

01126

57



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MÉTODO TAGUCHI APLICADO EN
EL LLENADO DE BOTELLAS DE
REFRESCO SIN GAS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

PRESENTAN:

ÁREA INDUSTRIAL

CLAUDIA PALOMA VÁZQUEZ GÓMEZ

MIGUEL RESÉNDIZ HERNÁNDEZ

LEONARDO GONZÁLEZ RAMÍREZ

ÁREA MECÁNICO

FRANCISCO MORALES DÍAZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. SAÚL SANTILLÁN GUTIÉRREZ

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"



CIUDAD UNIVERSITARIA

2003

M-0315606

1



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis Padres:

Papito, Mamita, gracias por quererme tanto. Gracias por sus ejemplos de esfuerzo y superación constante; por inculcarme grandes valores, ética y sobre todo amor a la vida. Todo lo que soy es por ustedes y para ustedes.

Los amo muchísimo

A Alejandro:

Gracias por tu gran amor, por el apoyo que siempre me has brindado y sobre todo, por que a tu lado soy una mujer feliz. Con nuestro amor llegaremos al infinito.

Te amo con todo mi corazón

A mis hermanos:

Juan José, Lupita, Israel y Gabriela, gracias por su amor, por su apoyo, por ser mis guías y por ser un poco mis papás y mis mamás. Nuestro límite es el infinito.

Mi amor y cariño para ustedes

A mis abuelitos:

Trini†, Juanito† y Lupita, gracias por su amor y por ser ejemplo en mi vida.

Mi amor y admiración para ustedes.

A Dios:

Te doy gracias señor por mi vida, por mi familia y por mi esposo. Gracias por el gran amor que me tienes. Gracias por que todo lo recibo de ti y en ti, todo lo puedo.

Te amo

A todos aquellos que no aparecen en esta lista, pero que siempre están en mi corazón.

Claudia Paloma Vázquez Gómez

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A mis padres:

Gracias por haberme dado lo más preciado que tengo, la vida. Gracias por regañarme, educarme, apoyarme y sobre todo por amarme. Si no fuera por ustedes yo no estaría aquí; sin su ayuda y apoyo, no estaría escribiendo esto. Les dedico este trabajo y espero que cada día, estén más orgullosos de mí.

A mis hermanos:

Gracias por estar conmigo, apoyarme y ayudarme a madurar; por hacerme ver tantas cosas y compartir todas nuestras vidas juntos. Siempre tendrán un lugar muy grande en mi corazón.

A mi esposa e hijo:

Gracias a ustedes he recibido un gran estímulo y amor incondicional; para darme fuerzas y terminar esto que en algún momento quedo inconcluso.

Los amo

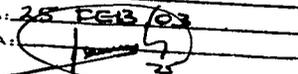
A todos los que no aparecen pero saben que existen y tienen un lugar especial en mi corazón.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas •
UNAM a difundir en formato electrónico e impresio
contenido de mi trabajo recpcional.

NOMBRE: GONZALEZ RAMIREZ

LEONARDO

FECHA: 28 FEB/03

FIRMA: 

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Francisco Morales Díaz

Agradezco a Dios:

Por haberme dado la vida y permitir que llegara este momento.

A mis Padres:

Enrique y Conchita, por darme siempre su apoyo incondicional, por mi familia y por su gran ejemplo.

A Verónica y Lorena:

Por ser el regalo más grande que Dios me ha dado y la motivación más grande de mi vida.

A Norma:

Gracias por cruzarte por mi camino, por mis pequeñas, y por compartirme tu vida.

A mis hermanos:

Enrique y Jorge, por su gran cariño de hermanos y valiosa compañía.

A Emilio Martínez Liera:

Por permanecer cerca de mi familia como padrino, como compadre, pero sobre todo, como un gran amigo.

Leonardo González Ramírez

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A mi familia:

Por su apoyo, comprensión y su amor.

Dedico a ustedes este trabajo.

Miguel Reséndiz Hernández

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**A nuestro director de tesis:
Dr. Saúl Santillán**

**Gracias por su paciencia y por su esfuerzo tan grande para vernos titulados.
Nuestra admiración, cariño y profundo respeto.**

A Nuestra Universidad:

Por que en ella se forman mujeres y hombres de bien.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Paloma, Francisco, Leonardo y Miguel.

INDICE TEMÁTICO

I: INTRODUCCIÓN		3
II: ANTECEDENTES. PROCESO DE ENVASADO		
2.1	Fundamentos del proceso de envasado	7
2.2	Tipos de proceso de envasado	8
2.2.1	VSP Vacío Soplo Presión	9
2.2.2	SP Soplo Presión	11
2.2.2.1	Etapas del proceso de llenado SP	12
2.3	Comparación entre el proceso VSP-SP	17
III: DISEÑO ROBUSTO		
3.1	Historia	21
3.2	Diseño robusto	22
3.3	Estrategias de robustez	24
3.3.1	El diagrama P	25
3.4	Matriz de experimentos	28
IV: CASO DE ESTUDIO		
4.1	Tipo de bebida	35

4.2	Tipo de envase	35
4.3	Método de envasar	35
4.4	Válvula de llenado	36
4.5	Descripción del banco de pruebas	41
4.6	Consideraciones	45
4.7	Descripción del experimento	45

V. DESARROLLO DE EXPERIMENTOS

5.1	Matriz de experimentos empleando arreglos ortogonales	49
5.2	Matriz de experimentos para el llenado de botellas de refresco sin gas	49
5.3	Estimación del efecto de los factores.	53
5.4	Selección de los niveles óptimos de los factores.	59
5.5	Modelos aditivo para los efectos de factor	60
5.6	Análisis de varianza.	63
5.7	Analogía con el análisis de Fourier	63
5.8	Cálculo de la suma de los cuadrados	65
5.8.1	Relación entre las diferentes sumas de cuadrados	69

5.8.2	Grados de libertad.	70
5.8.3	Estimación del error de varianza.	71
5.8.4	Intervalos de confianza para los efectos de factor	72
5.8.5	Radio de varianza.	73
5.8.6	Interpretación de las tablas de ANOVA	74
5.9	Predicción y diagnostico	75
5.9.1	Predicción de η bajo condiciones optimas	75
5.9.2	Verificación de los experimentos (Confirmación)	76
5.9.3	Varianza en la predicción de error	77
5.9.4	Uniformidad de la predicción de la varianza del error	79
VI.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	83
VIII.	CONCLUSIONES	87
REFERENCIAS		91

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

PAGINACION

DISCONTINUA

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCIÓN.

El consumo de refrescos se ha incrementado en las últimas décadas ocupando un lugar importante en la alimentación. México es el primer lugar per cápita de consumo de refrescos en el mundo. La venta de refrescos de la empresa PESPICO, durante el año 2000, rebasaron los 7, 588 MM de pesos, lo que corresponde a un volumen de ventas de 311.5 MM. cajas unidad. [www.pepsico.com.mx]

Si consideramos que existen leyes que amparan al consumidor y que la industria refresquera puede dar más pero no menos de lo que indica el contenido neto en cada botella, se tiene que por cada envase se regala 10ml, promedio, por lo que el industrial pierde :

$$311.5 \text{ MM de cajas unidad} * 10 \text{ ml} = 3115 \text{ millones de litros al año}$$

Si a esta cifra la convertimos en pesos, representa una pérdida excesiva al industrial, con lo cual la justificación de nuestra tesis es inmediata.

En este trabajo se utilizará el método de Taguchi, también conocido como Diseño Robusto, para encontrar los factores que afectan de manera más severa el proceso de llenado de bebidas saborizadas sin gas, para controlar la variación del nivel de llenado (contenido neto), ya que este suele ser un parámetro difícil de controlar durante este proceso, afectando así, tanto al fabricante como al consumidor debido al exceso o falta de líquido contenido dentro del envase.

Actualmente, cuando se presentan estos problemas durante un proceso de este tipo, se tiene que recurrir a asesoría técnica especializada que proviene

del extranjero o al método de prueba y error, lo cual resulta ser demasiado costoso para el fabricante de bebidas, por eso nuestro interés de poder dar soluciones a través del método Taguchi.

Para esto, disponemos de un banco de pruebas de llenado, en el cual utilizamos cuatro tipos de bebidas diferentes. En este banco iremos modificando las variables que intervienen en el proceso de envasado, las que describiremos más adelante en este trabajo, a manera de ir tomando muestras e ir formando nuestra matriz de arreglos ortogonales que nos servirá para su análisis por medio del método Taguchi.

En el segundo capítulo trataremos los fundamentos del Proceso de envasado SP, proceso que utilizamos en nuestra tesis.

El capítulo tres da una breve explicación del método Taguchi.

