un diagrama de causa y efecto o diagrama de pescado. El objetivo de este diagrama, fue identificar todas las posibles fallas que se estén presentando a lo largo del proceso de producción de galletas g1. Este método desarrollado por Ishikawa mientras trabajaba en un proyecto de control de calidad, consiste en definir un problema, el efecto, como la “cabeza de pescado” e identificar los factores que contribuyen a su conformación, las causas, como las “espinas del pescado”⁸. Estas causas son descritas por 6 categorías principales, las 6M de calidad: Mano de obra, maquinaria, métodos, medición, materia prima y medio ambiente⁹ (ver Figura 3).

Teniendo en cuenta el diagrama de la Figura 3, se llevaron a cabo diferentes acciones con el fin de proponer posibles soluciones que conllevaran a reducir el consumo de GLP. Por un lado, las acciones de gestión interna dentro de la empresa las cuales no serán objeto de estudio detallado en esta propuesta y por el otro las acciones asociadas con variables fisicoquímicas a las cuales se les dio énfasis y serán estudiadas más adelante.

⁸ NIEBEL, Benjamin y FREIVALDS, Andris. Ingeniería Industrial. Métodos, estándares y diseño del trabajo. 2009. Pp: 19-20.

⁹ ISHIKAWA, Kaoru. Qué es el control total de calidad. La modalidad japonesa. 141p.

Figura 3. Diagrama de pescado



4.1. ACCIONES DE GESTIÓN INTERNA

Para encontrar posibles problemas en el proceso de preparación que contribuyeran al consumo excesivo de GLP, se realizó una encuesta a lo largo de la línea de producción, a los operarios del segundo turno (7 am – 3 pm), en donde se les cuestionó acerca de los inconvenientes más relevantes que les dificultaran realizar su trabajo adecuadamente. Cada área de producción (preparación de masa, laminación y horneado) proporcionó diferente información, la cual posteriormente fue comunicada al área encargada del control energético de la empresa en una reunión programada y de allí fue escalada en diferentes reuniones a las áreas encargadas del debido proceso (mantenimiento, control de calidad, producción).

Los problemas encontrados a partir de este procedimiento corresponden a las ramas de mano de obra, maquinaria, métodos, las variaciones de los lotes de harina dentro de la rama de medición y la calidad de la harina dentro de la rama de materia prima.

Con respecto a la rama de medio ambiente los operarios ya se encuentran realizando las medidas pertinentes sobre la preparación de la masa para contrarrestar estos cambios de temperatura y humedad ambiental. Las medidas tomadas por los trabajadores se hacen directamente variando la temperatura del agua que se utiliza al preparar la masa, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Temperatura de agua a agregar en masa según Temperatura ambiental.

Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Agua (°C)	Temperatura Masa (°C)
26-28	26-29	36-37,5
28-30	24-25	36-37,6
30-32	23-25	36-37
32-34	22-24	36-37
34-36	20-22	36-37
36-38	20-22	35,5-36,5

Fuente: Empresa.

4.2. PROPUESTAS PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO DE GLP

A partir del diagrama de pescado (ver Figura 3) se estudiaron los problemas de confiabilidad de datos y regulación de llama provenientes de la rama de medición, así como la calidad del GLP proveniente de la rama de materia prima. Como primer eje, se planteó buscar en qué condiciones se encontraban las variables que podrían implicar el exceso de consumo de combustible en el horno, lo cual se desarrolla en la sección 4.2.1 Posteriormente se hizo un análisis de la combustión en el horno de acuerdo a la regulación de la llama, es decir la cantidad de aire que es ingresada y su implicación en la eficiencia energética, en la sección 4.2.2. Por último, se planteó un análisis de la calidad del GLP más adecuada para las condiciones de la empresa como se explica en la sección 4.2.3.

4.2.1. Relación entre variables fisicoquímicas medibles en el proceso. Inicia con la recopilación de la información histórica sobre el consumo de GLP en el horno, así como de diferentes variables que podrían afectar dicho consumo a lo largo del proceso de horneado, las cuales fueron: % de humedad en la galleta, % de humedad en la masa, temperaturas superior e inferior de las zonas del horno y pesos de la galleta a la entrada y salida del horno con los que fue posible calcular el flujo de agua evaporado durante el horneado. Dicho flujo de agua evaporado se calculó restando del peso de la galleta a la salida del horno el peso de la galleta a la entrada del horno, para obtener la cantidad de agua que se evaporó en el proceso de horneado.

Con lo anterior, se hizo un estudio univariado a cada variable usando el programa R y el paquete estadístico R-Commander, con el cual se hicieron las pruebas de normalidad (la prueba de Shapiro Wilk y la prueba de Kolmogorov-Smirnov), histogramas y gráficas de distribución de cuartiles con el fin de verificar si era posible aplicar un análisis multivariado paramétrico, buscando eliminar los puntos atípicos registrados en la matriz de datos de la hoja de registro¹⁰.

Posteriormente, se hizo un análisis multivariado relacionando por hipótesis a las demás variables con la variable respuesta (flujo de agua evaporado) para hacer una regresión lineal de variables hacia atrás, haciendo uso de tablas ANOVA para identificar las variables de mayor significancia y tratar de construir un modelo adecuado que permita identificar los intervalos de confianza de las variables implicadas, observando las zonas con mayor frecuencia de ocurrencia y su impacto directo o indirecto con el flujo de agua evaporado¹¹. Esto es posible al evaluar y

¹⁰ SÁEZ CASTILLO, Antonio José. Apuntes de estadística para ingenieros. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Jaén. 2012. P: 19-34

¹¹ SÁEZ CASTILLO, Antonio José. Apuntes de estadística para ingenieros. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Jaén. 2012. P: 19-34

comparar los F-value y Pr arrojados por el programa, en el cual las variables con Pr superior a 0,05 o mayor entre las variables evaluadas y con F-value menor con respecto a las demás, fueron descartadas.

Por último, se realiza un análisis gráfico en búsqueda de tendencias de los datos de flujo de agua evaporado vs consumo de GLP y la relación entre ellos.

4.2.2. Combustión y eficiencia del horno. La combustión se basa en una reacción química exotérmica de una sustancia (o mezcla de ellas) denominada combustible, con el oxígeno o con una mezcla de sustancias que lo contengan denominada comburente (usualmente aire), en la cual se obtiene la formación de una llama incandescente que emite luz y calor¹².

En el presente trabajo, el horno opera con GLP como combustible y aire como comburente. Como el combustible sólo reacciona con el oxígeno del aire, los compuestos no reaccionantes de menor proporción presentes en el aire no se tuvieron en cuenta con el fin de facilitar los cálculos realizados, tomando la composición del aire como una formación de 21% de O₂ y 79% de N₂ en base volumétrica.