En el Capítulo siguiente describimos el equipo y materiales que usamos en la realización de los experimentos, tipo de bebida, envasado y el banco de pruebas.

En el quinto capítulo analizaremos los experimentos, a través del método Taguchi, con el fin de encontrar los parámetros correctos; y en el capítulo seis analizaremos los resultados resultantes.

En el capítulo siete daremos nuestras conclusiones a la tesis.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES
PROCESO DE ENVASADO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANTECEDENTES

2.1 FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE ENVASADO DE BEBIDAS.

La finalidad del proceso de envasado es colocar una bebida dentro de un envase que cierre herméticamente. La variedad de bebidas que se someten al proceso de envasado va desde agua natural, jugos, néctares, bebidas carbonatadas, productos lácteos, hasta bebidas alcohólicas; y estas interactúan de manera compleja con las opciones de envasado disponibles hoy en día.

Los tipos de envasado empleados en la industria de las bebidas son numerosas, de forma general encontramos envases de vidrio, envases de hojalata, de aluminio, envases de plástico, envases de cartón, envases multicapas, y combinaciones entre estos y otros materiales.

Envasar una bebida brinda características que mejoran su aprovechamiento, como es elevar el tiempo de conservación de las propiedades alimenticias, elevar la protección al medio ambiente (microorganismos, luz, temperatura, humedad), mejorar la protección a la manipulación y mejorar la capacidad de transportación y almacenaje. [Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980]

Conforme a la naturaleza de la bebida y a la interacción con el tipo de envase seleccionado se han desarrollado adecuados procesos de envasado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2 TIPOS DE PROCESO DE ENVASADO

De forma general, los procesos de envasado se clasifican como sigue:

- EAN : ENVASADO CON ATMÓSFERA NORMAL
- ESA : ENVASADO SIN ATMÓSFERA
- EV : ENVASADO AL VACÍO
- EAM : ENVASADO CON ATMÓSFERA MODIFICADA
- EAC : ENVASADO CON ATMÓSFERA CONTROLADA [MEMORIA TÉCNICA,2001]

Dentro de los procesos con atmósfera controlada (EAC), se encuentran los procesos VSP (Vacío-Soplo-Presión) conocido también como envasado por vacío-presión, y el proceso SP(Soplo-Presión) ó envasado a presión. [Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980]

Estos procesos son empleados típicamente en el envasado de agua y bebidas de sabor gasificadas o sin gas, vinos y cerveza.

ESTE CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.1 VSP Vacío Soplo Presión (Llenado a vacío -presión) (Ver figura 2.2)

Etapas:

1. CIERRE
2. PRE-EVACUACIÓN
3. CONTRAPRESIÓN
4. LLENADO
5. NIVELACIÓN
6. FIN DE LLENADO Y CIERRE MECÁNICO
7. ALIVIO DE PRESIONES

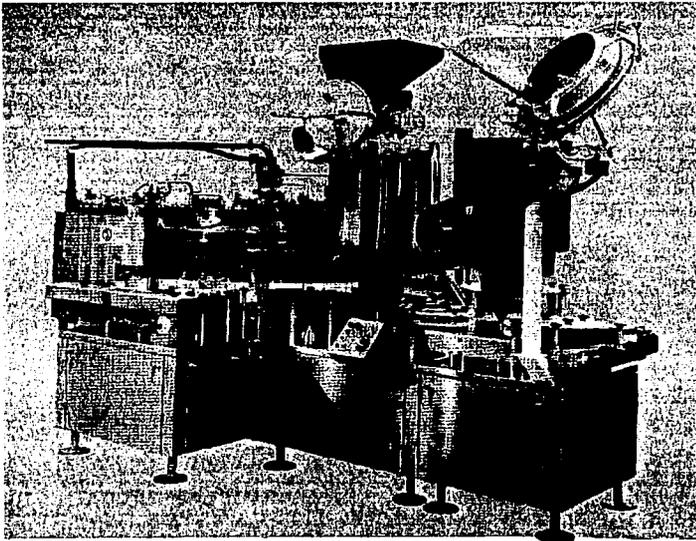
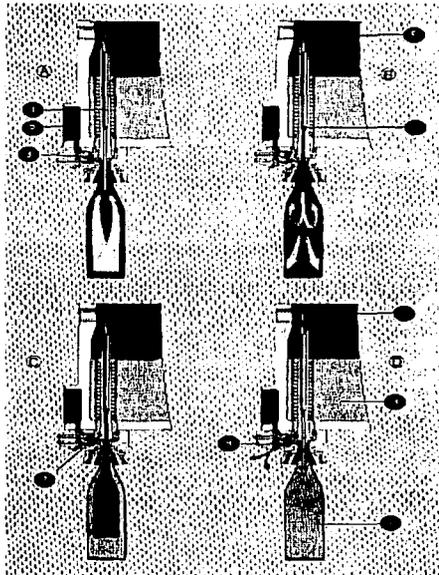


FIG 2.1 MÁQUINA ENVASADORA CON TECNOLOGÍA VSP[Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Proceso de llenado VSP

- | | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| 1.- Aguja de válvula | 8.- Gas |
| 2.- Canal de vacío | 9.- Líquido |
| 3.- Válvula de vacío | 10.- Envase |
| 4.- Válvula de descarga | A.- Evacuación |
| 5.- Accion piñon de mando | B.- Tensión previa |
| 6.- Válvula de gas | C.- Llenado |
| 7.- Valvula de líquido | D.- Fin de llenado / Descarga de aire |

FIG. 2.2 PROCESO DE LLENADO CON TECNOLOGÍA VSP [Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.2 SP Sopro Presión (Llenado a presión).

(Ver figura 2.2)

1. CIERRE
2. CONTRAPRESIÓN
3. LLENADO
4. NIVELACIÓN
5. FIN DE LLENADO Y CIERRE MECÁNICO
6. ALIVIO DE PRESIONES

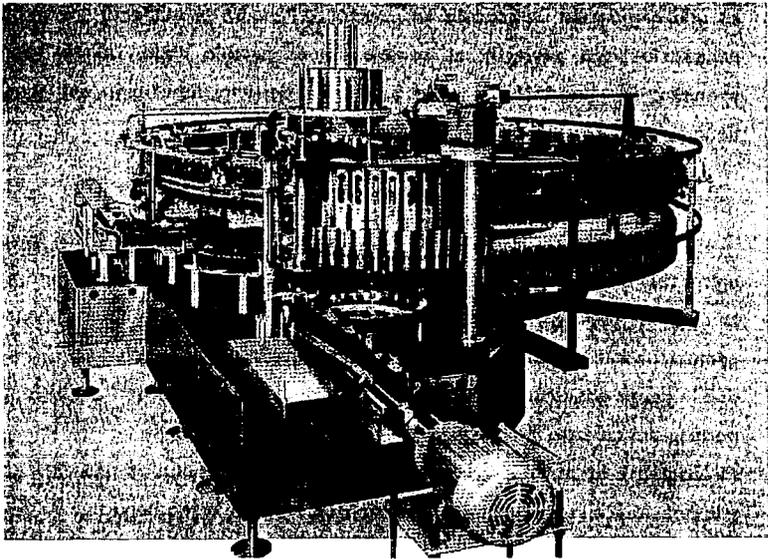


FIG. 2.3 MÁQUINA ENVASADORA CON TECNOLOGÍA SP [Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980]

2.2.2.1 Etapas del proceso de llenado SP (soplo presión)

Las variadas operaciones hechas por la válvula de llenado serán detalladas a continuación, intentando visualizar las operaciones por etapas desde una perspectiva esquemática del proceso de envasado. (Ver figura 5.1)

CIERRE

En esta etapa no hay botellas en la válvula de llenado. La válvula en esta etapa está totalmente cerrada, sin comunicar el contenido del recipiente (ni líquido, ni gas) con el exterior debido a que la válvula se cierra mecánicamente. Esta es una región sin utilización en cuanto al llenado se refiere, sin embargo es necesaria para permitir el cambio de la botella llena, donde termina el proceso, por una botella vacía que entra para la repetición del proceso de llenado.

CONTRAPRESIÓN

Esta operación es iniciada por comandos electromecánicos que levantan la aguja (Nº 1 Fig. 4.1) auxiliados por el resorte (Nº 2 Fig. 4.1) de la aguja. Con lo cual la junta (Nº 6 Fig. 4.1) de la punta de la aguja sale de su asiento comunicando el tubo de aire (Nº 16 Fig. 4.1) que ya esta dentro de la botella con la parte gaseosa del recipiente, debido a que el nivel de la bebida está por debajo del asiento de la aguja.

Físicamente la contrapresión es la igualación de presión de gas del recipiente y la presión del interior de la botella que será en turno llenada.