En la industria suele usarse una cantidad de oxígeno extra como una forma rentable de asegurar una combustión completa, usualmente un exceso volumétrico del 3% de oxígeno. Es posible calcular el exceso de aire requerido en un horno del tipo que utiliza la empresa, de acuerdo con la siguiente ecuación¹³:

¹² BRIZUELA, E. y ROMANO, S. Combustión. Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires, 2003. 224 P.

¹³ BAUKAL, Charles, et al. Industrial Combustion Pollution and Control. Combustion Fundamentals. New York. 2004. 890 p.

$$XSO = \frac{[x + a(x + y/4)](dryO_2)}{(x + y/4)[1 - (1 + a)(dryO_2)]} \quad (1)$$

En donde:

XSO: Fracción volumétrica de aire en exceso.

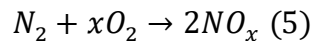
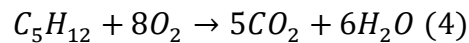
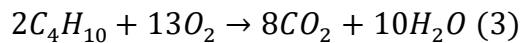
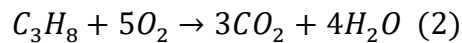
x: Número de carbonos del compuesto combustible.

y: Número de hidrógenos del compuesto combustible.

dryO₂: Fracción volumétrica de O₂ en exceso.

a: Proporción volumétrica N₂/O₂ en el aire.

La cantidad de oxígeno teórico se calculó considerando que el GLP consumido por la empresa estaba formado por propano, butano y pentano; en consecuencia, las reacciones de combustión que ocurren en el horno son:



(2) Reacción de combustión completa del propano

(3) Reacción de combustión completa del butano

(4) Reacción de combustión completa del pentano

(5) Reacción de producción de NO_x

Una vez calculada la cantidad teórica de aire que debe ingresar al horno se procedió a realizar una comparación con la cantidad de aire que debe ingresar según las

recomendaciones del fabricante, por último se realizó un cálculo de la eficiencia térmica del horno utilizando la siguiente ecuación^{14 15}:

$$e = \frac{(PCI+Ha+Hf+Hm)-(Qr+Qs)}{(PCI+Ha+Hf+Hm)} \quad (6)$$

Siendo,

e : Eficiencia térmica del horno [%]

PCI: Poder calorífico inferior [kJ/kg combustible]

Ha: Calor sensible del aire [kJ/kg combustible]

Hf: Calor sensible del combustible [kJ/kg combustible]

Qr: Calor perdido por radiación [kJ/kg combustible]

Qs: Calor perdido por los gases de chimenea [kJ/kg combustible]

En donde Qs es¹⁶:

$$Qs = F * Cp_{gases\ chimenea} * (\Delta T) \quad (7)$$

F: Flujo másico de gases de chimenea [$kg/^\circ C$]

$Cp_{gases\ chimenea}$: Poder calorífico de los gases de chimenea. [$kJ/^\circ C$]

ΔT : Diferencial de temperatura [$^\circ C$]

Se hizo el cálculo de la eficiencia térmica actual y una aproximación de la eficiencia térmica que podría alcanzar si se utilizara la proporción adecuada de aire al ingreso de la combustión.

¹⁴ BISET, Sebastián y FERREYRA, Martín. Cálculo riguroso de eficiencia de hornos de proceso. Oil Combustibles S.A. – Refinería San Lorenzo. Argentina. 2013. P: 10-11.

¹⁵ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Fired Heaters for General Refinery Service. API STANDARD 560. Third Edition. 2001. 208 p.

¹⁶ CALLE, Jehannara; AMORES, Leanie y GANDÓN, José. Estudio técnico de la línea de producción de galletas de salvado de trigo. Cálculo de los calores de proceso. En: Virtual Pro. Septiembre 2013. La Habana. 19 p.

Para evaluar la variación de la eficiencia de la combustión en el horno al variar el porcentaje de exceso de aire se realizó una simulación en Aspen Hysys con el paquete termodinámico de Peng-Robinson, usando un horno de fuego directo en el cual se supone una combustión completa global y se usan las condiciones de operación con el combustible (GLP) de la empresa (ver Figura 4); se fija la temperatura de salida de los gases de chimenea (305 °C) (ver Figura 5) de acuerdo a la registrada por la empresa y se toma como “Galleta entrada” el flujo de agua contenido en la masa a la entrada del horno junto con un componente hipotético de masa seca modelado como un azúcar.

Figura 4. Simulación de horno en Aspen Hysys.

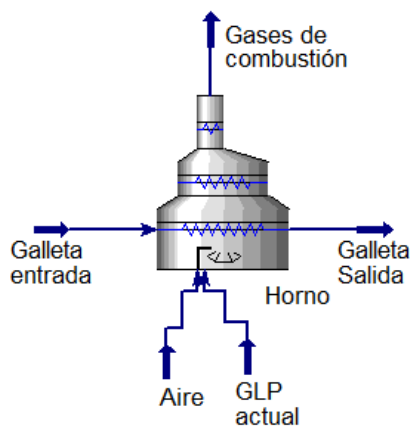


Figura 5. Condiciones de las corrientes de simulación de eficiencia de horno.

Name	Galleta entrada	Aire	GLP actual	Galleta Salida	Gases de combust
Vapour	0.0000	1.0000	1.0000	0.7811	1.0000
Temperature [C]	30.0000	25.0000	25.0000	236.4849	305.0000
Pressure [kPa]	101.3	101.3	156.5	101.3	101.3
Molar Flow [kgmole/h]	30.0102	182.4697	1.5780	30.0102	185.8345
Mass Flow [kg/h]	1626.6287	5264.2990	75.4320	1626.6287	5339.7310

A partir de esta simulación se hace un caso de estudio en el cual se varía el porcentaje de exceso de aire de 0% a 350% con un intervalo del 5%, para que el

simulador calcule la variación de las eficiencias del horno ante las fluctuaciones en el exceso de aire.

Posteriormente se realizó otro caso de estudio en el cual se comparó la misma variación del porcentaje de exceso de aire de 0% a 350% con intervalos del 5%, para observar el comportamiento del consumo de combustible en el horno.

4.2.3. Calidad del GLP. El poder calorífico de un combustible representa la cantidad de energía liberada por unidad de peso o volumen de combustible como consecuencia de la reacción química de combustión completa¹⁷. Existen dos maneras de interpretar esta propiedad: con el poder calorífico superior (PCS), que considera que el agua resultante de la combustión se encuentra en estado líquido, y con el poder calorífico inferior (PCI), el cual asume que el agua producto de la reacción se encuentra en estado vapor¹⁸.

Es por eso que para esta alternativa de reducción de consumo de GLP, se calculó el PCI del combustible que se está utilizando en la empresa según las indicaciones del proveedor y se realizó una comparación con diferentes composiciones de GLP, con el fin de encontrar el combustible que contenga un PCI más elevado y de esta manera, el que sería más adecuado utilizar en el horno para el propósito de este proyecto. Adicionalmente, la mezcla de hidrocarburos hace que un combustible presente diferentes puntos de ebullición de acuerdo a su composición; y por ende presentará diversos porcentajes de vaporización debido a la acción del calor suministrado por el ambiente; es esta fracción de vapor la que es utilizable en

¹⁷ WAUQUIER, J. El refino del petróleo. Petróleo crudo. Productos petrolíferos. Esquemas de fabricación. España. 2004. p: 178.

¹⁸ AYALA, Elizabeth; APARICIO, Adriana y GARCÍA, Carlos. Revisión del cálculo de poder calorífico y punto de rocío del gas natural, y de la estimación de sus incertidumbres. Grupo de Investigación en Fluidos y Energía GIFE. Piedecuesta. 2016.

instalaciones industriales de diseño estándar¹⁹, por lo tanto se busca un equilibrio entre una buena calidad de vaporización del combustible y el PCI más alto posible.

El cálculo del PCI y la calidad de vaporización se realizó con ayuda del programa Aspen Hysys como se muestra en la Figura 6, utilizando el paquete de fluidos de Peng-Robinson, el cual calcula el PCI en su ambiente interno en el entorno de propiedades de la corriente, ya que es un software especializado específicamente en simulación con hidrocarburos y la obtención de propiedades físicas, químicas y energéticas de mezclas de hidrocarburos de acuerdo al manual de asistencia de Hysys en sus libros y ficheros.

Se hizo un modelamiento del tanque de almacenamiento con su descompresión respectiva (ver Figura 6) para vaporizar el combustible con las condiciones de distribución a los quemadores y se realizó un caso de estudio en donde se tomó una variación en la composición de propano/butano/pentano del combustible, variando la cantidad de propano de 40 a 320 kmol/h con intervalos de 5 kmol/h, lo que corresponde a una variación entre 30% y 80% de propano en la mezcla, con el fin de obtener los diferentes porcentajes de vaporización del GLP de combustión y contrarrestarlos con su PCI.

¹⁹ NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 2 260:2010. Instalaciones de gases combustibles para uso residencial, comercial e industrial. Requisitos.

Figura 6. Simulación de la mezcla de GLP.

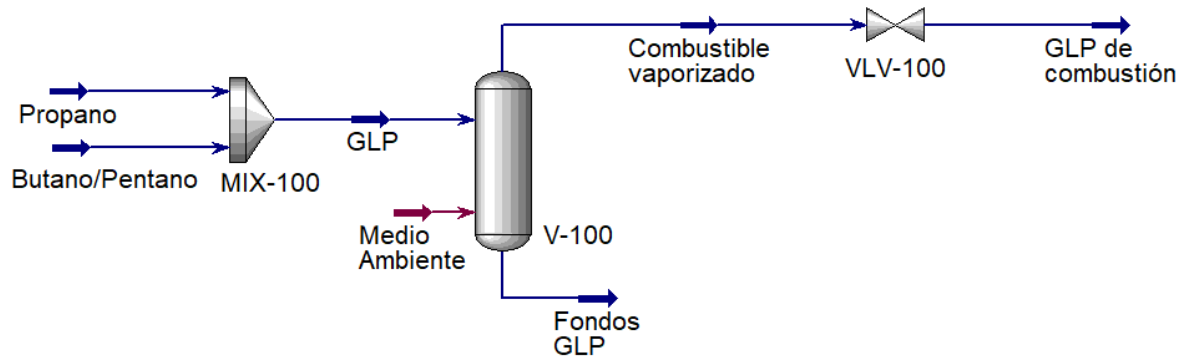


Figura 7. Condiciones de las corrientes de simulación de mezcla de GLP.

Name	Propano	Butano/Pentano	GLP	Fondos GLP	Combustible vap	GLP de combustió
Vapour	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
Temperature [C]	20.47	25.00	22.00	22.00	22.00	14.92
Pressure [kPa]	2026	2026	2026	551.6	551.6	156.5
Molar Flow [kgmole/h]	320.0	100.8	420.8	46.10	374.7	374.7
Mass Flow [kg/h]	1.411e+004	5863	1.997e+004	2340	1.763e+004	1.763e+004

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. ACCIONES DE GESTIÓN INTERNA

De la encuesta realizada a los operarios de la línea de producción se obtuvo la siguiente información, la cual quedó a disposición de la empresa:

En ocasiones se presenta demora en la notificación de eventos relevantes entre secciones.

De acuerdo a estudios previos realizados por la empresa, la preparación de la masa debe cumplir con un tiempo específico por etapa de elaboración. En ocasiones dicho tiempo se retrasa debido a imprevistos en el cronograma de operación o a fallo humano. En una reunión con los operarios del área de producción se les hizo hincapié en la concientización de cumplir y respetar a cabalidad los tiempos de ejecución, con el fin de que la masa obtenga las condiciones adecuadas a la hora de ser horneada y no requiera un tiempo de horneado mayor al previsto.

Las condiciones de cada lote de harina son de gran importancia a la hora de la preparación de la masa. Algunas veces dicha información no llega a tiempo a los operarios encargados. Se comunicó vía correo y en una reunión posterior acerca de esta demora en el envío de la información y se hizo un compromiso con la persona encargada en el área de control de calidad de garantizar la gestión adecuada y a tiempo de la información.

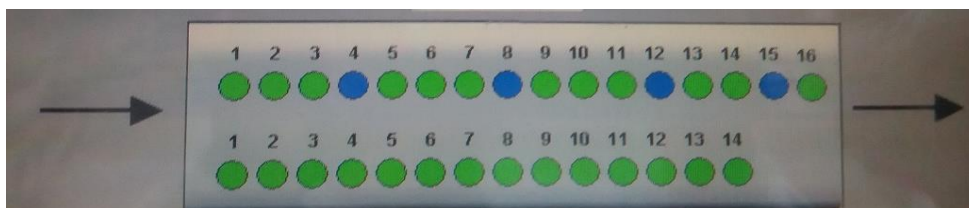
Al observar el panel de instrumentos en el horno, algunos sensores arrojaban falsas señales de la actividad de los quemadores. Algunos quemadores que se mostraban como “apagados” en el panel de control, al ser observados directamente en el horno sí se encontraban en funcionamiento y viceversa. Se le comunicó en una reunión al

área de mantenimiento haciendo énfasis en darle prioridad a la revisión del correcto funcionamiento de los sensores y el panel de control.

El reemplazo de algunos quemadores a infrarrojos generó un cambio en el perfil de temperatura de la galleta y la no operatividad de la zona 5 y la 4 inferior. Sin embargo, no fue posible realizar pruebas o propuestas en esta problemática por petición de la empresa.

Las etiquetas externas de identificación de los quemadores se encuentran ilegibles, lo cual dificulta a los horneros reconocer rápidamente los quemadores que requieran ser intervenidos. En el panel de control los quemadores son identificados numéricamente de acuerdo a la zona (ver figura 8). En caso de que se requiera intervención, el proceso de identificación del quemador en el horno se realiza haciendo un conteo visual. Teniendo en cuenta que el horno cuenta con 160 quemadores distribuidos en 100 metros de longitud, dicho proceso de conteo ralentiza una acción rápida del operario. Se planteó el cambio de las etiquetas al área de mantenimiento; sin embargo, la maquinaria requerida para ese propósito no se encontraba en funcionamiento en el momento, por lo cual no se pudo realizar ninguna acción. Quedó bajo la disposición de la empresa las acciones necesarias para solucionar este inconveniente.