Esta operación se realiza en algunos segundos, forma un amortiguador de gas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

que recibe el líquido en la botella, en la siguiente operación denominada finalmente llenado. [Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980]

LLENADO

Esta operación se inicia inmediatamente luego de la igualación de presiones de la botella con la presión de gas en el recipiente.

Cuando queda liberado el resorte (N° 7 Fig. 4.1) que apoyado abajo expulsa el anillo (N° 5 Fig. 4.1) para arriba, subiendo con él, el tubo de aire (N° 16 Fig. 4.1) y el disco de goma (N° 21 Fig. 4.1), junto con el tubo guía (N° 3 Fig. 4.1). La válvula esta ahora lista para que el líquido comience a entrar en la botella. Con las presiones iguales en el recipiente y la botella, el flujo hacia las botellas es conseguido por la diferencia de nivel existente entre estos.

Este flujo tiene ciertas peculiaridades que es conveniente resaltar y conocer, comienza por la entrada de líquido a través de los orificios de la carcasa superior (N° 8 Fig. 4.1) y es conducido a través de la carcasa inferior hacia el pico de la botella, al pasar por el esparcidor (N° 15 Fig. 4.1), el líquido será desviado hacia la superficie interior de la botella.

El líquido desciende formando una cortina en la pared interior de la botella para evitar la caída directa en el fondo de la botella. De ahí en adelante la velocidad de llenado es también proporcional a la velocidad de salida del aire a través del tubo de aire (N° 16 Fig. 4.1).

Así pues, el proceso de llenar es el intercambio gradual del volumen del aire contenido en la botella por el volumen del líquido, entrando gradualmente a ella. El aire sube a través del tubo de aire (N° 16 Fig. 4.1) y del tubo guía (N°

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3 Fig. 4.1) hasta la parte gaseosa del recipiente, allí se mezcla nuevamente con el contenido de gas del recipiente. [Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980]

NIVELACIÓN

En esta etapa al subir gradualmente el nivel del líquido, este debe encontrar el extremo del tubo de aire (N° 16 Fig. 4.1) y obstruir el orificio del tubo.

Esto cierra la salida del aire que estuvo abierta durante todo el proceso de llenado, es decir, durante todo el intercambio de aire de la botella por el líquido que entra en ella. Entonces la entrada de líquido se detiene y determina el nivel de la botella.

En realidad alguna cantidad de líquido penetra en el tubo (N° 16 Fig. 4.1), este residuo se debe eliminar. Esta función la realiza un dispositivo de descarga y limpieza del tubo guía y tubo de aire hacia el exterior de la válvula de llenado y del recipiente de la máquina. [Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980]

FIN DE LLENADO Y CIERRE MECANICO

Destaca este paso aclarando que existen dos cierres, el primero se debe a la acción del líquido en la botella como se explicó en la fase de nivelación, el segundo se realiza mecánicamente por el operador de la válvula accionado por un dispositivo automático. Luego de concluida esta etapa, el recipiente estará de nuevo cerrado con el exterior, la botella estará saliendo de la máquina con su contenido de líquido, no habiendo posibilidad de pérdida de bebida ni de los

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

gases en el recipiente, esto es muy importante pues prepara la operación siguiente llamada purga snift. [Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980]

ALIVIO DE PRESIONES

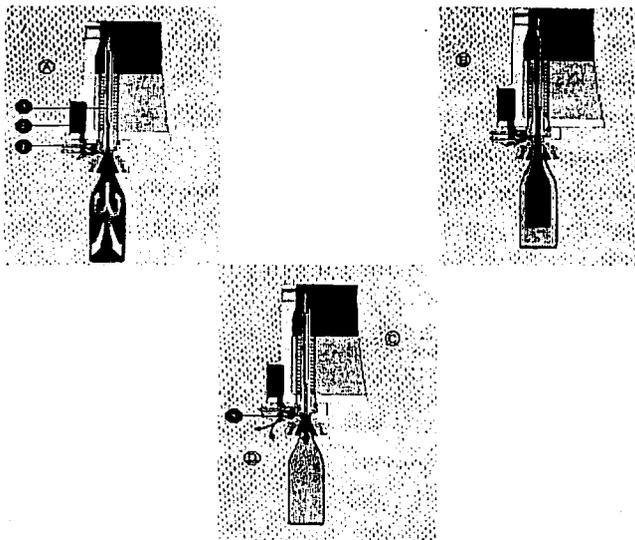
Es la última etapa realizada por la válvula, dada por la naturaleza del proceso se establece una presión mayor que las presiones del líquido y gas contenidos en la botella y la presión del medio ambiente, dicha presión se concentra en la zona superior de la botella, esto es en la zona del cuello de la botella.

La válvula consigue una descompresión momentánea de este volumen de gas a presión concentrado en el cuello de la botella, a través de operar el perno de la purga (Nº 17 Fig. 4.1) de la válvula de llenado utilizando un dispositivo automático con el que la válvula consigue aliviar esta diferencia de presiones de forma suave.

[Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980]

Los pasos siguientes conducen a la botella a la etapa de cerrado hermético que completa el proceso de envasado, sin embargo detallar esta operación no está dentro de este estudio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Proceso de llenado SP

- 1.- Valvula de llenado
- 2.- Accion de valvula
- 3.- Paso de liquido
- 4.- Valvula de descarga
- A.- Tencion previa
- B.- Llenado
- C.- Fin de llenado
- D.- Descarga de aite

FIG. 2.4 PROCESO DE LLENADO CON TECNOLOGÍA SP (Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.3 Comparación entre el proceso VSP y el proceso SP

Estos procesos son similares con la diferencia de que la etapa de pre-evacuación, existe sólo en el proceso VSP. Esta etapa consiste en hacer vacío en el envase con la finalidad de extraer el aire de la atmósfera contenido en el envase antes de la etapa de contrapresión.

Esto da al proceso VSP sobre el proceso SP aplicación en el envasado de bebidas que no deben contener aire, o que el contenido de aire debe ser controlado en niveles bajos, típicamente bebidas de fruta con pulpa, cerveza, champagne. [Manual HOLSTAIN-KAPPERT, 1980]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice. This ensures transparency and allows for easy verification of the data.

In the second section, the author outlines the various methods used to collect and analyze the data. This includes both primary and secondary data collection techniques. The primary data was gathered through direct observation and interviews, while secondary data was obtained from existing reports and databases.

The third section provides a detailed description of the data analysis process. This involves identifying trends, patterns, and anomalies within the dataset. Statistical tools and software were used to facilitate this process, ensuring that the results are both accurate and reliable.

Finally, the document concludes with a summary of the findings and their implications. It highlights the key insights gained from the study and offers recommendations for future research and practice. The author notes that while the current study provides valuable information, further exploration is needed to fully understand the underlying factors influencing the results.

VB

CAPÍTULO III

ANTECEDENTES DISEÑO ROBUSTO

TESIS CON
FALLA DE ORIGI

ANTECEDENTES. DISEÑO ROBUSTO

3.1 Historia

Genichi Taguchi, ingeniero en electrónica con doctorado en estadística nacido en Japón en 1924, desarrolló el MÉTODO TAGUCHI para efectuar diseño de experimentos, DISEÑOS ROBUSTOS, simplificando esta técnica estadística.

La filosofía del Dr. Taguchi empezó a ser considerada a principios de los años 50' s, cuando fue reclutado para ayudar a subsanar el débil sistema telefónico de Japón de la post-guerra.

El diseño de experimentos fue originado con el trabajo de Sir Ronald Fisher en Inglaterra en los años 20' s. Fisher fundó los principios básicos del diseño de experimentos y la técnica asociada de análisis de datos, llamada Análisis de Varianza (ANOVA), durante sus esfuerzos por mejorar el campo de la agricultura. Diferentes tipos de matrices son usadas en la planeación de experimentos para estudiar varias variables simultáneas, entre ellas, el Diseño Robusto hace un fuerte uso de los Arreglos Ortogonales.

El Método Taguchi adiciona una nueva dimensión al diseño de experimentos estadísticos, direcciona explícitamente las siguientes cuestiones que enfrentan todos los productos y diseño de procesos:

- ¿Cómo reducir, económicamente, la variación de la función de un producto en el medio ambiente del cliente?

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- ¿Cómo asegurar que la decisión óptima encontrada durante el laboratorio de experimentos será también para manufactura y el medio ambiente del cliente?