Figura 8. Quemadores de una zona del horno en el panel de control.



La empresa cuenta con un procedimiento estandarizado para seguir en caso de cualquier eventualidad, no obstante, para el caso específico de galleta g1 dicho

procedimiento no genera gran impacto debido a las zonas del horno que se ponen en funcionamiento.

Las condiciones óptimas de la masa dependen en gran medida de las variaciones de los lotes de harina. Aunque cada preparación de una nueva masa depende de la preparación anterior, no es posible lograr que todos los lotes de harina sean iguales; sin embargo, la empresa ya exige al proveedor que la harina presente unas características similares, que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Estándar de especificaciones de la harina.

Especificación	Mínimo	Máximo
Gluten húmedo	21%	23,55%
Falling Number	330	380
Estabilidad	3,5 min	5 min
Absorción	53	55
Cenizas	< 58	
Humedad	< 14	

Fuente: Empresa.

5.2. PROPUESTAS PARA LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE GLP

5.2.1. Relación entre variables fisicoquímicas medibles en el proceso. Los resultados obtenidos del análisis univariado muestran que sólo la variable del flujo de agua evaporado presenta una distribución normal; es decir, se le puede aplicar un análisis de varianza paramétrico con el fin de buscar un modelo de probabilidad que se ajuste al comportamiento del horno con las demás variables, de acuerdo a los resultados de las pruebas de normalidad y la forma del histograma como se ve en la Figura 9 y Figura 10. Las demás variables no presentaron distribución normal por lo cual fueron descartadas, sus pruebas de normalidad e histogramas se muestran en el Anexo A.

Figura 9. Histograma del flujo de agua evaporada

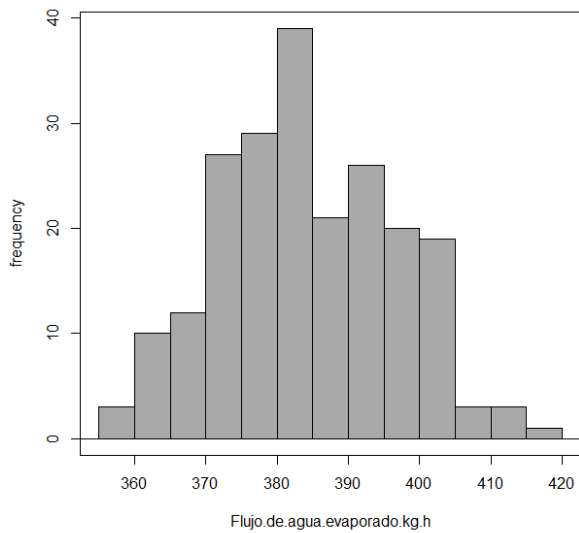
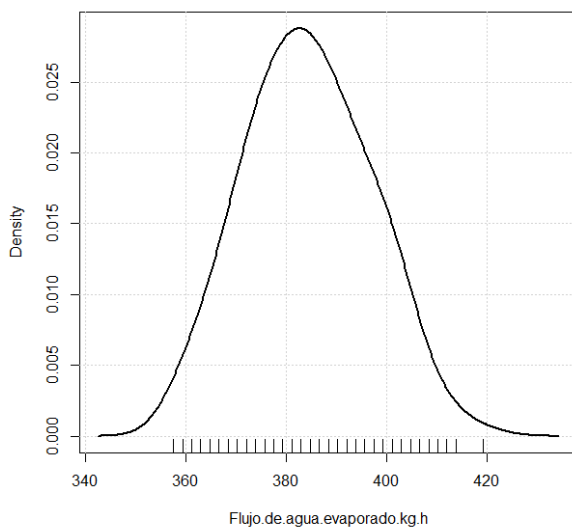


Figura 10. Densidad de datos de flujo de agua evaporada



Usando como variable respuesta el flujo de agua evaporado, puesto que fue la única variable que presentó distribución normal, se relacionaron las demás variables en grupos de 3 buscando encontrar una correlación con el consumo de GLP. La mayoría de las variables fueron descartadas en análisis de ANOVA que se muestran

en el Anexo B. En la tabla 3 se muestran 3 pruebas concluyentes que descartan a la variable de consumo de GLP de relacionarse con el flujo de agua evaporada.

En la primera prueba, se buscó relacionar el flujo de agua evaporado y el consumo de GLP con la humedad de la galleta y la humedad de la masa; es posible observar que la humedad de la galleta presenta un Pr mayor que el de las demás variables (mucho mayor a 0,05) y un F value menor, por esa razón fue descartada; por lo cual se realizó otra prueba buscando relacionar el flujo de agua evaporada y el consumo con la humedad de la masa y la temperatura superior de la zona 1, en donde se obtuvo que la variable a descartar es la variable de consumo; sin embargo la humedad de la masa presentó un Pr menor a 0,05 y se realizó otra prueba relacionándola con el consumo de GLP buscando encontrar una posible correlación. Esta prueba nuevamente dio como resultado descartar la variable de consumo de GLP pues presentó el Pr más alto entre las dos variables (ver tabla 3).

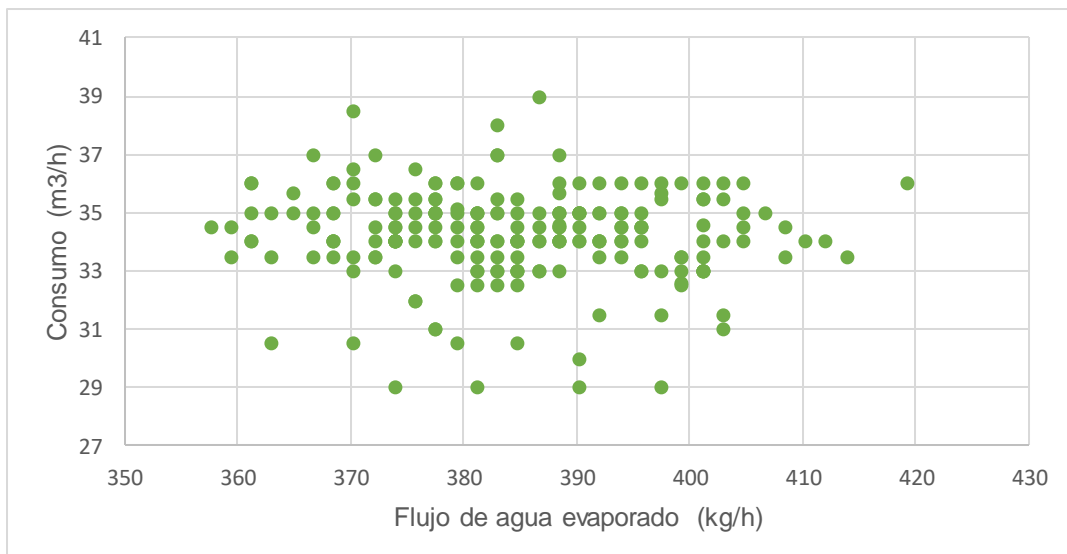
Estos resultados no son concluyentes para el objetivo de este proyecto, de disminuir el consumo de GLP en el horno, puesto que la variable de consumo de GLP fue descartada de relacionarse con la variable de flujo de agua evaporada, que era la única variable que presentaba una distribución normal. Por lo cual no fue factible encontrar un modelo estadístico que describa el comportamiento del consumo de combustible en el horno.

Tabla 3. Resultados de ANOVAS

Variable respuesta: Flujo de agua evaporado					
	Variable 1	Variable 2	Variable 3	F value	Pr
Prueba 1	Consumo			1,4744	0,1300
	Humedad galleta			0,4911	0,8118
	Humedad masa			2,8099	0,0008
	Consumo	Humedad galleta		1,0714	0,4073
	Consumo	Humedad masa		1,1363	0,3290
	Humedad galleta	Humedad masa		1,3837	0,1626
	Consumo	Humedad galleta	Humedad masa	1,4625	0,0626
Prueba 2	Consumo			1,3391	0,2393
	Humedad masa			2,0630	0,0356
	T1 superior			1,3806	0,2031
	Consumo	Humedad masa		1,0366	0,4762
	Consumo	T1 superior		1,3864	0,2001
	Humedad masa	T1 superior		0,7217	0,6970
	Consumo	Humedad masa	T1 superior	1,5836	0,0873
Prueba 3	Consumo			1,3358	0,1676
	Humedad masa			2,4886	0,0005
	Consumo	Humedad masa		0,9993	0,4937

Buscando tendencias entre los datos de flujo de agua evaporada y el consumo de GLP, se realizó la siguiente gráfica.

Figura 11. Consumo de GLP vs flujo de agua evaporado



Se observa en la figura 11 que no se presenta una relación marcada entre el consumo de GLP y el flujo de agua evaporado.

Si bien no fue posible relacionar directamente el consumo de combustible, es posible que existan variables no medidas por los dispositivos de control, que estén influyendo en las fluctuaciones de los datos, como pueden ser la diferencia de calidad en el combustible utilizado y la relación de mezcla entre el aire y el combustible en los quemadores.

Por hechos históricos en la empresa y modificaciones realizadas en los quemadores, en las cuales fueron cambiados los quemadores de GLP por quemadores infrarrojos en las últimas zonas del horno (zonas de baja temperatura), se perdió el *set-point* de la curva de dorado de la galleta, por lo cual los ajustes de flujo de calor son realizados por los operarios de manera empírica para lograr las correctas especificaciones de calidad de la galleta; lo cual indica que hay un ingreso de perturbaciones no cuantificable al sistema de registro de variables.

5.2.2. Combustión y eficiencia del horno. Puesto que no se contaba con información acerca de la cantidad de aire que se estaba ingresando al proceso de combustión en el horno, se calculó dicha cantidad de acuerdo con la composición del combustible según el proveedor (ver figura 12) y la composición de los gases a la salida del horno (ver figura 13) junto con los datos que se obtuvieron del consumo de GLP, los cuales oscilan entre 29 y 39 m³/h, usando las ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

Se obtuvo un flujo de aire de entrada que excede al recomendado de aproximadamente 350%.

Figura 12. Composición de GLP.

REFERENCIAS DEL CLIENTE		TOMA DE MUESTRA		DATOS DEL ANALISIS		DATOS AMBIENTALES	
NOMBRE: [REDACTED]	[REDACTED]	FECHA: 23-jun-17	[REDACTED]	RECEPCION MUESTRA: 23-jun-17 14:45	[REDACTED]	TEMPERATURA: 23,0 °C	[REDACTED]
DIRECCION: [REDACTED]	[REDACTED]	HORA: 14:15	[REDACTED]	INICIO DE ENSAYO: 23-jun-17 14:50	[REDACTED]	HUMEDAD: 75,0 %	[REDACTED]
TELEFONO: [REDACTED]	[REDACTED]	PROCEDIMIENTO		FIN DE ENSAYO: 23-jun-17 16:45	[REDACTED]	PRESION: 100,9 kPa	[REDACTED]
		ASTM 1265 / INEN 674		EMISION DE INFORME: 23-jun-17 16:50	[REDACTED]		

PARAMETROS	UNIDAD	METODOS DE ENSAYO		Incertidumbre K=2	ESPECIFICACION	RESULTADOS
		ASTM / NTE	INTERNO			
DENSIDAD RELATIVA A 60/60 °F	---	D-1657 / 684	PE.LCH.01	± 0,013	REPORTE	0,530
PRESION DE VAPOR A 37,8°C	psi	D1267 / 676	PE.LCH.02	± 3	Máx. 200	142
	Pa			± 2,0E+04	Máx. 13,78E + 05	9,79E+05
CONTENIDO DE AZUFRE	ppm	D6667	PE.LCH.04	---	Máx. 130	3,00
	mg/m ³			Máx. 343	6	
CORROSION A LA LAMINA DE COBRE	---	D 1838 / 678	PE.LCH.05	---	1	1a
TEMPERATURA DE EVAPORACION 95%	°F	D 1837 / 677	PE.LCH.07	---	Max 36	30,0
RESIDUOS DE EVAPORACION 100 cc	cm ³	D 2158 / 681	PE.LCH.08	---	Max 0,05	0,00
CONTENIDO DE PROPANOS (a)	% v	D 2163 / 683	PE.LCH.03	---	REPORTE	70,88
CONTENIDO DE BUTANOS (b)	% v	D 2163 / 683	PE.LCH.03	---	REPORTE	29,12
PENTANOS Y MAS PESADOS (c)	% v	D 2163 / 683	PE.LCH.03	---	Max 2	0,08

Fuente: Proveedor de GLP

Figura 13. Composición de gases de chimenea

Parámetro	Valor Encontrado	Valor Encontrado ⁽¹⁾	Incertidumbre (mg)	Máximo Permitido ⁽²⁾
Partículas Totales		43,4 mg/Nm ³	±0,3	NO APLICA
Isocinetismo%		98,6		90-110
NOx ^(*)	54 PPM	108,1 mg/Nm ³	±8,2	2300
SO2	0 PPM ⁽³⁾	0,0 mg/Nm ³	±0,0	NO APLICA
Temperatura °C		310,6		PARÁMETROS NO REGULADOS
Velocidad m/s ^(*)		10,6		
O2% ^(*)		14,8		
CO	14 PPM ⁽³⁾	16,9 mg/Nm ³	±1,6	
CO2% ^(*)		9		