En lo concerniente a las dos preguntas, arriba mencionadas, el Diseño Robusto usa el formalismo matemático del diseño de experimentos pero el proceso ideado detrás de las matemáticas, es diferente en varios caminos. Las respuestas dadas a través del Método Taguchi hacen de éste una herramienta muy útil para mejorar la productividad en el área de investigación y desarrollo. [PHADKE, MADHAV 1989]

3.2 Diseño Robusto

El método Taguchi mejora en forma considerable la productividad en la ingeniería. Tomando en cuenta que existen factores de ruido (variación ambiental durante el uso, la fabricación del producto, y el deterioro del componente) y el costo por error en el campo del diseño robusto este método asegura la satisfacción de cliente.

La idea central del Diseño Robusto es que las variaciones en el desempeño de un producto puede inevitablemente resultar en pobre calidad y en pérdidas monetarias durante el ciclo de vida del producto. Los orígenes de estas variaciones pueden ser directamente clasificadas dentro de dos categorías:

- | | | |
|------------------|---|---------------------|
| • Controlables | ⇒ | Factores de control |
| • Incontrolables | ⇒ | Factores de Ruido |

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Entonces la función principal del Diseño Robusto es reducir la variación de un producto reduciendo la sensibilidad del producto a las fuentes de variación en vez de controlar estas fuentes. El Diseño Robusto es una metodología para encontrar el conjunto de valores óptimos de los factores de control, para hacer al producto o proceso insensible a los factores de ruido. Esto involucra ocho pasos que pueden ser agrupados dentro de cuatro grandes categorías:

1. Identificar la función Principal, efectos colaterales y modos de falla.
2. Identificar los factores de Ruido, condiciones de prueba y características de calidad.
3. Identificar la función objetivo a ser optimizada.
4. Identificar los factores de control y sus niveles.
5. Seleccionar o diseñar la matriz de experimentos usando arreglos ortogonales y definir el procedimiento de análisis de datos.
6. Llevar a cabo la matriz de experimentos
7. Analizar los datos, determinar los niveles óptimos para los factores de control y, predecir el comportamiento bajo estos niveles.
8. Llevar a cabo los experimentos de verificación y planear acciones futuras.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3 Estrategia de robustez

La reducción de la variación es universalmente reconocida como una llave para mejorar la confiabilidad y la productividad. Existen muchos caminos para reducir la variabilidad, cada uno tiene su lugar en el ciclo del producto.

Tratando la reducción de la variación en una etapa particular en el ciclo vital de un producto, uno puede prevenir fallas en las etapas con sentido descendiente. La estrategia de la robustez es prevenir problemas con diseños de producto óptimos y el proceso de fabricación de diseños, proporciona la metodología para que sistemáticamente podamos hacer que los diseños sean menos sensibles a las variaciones. En general puede ser usada para optimizar diseños de productos como para los diseños de los procesos de fabricación.

La estrategia de la robustez utiliza cinco herramientas primarias:

1. El diagrama P se utiliza para clasificar las variables asociadas al ruido, control, la señal (entrada), y factores de respuesta (salida)
2. La función ideal se utiliza para especificar matemáticamente la forma ideal de la relación de la señal-respuesta según lo incorporado por el concepto de diseño para hacer perfectamente el trabajo de alto nivel del sistema.
3. La función cuadrática de pérdida (también conocida como función de pérdida de calidad) se utiliza para cuantificar la pérdida incurrida en por el usuario debido a la desviación del objetivo a perfeccionar.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4. El cociente del Señal-a-Ruido se utiliza para predecir la calidad de desempeño con experimentos en el laboratorio.
5. Los arreglos ortogonales se utilizan para recopilar información confiable sobre los factores del control (parámetros de diseño) con un número pequeño de experimentos. (PHADKE, MADHAV, 1989)

3.3.1 El diagrama P

El diagrama P es una necesidad para cada proyecto del desarrollo. Es una buena manera de definir el alcance del desarrollo. Primero identificamos la señal (entrada) y la respuesta (salida) asociada al concepto de diseño. Por ejemplo, en el diseño de un sistema de enfriamiento para un cuarto el botón regulador del termóstato es la señal y la temperatura ambiente que resulta es la respuesta. Después de deben considerar los parámetros/factores que están más allá del control del diseñador. Esos factores se llaman los factores de ruido. La temperatura exterior, la apertura/cierre de ventanas, y el número de inquilinos son ejemplos de los factores de ruido. Los parámetros que pueden ser especificados por el diseñador se llaman Factores del control.

Taguchi identifica tres tipos de ruido:

1. Ruido externo variables en el ambiente o condiciones de uso que perturban las funciones del producto (p. Ej. temperatura, humedad, polvo, etc.)
2. Ruido de deterioro o interno cambios que ocurren como resultado del uso o almacenamientos.
3. Ruido unidad a unidad diferencias entre unidades de producto que se fabrican.

[WWW.cnde.iastat.edu/staff/bforoura.html/taguchi.html, 2002]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

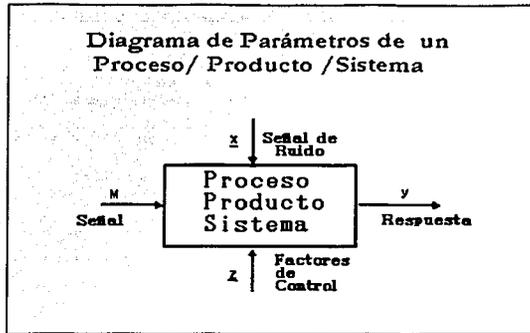


FIG 3.1 DIAGRAMA DE PARÁMETROS DE UN PROCESO/PRODUCTO/SISTEMA

El número de los registros, su localización, tamaño de la unidad de aire acondicionado, aislamiento, son ejemplos de los factores del control.

Idealmente, la temperatura ambiente resultante debe ser igual a la temperatura del punto de ajuste. Así la función ideal es una línea recta en la gráfica de la señal-respuesta . (http://www.ee.iitb.ernet.in/opte/CV_PARA_TAGUCHI_INTRO.htm)

Esta relación se debe mantener en todas las condiciones de operación. Sin embargo, los factores de ruido hacen que esta relación se desvíe de lo ideal.

El trabajo del diseñador es seleccionar factores apropiados de control y sus ajustes, de modo que la desviación sea mínima y a bajo costo. Este tipo de diseño es llamado Diseño Robusto. Esto puede ser alcanzado explotando la no-linealidad del producto/sistema. El método de diseño robusto prescribe un procedimiento sistemático para reducir al mínimo la sensibilidad del diseño y es llamado "diseño de parámetros". [PHADKE, MADHAV: 1989]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La mayoría de fallas en un producto, el costo resultante y las iteraciones del diseño proviene de no hacer caso de factores de ruido durante las etapas tempranas del diseño. Los factores de ruido surgen uno a uno como sorpresas en las etapas subsecuentes de la entrega del producto que causan fallas y reparaciones costosas. Estos problemas pueden ser evitados con el método de diseño robusto, sujetando a las ideas del diseño los factores de ruido como diseño de parámetros.

El paso siguiente es especificar la desviación permitida de los parámetros de los valores nominales. Esto Implica el balancear el costo agregado por tolerancias ajustadas contra las ventajas al cliente. Decisiones similares se deben hacer tomando en cuenta la selección de diversos grados de los subsistemas y los componentes de alternativas disponibles. La función cuadrática de pérdida es muy útil para cuantificar el impacto de estas decisiones de los clientes o en sistemas de alto nivel. El proceso de balancear el costo se llama "Diseño de Tolerancias". [PHADKE, MADHAV:1989].

El resultado de usar el diseño de parámetros seguido por el diseño de tolerancias, es un producto acertado a bajo costo.

La ecuación para la perdida del promedio de calidad, dice que el promedio de perdida de calidad en los clientes depende de la desviación del objetivo e incluso de la varianza. [ROSS, PHILLIP: 1992]

Un buen diseño de optimización requiere minimizar la varianza lo que es muy difícil y mantener el objetivo deseado, por esto el diseñador, lo primero que tiene que hacer es reducir la varianza y después ajustar el punto deseado, y

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

sólo uno o dos factores de control son adecuados para ajustar el objetivo requerido.

El método Taguchi es un mecanismo científicamente disciplinado para la evaluación y la implementación de la mejora en productos, procesos, materiales y equipo. Este mejoramiento esta enfocado a las características deseadas a la par de lograr la reducción el numero de defectos controlando las variables en el proceso y optimizando los procedimientos.

3.4 Matriz de experimentos

Una matriz de experimentos consiste en un conjunto de experimentos donde la combinación de varios parámetros, de procesos a ser estudiados, son cambiados de un experimento a otro. En estadística la matriz de experimentos es comúnmente conocida como *Diseño de Experimentos*, los parámetros son también llamados *Factores* y el conjunto de parámetros es llamado *Niveles*.

Llevar a cabo una matriz de experimentos usando arreglos ortogonales es una importante técnica en el diseño Robusto. Esto da mayores estimaciones confiables del efecto de los factores haciendo pocos experimentos.