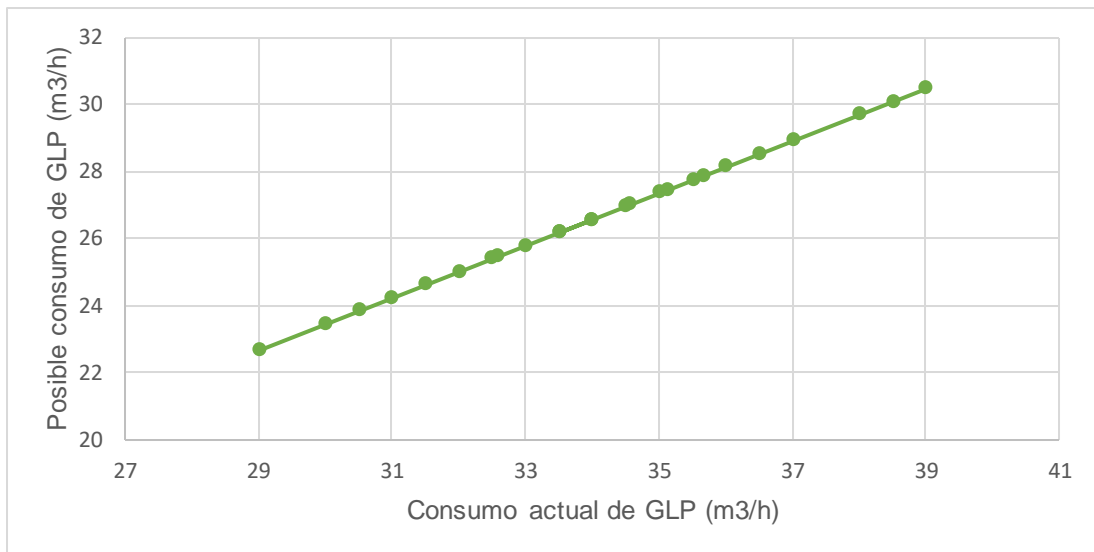
Nota: "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE".
 (1) A condiciones normales de presión y temperatura, en base seca y corregidos al 15% de oxígeno
 (2) Máximo Permisible determinado por el Acuerdo Ministerial N°097-A; Tabla 4 Límites máximos permisibles de concentraciones de emisión para motores de combustión interna (mg/Nm³), Fuente fija existente: con autorización de entrar en funcionamiento antes de enero del 2003.
 (3) Valor fuera del acreditación.

Fuente: Laboratorio ambiental contratista de la empresa.

Actualmente el horno trabaja con una eficiencia térmica del 64,9%, según los cálculos realizados con la ecuación (6). Si se utilizara cantidad adecuada de aire del 15% en exceso, en vez de la que se está utilizando de aproximadamente 350%, se obtendría una eficiencia de 86,3% de acuerdo a la ecuación 6, lo cual indica un valor significativo que impactaría en gran cantidad al consumo de GLP.

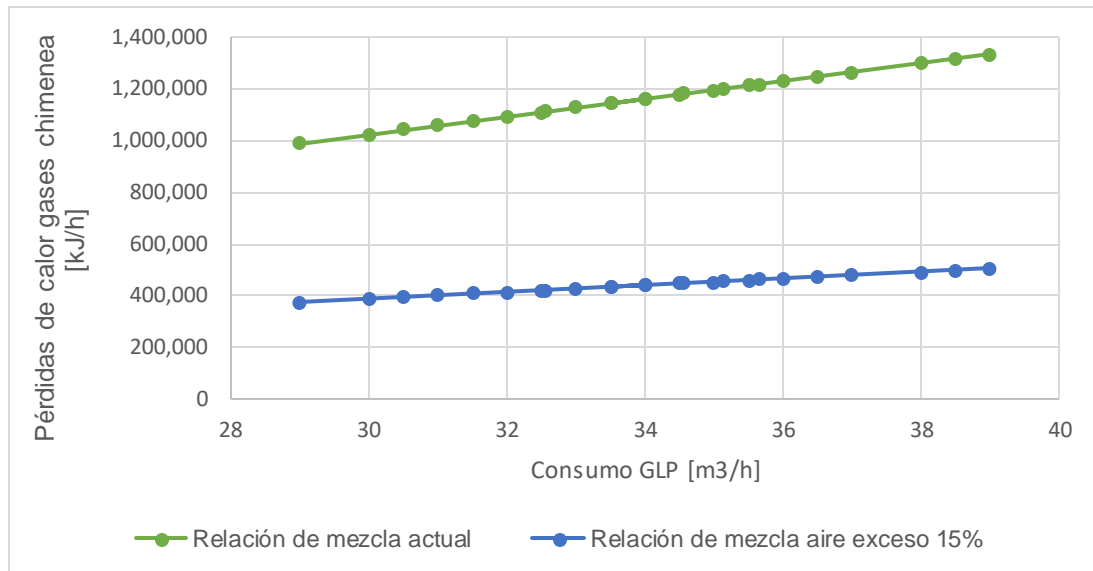
Teniendo en cuenta lo anterior, se hizo un cálculo aproximado de la cantidad de GLP que se podría ahorrar, dando como resultado un 21,82%. Es decir, entre 6 y 8 m³/h durante la producción de galleta tipo g1. En la Figura 14 se puede observar una comparación del consumo de combustible que se usa actualmente vs el consumo que se podría tener si se usara la cantidad adecuada de aire.

Figura 14. Consumo actual vs consumo con relación de mezcla ajustada.



Debido a que el exceso de aire en la combustión lleva consigo pérdidas de calor por los compuestos inertes que acompañan el aire, se realizó un cálculo de las pérdidas que se están teniendo actualmente y las que se podrían tener usando la relación de mezcla aire/combustible recomendada, usando la ecuación (7), que corresponde al flujo de calor que se está liberando por la chimenea (ver figura 15).

Figura 15. Pérdidas de calor con diferentes relaciones de aire/combustible.