Como el nombre lo sugiere, las columnas en los arreglos ortogonales son mutuamente ortogonales. Aquí la ortogonalidad es interpretada en el sentido combinatorio, esto es, por cada par de columnas, ocurren todas las combinaciones de los niveles de los factores y ellas ocurren en igual numero de veces. Esto es llamado propiedad de balanceo y esto implica ortogonalidad.

En nuestra Matriz ortogonal L_9 de Taguchi (PHADKE, MADHAV: 1989), es como sigue:

Matriz de No. Exp.	Numero de columna y factor asignado				Observ. η (ml)
	1 Longitud (L)	2 Altura (H)	3 Presión (P)	4 Diámetro (ϕ)	
1	1	1	1	1	η_1
2	1	2	2	2	η_2
3	1	3	3	3	η_3
4	2	1	2	3	η_4
5	2	2	3	1	η_5
6	2	3	1	2	η_6
7	3	1	3	2	η_7
8	3	2	1	3	η_8
9	3	3	2	1	η_9

En esta matriz, por cada par de columnas, existen $3 \times 3 = 9$ posibles combinaciones de los niveles de factor y, cada combinación ocurre sólo una vez. Para las columnas 1 y 2, las nueve posibles combinaciones de los niveles de factor resultan las combinaciones (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2) y (3,3), esto ocurre en los experimentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, respectivamente. En todos, seis pares de columnas pueden formarse a partir de las cuatro columnas.

Llevar a cabo una matriz de experimentos usando arreglos ortogonales, es análogo a encontrar la frecuencia de la función respuesta de un sistema dinámico usando como una entrada con multifrecuencia. El análisis de datos

que se obtiene a partir de esta matriz de experimentos es análogo al análisis de Fourier. El efecto de los niveles de los factores es la desviación causada de la respuesta de la media general. El nivel óptimo de un factor es el nivel dado por la razón señal/ruido mas alta. [PHADKE, MADHAV 1989]

Los arreglos ortogonales son usados para muchos propósitos en el diseño Robusto, como son:

- El estudio del efecto de los factores de control
- El estudio del efecto de los factores de ruido
- Evaluación de la razón Señal/Ruido
- Determinar las mejores características de calidad o la razón señal/ruido

Los pasos clave para analizar los datos obtenidos a partir de la matriz de experimentos son:

1. Calcular el resumen estadístico apropiado, como la razón señal/respuesta para cada experimento
2. calcular el efecto central de los factores
3. Realizar ANOVA para evaluar la importancia relativa de los factores y el error de varianza
4. Determinar el nivel óptimo para cada factor y predecir la razón señal/ruido para la combinación óptima
5. Comparar los resultados de los experimentos de verificación con la predicción anteriormente hecha. Si los resultados concuerdan con la predicción, entonces las

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

condiciones óptimas se consideran confirmadas; en lo contrario, análisis y experimentos adicionales serán necesarios hacer.

Nota: Es muy importante señalar que en nuestra tesis no realizamos el punto N° 5 por estar fuera de nuestro alcance, pues entonces las conclusiones quedarán hasta la predicción realizada.

Los pasos anteriores serán desarrollados en los capítulo V y VI

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO IV
CASO DE ESTUDIO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CASO DE ESTUDIO

4.1 Tipo de bebida

Para los efectos de este trabajo, el líquido a llenar es una bebida no alcohólica, saborizada sin gas. Para aclarar el concepto, la bebida se apega a la definición de la Ley General de Salud, artículo 215, que dicta:

Bebida no alcohólica: Cualquier líquido natural o transformado, que proporcione al organismo elementos para su nutrición. [1a. CONFERENCIA NACIONAL SOBRE TECNOLOGÍAS DE ENVASADO, 2001]

4.2 Tipo de envase:

El envase empleado es botella PET con capacidad de 600 ml. (Véase foto 4.1), en versión no retornable. Este tipo de envase es el más utilizado en el envasado de bebidas no alcohólicas y el que presenta mayor rango de variación del volumen de llenado, que va de 590 ml a 610 ml.

4.3 Método de envasar.

El método de envasado visto en este estudio es el proceso de llenado SP. Este método fue elegido por ser uno de los métodos más usados en el envasado de bebidas no alcohólicas saborizadas y sobre todo por tener acceso a un banco de pruebas de llenado SP.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.4 Válvula de llenado.

La válvula de llenado es un conjunto de elementos que son principales en el proceso de envasado, pues éste ejecuta la operación de colocar el líquido dentro de las botellas una a una. (Véase Foto 4.2 y Figura 4.1)

Esta es la operación más elemental, sin embargo, es fundamental en el proceso de envasado y es realizado bajo las mas diversas condiciones como ya mencionamos, y estas variables dependen de la naturaleza del líquido a llenar.

[MANUAL HOLSTAIN/KAPPERT, 1986]

El llenado de una botella es en realidad la transferencia del líquido acondicionado en un recipiente de la máquina llenadora a un envase adecuado para este fin.

Cada válvula ejecuta su función en forma cíclica en un cierto numero de segundos; para conseguir diversas producciones horarias se varia entonces el numero de válvulas de llenado que la máquina contiene .

La mejor disposición de las válvulas es hasta ahora la circular, pues para el proceso de llenado son necesarias innumerables operaciones repetitivas.

[MANUAL HOLSTAIN/KAPPERT, 1986]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