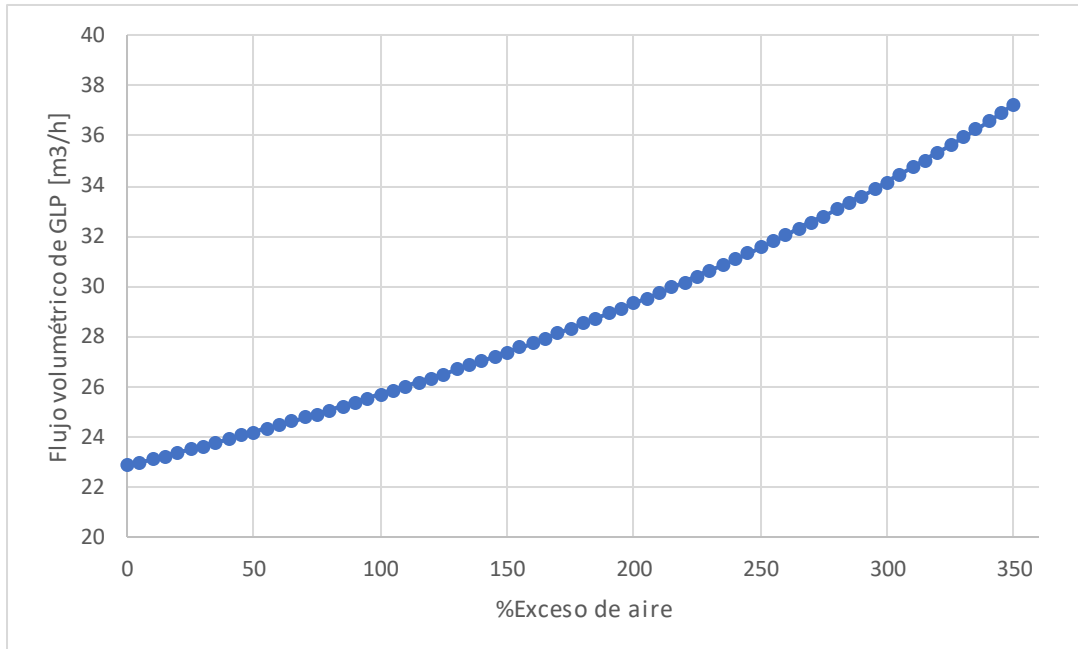


En la figura 15 es posible observar que con la relación de mezcla aire/combustible que se está utilizando actualmente se presentan mayores pérdidas de calor que las que se presentarían si se usara la relación recomendada.

El flujo de aire estequiométrico corresponde al aire calculado de acuerdo a la reacción completa de combustión de los componentes del GLP que se utiliza. El flujo de aire recomendado contiene el 15% de exceso que se calculó con la ecuación, usando el 3% de oxígeno que se debería ingresar a la combustión de acuerdo con la bibliografía²⁰ y el consumo de aire real corresponde al flujo de aire que se está utilizando actualmente en el horno. Se obtiene un amplio margen de diferencia entre el flujo de aire utilizado y el recomendado, lo cual indica que es posible mejorar la eficiencia en la combustión del horno.

²⁰ BAUKAL, Charles, et al. Industrial Combustion Pollution and Control. Combustion Fundamentals. New York. 2004. 890 p.

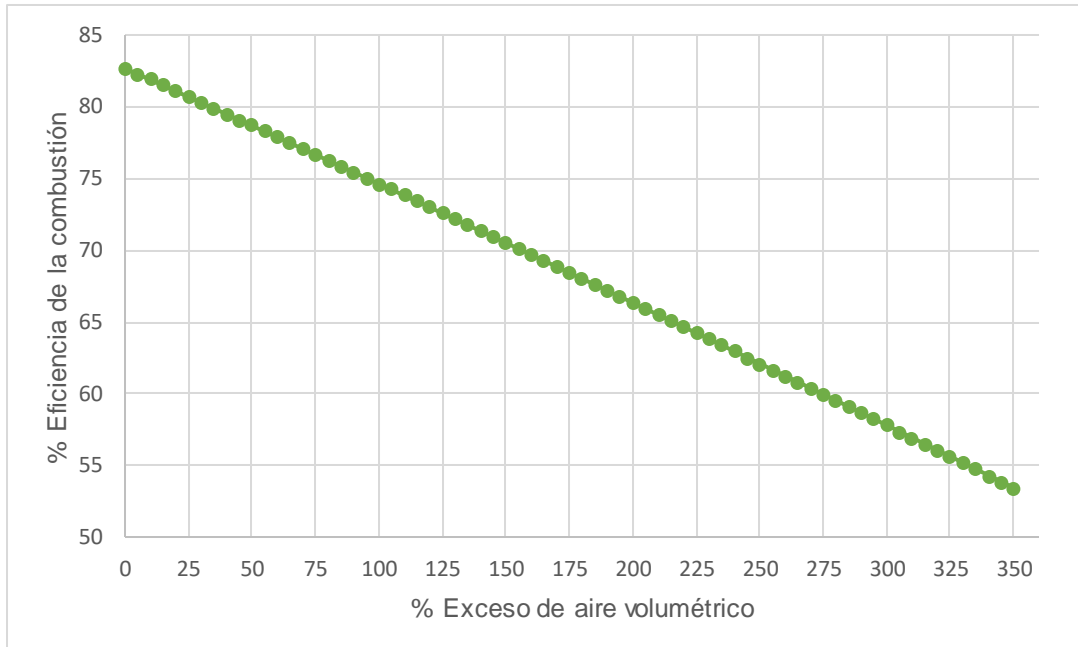
Figura 16. Flujo volumétrico de GLP vs exceso de aire



Se observa en la figura 16, como se esperaba, una tendencia proporcional entre el exceso de aire y el consumo de combustible, es decir, a medida que aumenta la cantidad de aire en exceso que se ingresa a la combustión, se requiere un mayor flujo de combustible.

Posteriormente se hizo el caso de estudio en la simulación del software Aspen Hysys con el fin de que se observe que una mezcla inadecuada de combustible con el aire disminuye la eficiencia o el calor efectivo aprovechable (ver figura 17).

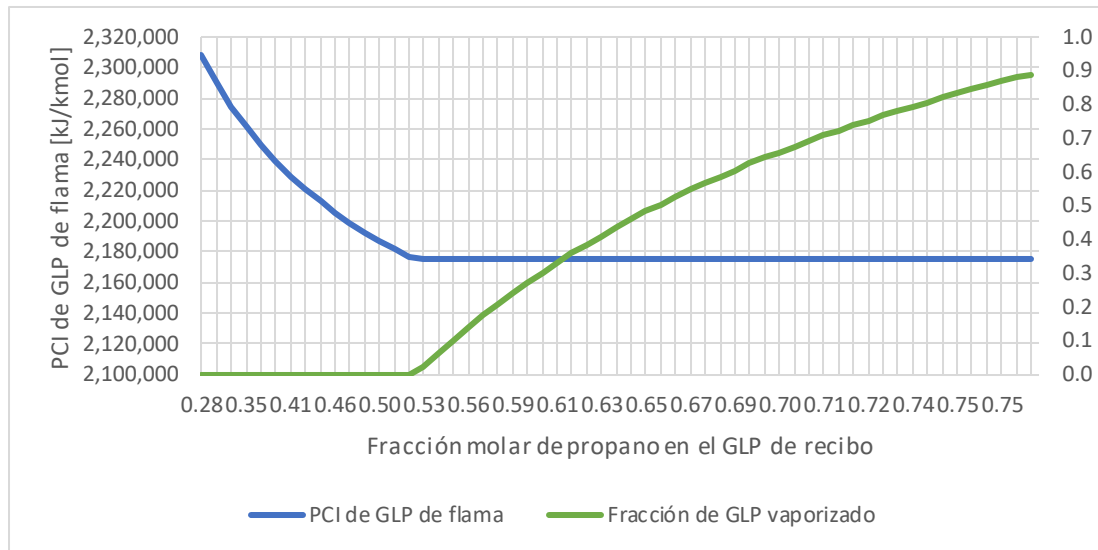
Figura 17. Eficiencia de la combustión vs exceso de aire



Como se observa la eficiencia disminuye drásticamente al presentarse excesos de aire fuera de un rango de 40% de exceso; a partir de este punto la eficiencia cae por debajo del 80%. Con el 15% de exceso de aire se obtiene una eficiencia del 81,5%, muy cercana al 86,3% obtenida teóricamente con la ecuación, es decir un error del 5,56%. Lo que da certeza de que los datos arrojados por el simulador en el caso de estudio son bastante aproximados a la realidad.