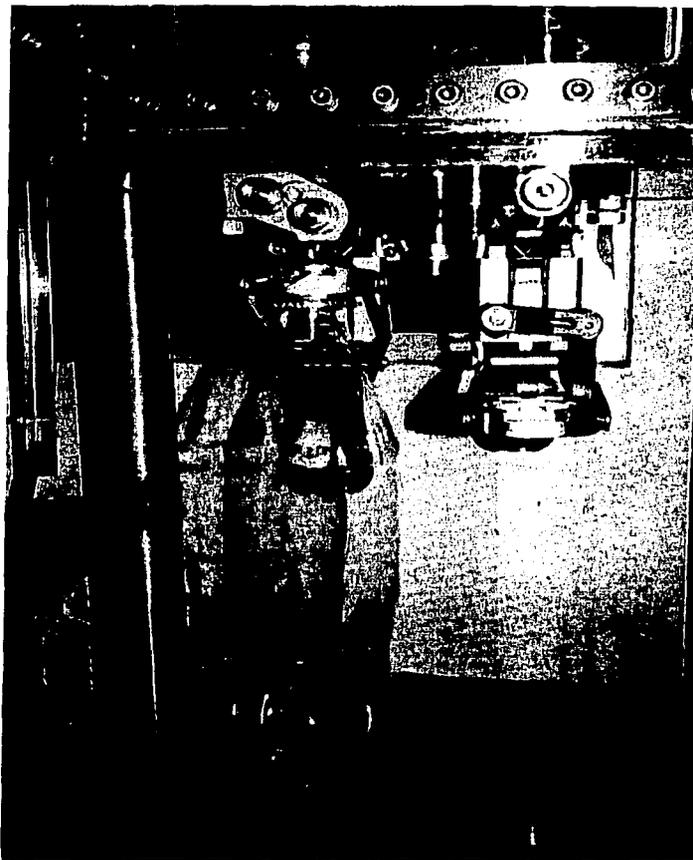


FOTO 4.1 INTERACCIÓN BOTELLA- VÁLVULA DE LLENADO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

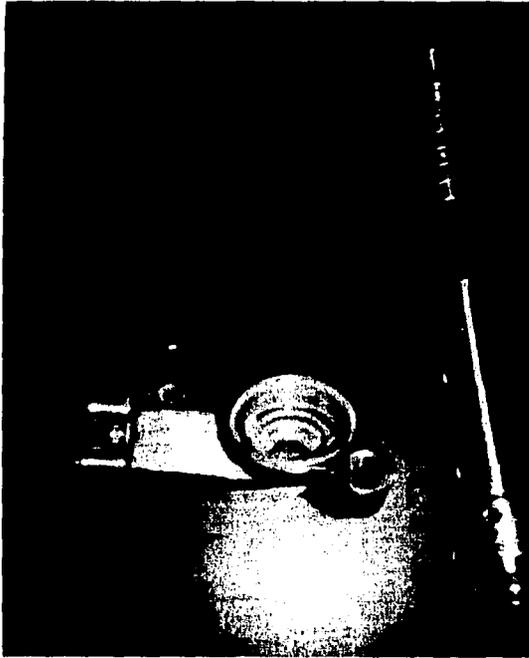


FOTO 4.2 VÁLVULA DE LLENADO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VÁLVULA DE LLENADO SP

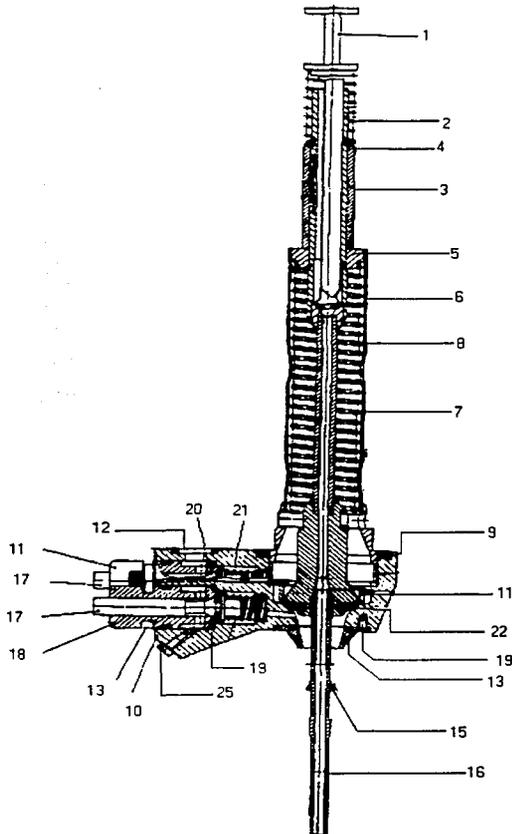


FIG. 4.1 PARTES CONSTITUTIVAS DE LA VÁLVULA DE LLENADO. TECNOLOGÍA SP

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**DESCRIPCIÓN DE PARTES DE LA VÁLVULA DE LLENADO SP,
MOSTRADO EN LA FIGURA 4.1**

POSICIÓN	DESCRIPCIÓN
1	AGUJA COMPLETA
2	RESORTE
3	TUBO DE GUIA
4	TRABA
5	ANILLO
6	JUNTA DE GOMA
7	RESORTE DE COMPRESIÓN
8	CARCAZA SUPERIOR
9	ANILLO DE GOMA
10	CARCAZA INFERIOR
11	ANILLO DE LIQUIDO
12	ANILLO DE GOMA
13	CONO DE LIQUIDO
14	ANILLO DE GOMA
15	ESPARCIDOR
16	TUBO DE AIRE
17	PERNOS DE MANDO
18	CARCAZA DEL PERNO
19	JUNTA DEL PERNO
20	JUNTA PLANA
21	RESORTE
22	EMPAQUE DISCO CONICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

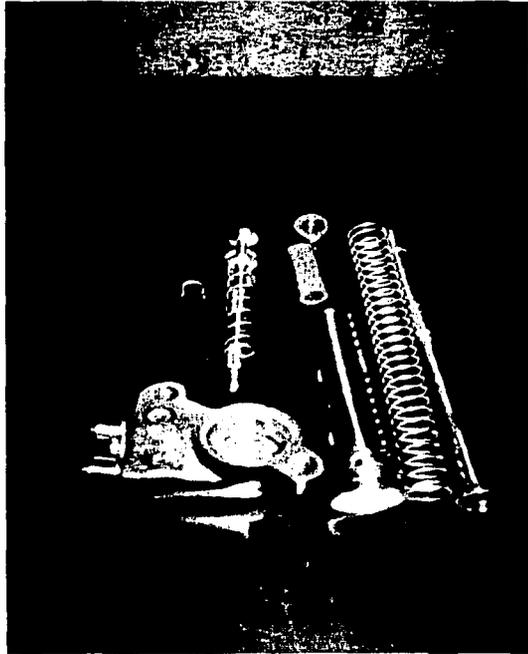


FOTO 4.3 ELEMENTOS DE LA VÁLVULA DE LLENADO

4.5 Descripción del banco de pruebas.

El banco de pruebas está formado por un recipiente metálico de acero inoxidable. De forma rectangular de sección aproximadamente cuadrada, un

elemento neumático de elevación y cierre, junto con un elemento mecánico de centralización de la botella o envase. (Véase Foto 4.4)

El banco esta desarrollado para seguir el proceso de envasado o llenado, con un envase a la vez, en forma practica y analítica. De esta forma el banco es de comandos independientes, operación manual y las variables del proceso son de observación y medición simple, como lo son los manómetros analógicos para la presión del recipiente y el elemento de elevación, un visor para controlar el contenido de bebida en el recipiente y una báscula para medir el contenido neto de bebida en las botellas.

Las elementos de la válvula de llenado se ajustan manualmente con un calibrador vernier, estos son la longitud L del tubo de venteo y la longitud H de la altura del esparcidor. (Véase Figura 4.2)

Para la operación del banco de pruebas solo es necesario un conocimiento básico de los principios de llenado soplo-presión (SP), y seguir la descripción del experimento contenido en este trabajo, para posteriormente realizar un análisis cuidadoso de la información obtenida.

La selección de las variables para el experimento exige el conocimiento del binomio producto-proceso, lo que hace importante a este trabajo para las áreas de manufactura, diseño y control de calidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

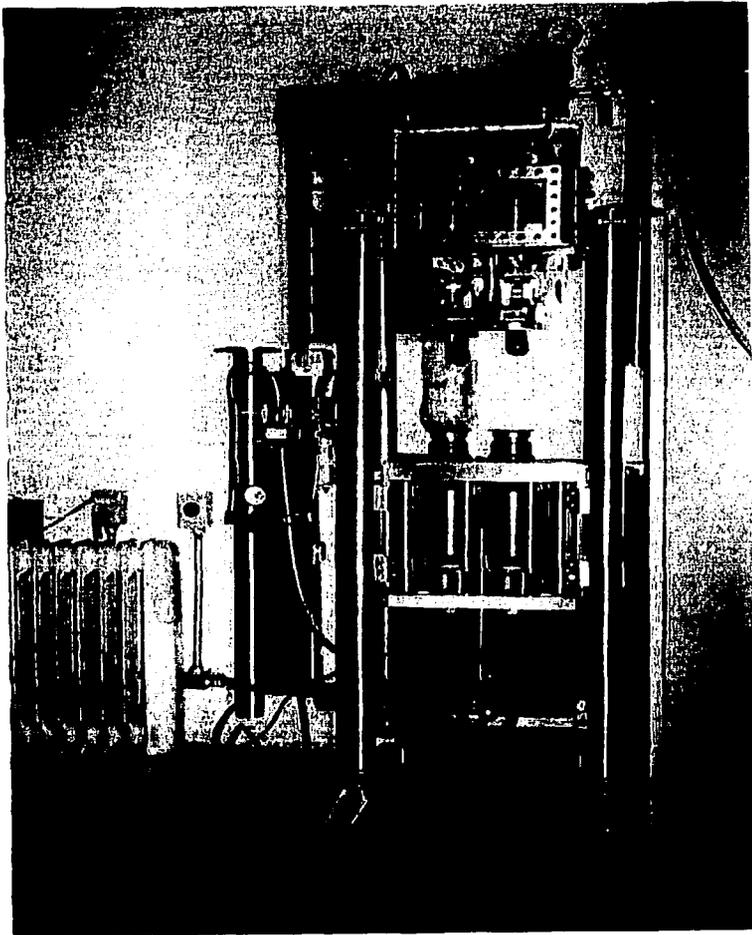


FOTO 4.4 BANCO DE PRUEBAS

TESIS CON
FALLA

BANCO DE PRUEBAS

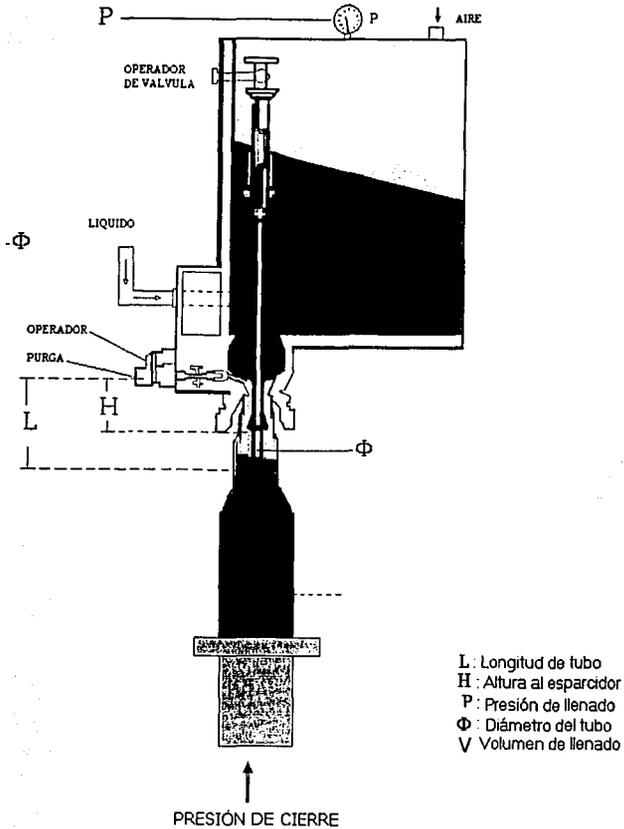


FIG 4.2 ELEMENTOS DEL BANCO DE PRUEBAS

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Del experimento realizado se obtienen las siguientes variables:

L: Longitud del tubo de la válvula. Es la longitud total del tubo de aire de la válvula (No.16 de la Figura 4.1)

H: Altura del esparcidor. Es la longitud a la que se encuentra posicionado el esparcidor (No.15 de la Figura 4.1)

P: Presión de llenado. Es la presión en el recipiente del equipo de pruebas

\emptyset : Diámetro del tubo. Es el diámetro del tubo de aire (No. 16 de la Figura 4.1)

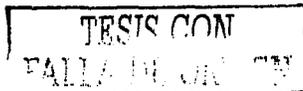
4.6 Consideraciones

Los experimentos se realizaron en un banco de pruebas y no en una línea de producción, debido a los altos costos en paros sin poder experimentar en un proceso real.