5.2.3. Calidad del GLP. Los resultados del caso de estudio realizado en Aspen Hysys, en donde se varía la composición del GLP y se observa el comportamiento del PCI junto con la fracción de combustible vaporizado se obtuvieron como se muestran en la figura 18.

Figura 18. PCI y fracción de GLP vaporizado vs fracción de propano a la entrada.



Es posible observar en la Figura 18 que la cantidad de propano presente en el GLP es inversamente proporcional al PCI del combustible, es decir entre menor sea la cantidad de propano en la mezcla, mayor será su poder calorífico, pero la fracción de GLP (propano, butano y pentano) vaporizado en las condiciones de operación de la planta se reduce drásticamente llegando casi a cero.

De esta forma también se establece que a fracciones molares superiores del 0,5 de propano en el GLP, el poder calorífico inferior (PCI) es casi constante con lo que si se cruzan los datos con la fracción de GLP vaporizado, las composiciones de GLP que garantizan reducir las pérdidas de combustible no vaporizado en los fondos del tanque son las que tengan composiciones molares superiores al 0,72 de propano con el fin de asegurar una mínima fracción de GLP vaporizado de 0,7. A pesar de obtener poderes caloríficos muy similares con fracciones molares de propano menores a 0,72, estas generarían grandes pérdidas en los fondos del tanque al no ser vaporizadas; por ello las fracciones molares de propano superiores a 0,72 son adecuadas y preferibles. No es común encontrar fracciones molares de propano superiores a 0,76 en Ecuador.

6. CONCLUSIONES

- Las variables estudiadas durante el análisis estadístico no fueron suficientes para explicar la fluctuación del consumo de GLP. Las fluctuaciones del consumo de GLP podrían deberse a la falta de estandarización de los coches de masa y a la falta de una curva de dorado del proceso que abarque la totalidad de las zonas del horno, lo cual añade variaciones que imposibilitaron la consecución de una relación estadística que explique el consumo de GLP como resultado de las variables analizadas.

- Del análisis de la mezcla de aire y combustible, si bien se presenta una combustión completa, el horno opera con un exceso de aire desproporcionado (350% en volumen), el oxígeno y nitrógeno del exceso absorben entre 600.000 y 800.000 kJ/h del calor de la combustión aproximadamente, para elevar su temperatura a la de la condición de operación. Lo anterior implica que la eficiencia de la combustión es alrededor del 20% más baja de lo que podría ser. Se establece que el exceso de aire debe ser del 15% en volumen.

- Del análisis de la calidad del combustible, se establece que la calidad del GLP recibido por la fábrica es adecuado y se presenta como requerimiento que el recibo de GLP busque garantizar que el combustible de ingreso contenga fracciones molares superiores al 0,72 de propano, lo cual reduce la pérdidas de combustible no vaporizado en el tanque de almacenamiento por exceso de butanos en el GLP.

7. RECOMENDACIONES

- Estandarizar una calidad específica o un rango de condición de recibo de composición de GLP que no supere 0,3 en composición de butano en el combustible.
- Hacer pruebas de ceniza y caramelizado a la masa de la galleta para hacer los ajustes a la curva de dorado y para redefinir las temperaturas de cada zona del horno.
- Implementar la tabla de ajuste de la relación de mezcla de aire-combustible de acuerdo al flujo de combustible.
- Implementar las tres recomendaciones anteriores, recopilar y hacer un análisis estadístico y dinámico más detallado del horno con el fin de optimizar la operación.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Fired Heaters for General Refinery Service. API STANDARD 560. Third Edition. 2001. 208 p.

AYALA, Elizabeth; APARICIO, Adriana y GARCÍA, Carlos. Revisión del cálculo de poder calorífico y punto de rocío del gas natural, y de la estimación de sus incertidumbres. Grupo de Investigación en Fluidos y Energía GIFE. Piedecuesta. 2016.

BAUKAL, Charles, et al. Industrial Combustion Pollution and Control. Combustion Fundamentals. New York. 2004. 890 p.

BISET, Sebastián y FERREYRA, Martín. Cálculo riguroso de eficiencia de hornos de proceso. Oil Combustibles S.A. – Refinería San Lorenzo. Argentina. 2013. p: 10-11.

BRIZUELA, E. y ROMANO, S. Combustión. Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires, 2003. 224 P.

CALLE, Jehannara; AMORES, Leanie y GANDÓN, José. Estudio técnico de la línea de producción de galletas de salvado de trigo. Cálculo de los calores de proceso. En: Virtual Pro. Septiembre 2013. La Habana. 19 p.

DAVIDSON, Iain. Biscuit Baking Technology. Processing and Engineering Manual. Chapter 7. Oven Construction: Direct Gas-Fired Ovens. Pp: 113-117. 2016.

FARID, M. et al. Mathematical Modeling of Food Processing. National University of Singapore. Cap 13. Baking Process Mathematical Modeling and Analysis. New York. 2010.

FERREIRA, R. et al. Engineering Aspects of Cereal and Cereal-Based Products. Cap 8. Confectionary Baking. New York. 2014.

ISHIKAWA, Kaoru. Qué es el control total de calidad. La modalidad japonesa. 141p.

MONTENEGRO, M. y PEÑAHERRERA, A. Modelo de mejoramiento de la productividad a través de herramientas de control y mejora caso: Repsol Duragas - Pifo. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito. 2012. pp: 1-18.

NIEBEL, Benjamin y FREIVALDS, Andris. Ingeniería Industrial. Métodos, estándares y diseño del trabajo. 2009. Pp: 19-20.

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 2 260:2010. Instalaciones de gases combustibles para uso residencial, comercial e industrial. Requisitos.

PORTILLA, Stalin. Manual de operación del horno. Versión 2. 2012. 30 pp.

SÁEZ CASTILLO, Antonio José. Apuntes de estadística para ingenieros. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Jaén. 2012. P: 19-34

VARZAKAS, T. y TZIA, C. Handbook of food processing. Food safety, quality and manufacturing processes. Cap 7. Bakery Technology. 2015. P: 209.

WAUQUIER, J. El refino del petróleo. Petróleo crudo. Productos petrolíferos. Esquemas de fabricación. España. 2004. p: 178.