Se considera que las variables como la temperatura ambiental y la temperatura del líquido no afectan el proceso de llenado.

4.7 Descripción del experimento

1. -Colocar la bebida en el recipiente del equipo de pruebas, controlando el nivel de la bebida en el recipiente con la válvula de entrada de bebida.
2. Colocar aire limpio al recipiente, regular con la presión indicada en la matriz de experimentos, controlando con la válvula de entrada de aire y con el regulador de presión.



3. Colocar el envase en turno en el elemento de cierre del banco de pruebas.
4. Accionar para abrir el operador de la válvula. Esperar el llenado completo y el cierre automático.
5. Accionar el operador de la válvula para cierre mecánico.
6. Accionar el operador de purga .
7. Retirar el envase lleno taponando manualmente. Se mide el volumen del contenido.
8. Registrar los valores obtenidos de todas las variables.
9. Repetir desde el punto 3 hasta concluir la matriz de experimentos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO V
DESARROLLO
DE EXPERIMENTOS

TESIS CON
FALLA EN CORTEN

1

[Faint, illegible text covering the majority of the page]

DESARROLLO DE EXPERIMENTOS

5.1 Matriz de experimentos empleando arreglos ortogonales.

Una matriz de experimentos consiste en una serie de experimentos donde se cambia el conjunto de los diferentes productos o parámetros de proceso que se tienen para el estudio de un experimento a otro. Después de trabajar la matriz de experimentos, los datos de todos los experimentos en la serie deben ser analizados para determinar los efectos de los diferentes parámetros. Se debe trabajar la matriz de experimentos empleando matrices especiales, conocidas como arreglos ortogonales, facilitando la determinación del efecto de los diferentes factores de manera eficiente; siendo una técnica importante en el Diseño Robusto. [PHADKE, MADHAV: 1989]

5.2 Matriz de experimentos para el llenado de botellas de refresco sin gas.

Considerando un proyecto donde nos interesa la determinación de los efectos de los siguientes cuatro parámetros de proceso:

1. Longitud del tubo de llenado (L).
2. Altura del esparcidor de llenado (H).
3. Presión de llenado (P).
4. Diámetro del tubo de llenado (ϕ).

TESIS CON
FALLA DE OXIGEN

En el proceso del llenado de botellas de refresco sin gas, se debe de mencionar que cada uno de los parámetros tiene tres niveles diferentes, escogidos para cubrir el rango de interés.

Los factores y sus niveles elegidos por disponibilidad del proceso son mostrados en la tabla 5.1:

Tabla 5.1 Factores de proceso y sus niveles

Factor	Niveles		
	1	2	3
L. Longitud del tubo	<u>$L_0 - 2$</u>	L_0	$L_0 + 2$
H. Altura del esparcidor	$H_0 - 5.5$	<u>H_0</u>	$H_0 + 4.5$
P. Presión de llenado	<u>$P_0 - 0.5$</u>	P_0	$P_0 + 0.5$
ϕ . Diámetro de llenado	<u>$\phi_0 - 1$</u>	ϕ_0	$\phi_0 + 1.5$

❖ El nivel de inicio para cada factor es identificado por un subrayado.

Los niveles de inicio, (PHADKE, MADHAV: 1989), (niveles que se emplean para el llenado de las botellas antes de trabajar con la matriz de experimentos) para los cuatro factores, son identificados por un subrayado en la tabla 5.1:

- > L_0 mm longitud del tubo ($L_0 = 92$).
- > H_0 mm altura del esparcidor ($H_0 = 47.5$).
- > $p_0 - 0.5$ kg/cm² presión de llenado ($p_0 = 4$).
- > $\phi_0 - 1$ mm diámetro del tubo de llenado ($\phi_0 = 5$).

Los niveles alternos para los factores se muestran en la tabla 5.1, son: por ejemplo, en la longitud del tubo sus dos niveles alternos empleados para el estudio son: ($L_0 - 2$) mm y ($L_0 + 2$) mm. Estos niveles de cada uno de los factores definen la región experimental o la región de interés.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Otro de los objetivos para este proyecto, es determinar la mejor serie de cada parámetro en el llenado de botellas de refresco sin gas, tratando que sea el más exacto respecto a su contenido. La matriz de experimentos seleccionada para este proyecto esta dada en la tabla 5.2:

Tabla 5.2 Matriz de experimentos.

Matriz de No. Exp.	Numero de columna y factor asignado				Observaciones η (ml)
	1 Longitud (L)	2 Altura (H)	3 Presión (P)	4 Diámetro (ϕ)	
1	1	1	1	1	$\eta_1 = 608$
2	1	2	2	2	$\eta_2 = 589$
3	1	3	3	3	$\eta_3 = 601$
4	2	1	2	3	$\eta_4 = 600$
5	2	2	3	1	$\eta_5 = 605$
6	2	3	1	2	$\eta_6 = 601$
7	3	1	3	2	$\eta_7 = 590$
8	3	2	1	3	$\eta_8 = 587$
9	3	3	2	1	$\eta_9 = 599$

Esta tabla consiste de nueve experimentos individuales correspondientes a los nueve renglones. Las cuatro columnas de la matriz representan los cuatro factores de proceso como los que se indican en la tabla 5.2. Las entradas en la matriz representan los niveles de cada uno de los factores. Así, en el experimento 1 se trabajará con cada factor en el primer nivel; haciendo referencia en la tabla 5.1, se observa que estos niveles del factor para el experimento No. 1 son:

> ($L_0 - 2$) mm longitud del tubo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- > $(H_0 - 5.5)$ mm altura del espaciador.
- > $(P_0 - 0.5)$ kg/cm².
- > $(\phi_0 - 1)$ ml diámetro del tubo.

De manera similar, por referencia de las tablas 5.1 y 5.2, se observa que en el experimento No. 4, cambian los factores de trabajo en diferentes niveles para el proceso siguiendo:

- > Nivel 2: (L_0) mm longitud del tubo.
- > Nivel 1: $(H_0 - 5.5)$ mm altura del espaciador.
- > Nivel 2: (P_0) kg/cm² Presión.
- > Nivel 3: $(\phi_0 + 0.5)$ mm diámetro del tubo.

También se puede referir a la serie del experimento No. 4 de una manera concisa como: $L_2H_1P_2\phi_3$.

La matriz de experimentos de la tabla 5.2 es el arreglo ortogonal L_9 de Taguchi. [ROSS, PHILLIP: 1992]

En esta matriz, como ya habíamos mencionado en el capítulo 3, para cada par de columnas existe $3 \times 3 = 9$ posibles combinaciones de cada nivel de los factores. Para las columnas 1 y 2, las nueve posibles combinaciones de los niveles de los factores, serán las combinaciones (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2) y (3,3); que se encuentran en los experimentos (o renglones) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9; respectivamente.

Un método común de encontrar la función de la respuesta frecuencia de un sistema dinámico de una variación de tiempo en la entrada es observando, en la salida de un sistema para entradas senoidales de diferentes frecuencias, una frecuencia en un tiempo. [PHADKE, MADHAV: 1989] Otra aproximación, es para emplear una entrada de varias frecuencias senoidales y observar las correspondientes salidas. El análisis de Fourier es usado para determinar la

ganancia o la fase de cada frecuencia. El manejo de la matriz de experimentos con varios factores es análogo a él uso de multifrecuencias de entrada para encontrar la función de la frecuencia. [ROSS, PHILLIP: 1992]

En la industria existe una gran variedad de experimentos. Cada experimento tiene un número diferente de factores; algunos factores tienen dos niveles, algunos tres niveles y algunos más.

5.3 Estimación del efecto de los factores.

La estimación del efecto de los cuatro parámetros de proceso, en los valores observados de η para los doce experimentos son:

Primero, el valor de la media total de η para la región experimental definida por los niveles de los factores en la tabla 5.1 esta dado por:

$$m = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \eta_i = \frac{1}{9} (\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_9) \quad (5.1)$$

$$= (608 + 589 + 601 + 600 + 605 + 601 + 590 + 587 + 599) / 9 = (7178) / 9 \\ = 597.78 \text{ ml}$$

Examinando las columnas 1, 2, 3 y 4 del arreglo en la tabla 5.2, se observa que los tres niveles de cada factor son igualmente representados en los nueve experimentos. Así, m es una media total balanceada en la región experimental.

Los efectos de un nivel de factor son definidos como la desviación de la media total. [YAMANE, TARO: 1974]

Examinando los datos experimentales se puede evaluar los efectos de la longitud del tubo en un nivel L_1 . La longitud del tubo en un nivel L_1 para los

experimentos 1, 2 y 3. El promedio de la razón de la S/R (Señal de Ruido) para este experimento, el cual esta denotado por m_{L1} , esta dado por:

$$\begin{aligned} m_{L1} &= (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)/3 & (5.2) \\ &= (608 + 589 + 601)/3 = (1798)/3 \\ m_{L1} &= 599.33 \text{ ml} \end{aligned}$$

Asimismo, el efecto de la longitud del tubo en un nivel L_3 esta dado por: $L_3 = (m_{L3} - m)$

De la tabla 5.2, se observa que para los experimentos 7, 8 y 9; la altura del esparcidor toma los siguientes valores de nivel respectivamente 1, 2 y 3. De forma similar, para estos tres experimentos los valores del nivel en la serie de la presión de llenado y el diámetro del tubo también pueden tomar los valores 1, 2 y 3. Si la cantidad m_{L3} representa un promedio η cuando la longitud del tubo es dada en un nivel L_3 donde los promedios son dados en forma balanceada en todos los niveles de cada uno de los otros tres factores. El promedio de la razón de la S/R para los niveles L_1 y L_3 de la longitud del tubo, tanto para estos como para los diferentes niveles de los factores, se pueden obtener de forma similar. Así, por ejemplo:

$$\begin{aligned} m_{L2} &= (\eta_4 + \eta_5 + \eta_6) / 3 & (5.3) \\ &= (600 + 605 + 601) / 3 = (1806)/3 = 602 \text{ ml} \\ m_{L3} &= (\eta_7 + \eta_8 + \eta_9) / 3 \\ &= (590 + 587 + 599) / 3 = (1776)/3 = 592 \text{ ml} \end{aligned}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Estos efectos son mostrados en el diagrama 5.1:

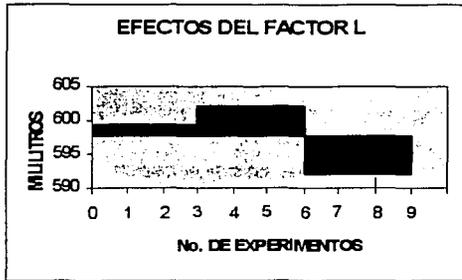


Diagrama 5.1 Esta gráfica muestra la razón de la S/R del factor L en una señal de potencia

Al representar el promedio de la razón de S/R para la altura del esparcidor puede obtenerse como:

$$m_{H1} = (\eta_1 + \eta_4 + \eta_7)/3$$

$$= (608+600+590)/3 = (1781)/3 = 599.33 \text{ ml}$$

$$m_{H2} = (\eta_2 + \eta_5 + \eta_8)/3$$

$$= (589+605+587)/3 = (1781)/3 = 593.67 \text{ ml}$$

$$m_{H3} = (\eta_3 + \eta_6 + \eta_9)/3 = (601+601+599)/3 = (1801)/3 = 600.33 \text{ ml}$$

Estos efectos son mostrados en el diagrama 5.2:



Diagrama 6.2 Esta gráfica muestra la razón de la S/R del factor H en una señal de potencia

De forma similar al representar el promedio de la razón de S/R para la presión de llenado puede obtenerse como:

$$m_{p1} = (\eta_1 + \eta_6 + \eta_8) / 3$$

$$= (608 + 601 + 587) / 3 = (1796) / 3 = 598.67 \text{ ml}$$

$$m_{p2} = (\eta_2 + \eta_4 + \eta_9) / 3$$

$$= (589 + 600 + 599) / 3 = (1789) / 3 = 596 \text{ ml}$$

$$m_{p3} = (\eta_3 + \eta_5 + \eta_7) / 3$$

$$= (601 + 605 + 590) / 3 = (1796) / 3 = 598.67 \text{ ml}$$

Estos efectos son mostrados en el diagrama 5.3:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Diagrama 5.3 Esta gráfica muestra la razón de la S/R del factor P en una señal de potencia. El último cálculo de él promedio de la razón de S/R para el diámetro de llenado puede obtenerse como:

$$m_{\phi 1} = (\eta_1 + \eta_5 + \eta_9)/3$$

$$= (608+605+599) = (1812)/3 = 604 \text{ ml}$$

$$m_{\phi 2} = (\eta_2 + \eta_6 + \eta_7)/3$$

$$= (589+601+590)/3 = (1780)/3 = 593.33 \text{ ml}$$

$$m_{\phi 3} = (\eta_3 + \eta_4 + \eta_8)/3$$

$$= (601+600+587)/3 = (1788)/3 = 596 \text{ ml}$$

Estos efectos son mostrados en el diagrama 5.4:

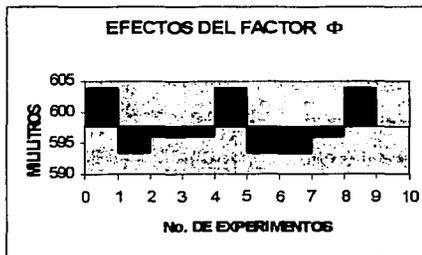


Diagrama 5.4 Esta gráfica muestra la razón de la S/R del factor Φ en una señal de potencia

En donde m_{H_2} sería el promedio de la razón de S/R para la altura del esparcidor en un nivel H_2 . Porque la matriz de experimentos esta basada en un arreglo ortogonal, todos los promedios de los niveles posee las mismas propiedades de balanceo descritas para m_{L_3} .

Tomando los valores numéricos de η listados en la tabla 5.2, el promedio de η para cada uno de los niveles de los cuatro factores pueden obtenerse como se listan en la tabla 5.3. Estos promedios son mostrados gráficamente en el diagrama 5.1.

Estos son separados en cada uno de los efectos de los factores y son comúnmente llamados *efectos de la media*. (PHADKE, MADHAV; 1989)

La estimación del proceso de estos efectos se discuten en cada uno de las diferentes etapas se llama *análisis de medias*. (YAMANE, TARO; 1974)

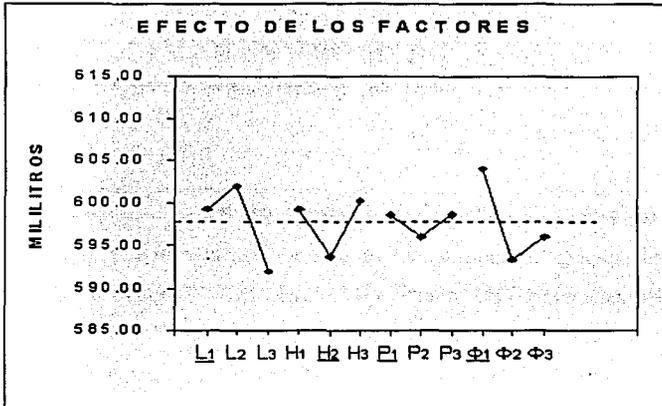
TABLA 5.3 PROMEDIO η PARA EL NIVEL DE LOS FACTORES (dB)

FACTOR	Nivel		
	1	2	3
L. Longitud del tubo	599.33*	<u>602</u>	592
H. Altura del esparcidor	599.33*	<u>593.67</u>	600.33
P. Presión de llenado	<u>598.67*</u>	596	598.67*
ϕ . Diámetro del tubo	<u>604</u>	593.33	596*

❖ La media total es igual a 597.78 ml. El nivel de inicio es identificado por un subrayado, el nivel óptimo es identificado por un asterisco (*).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Gráfica 5.1 Gráficas de los efectos de los diferentes factores



❖ Los límites de confianza de las dos desviaciones estándar son mostrados en los niveles de inicio que se encuentran subrayados.

5.4 Selección de los niveles óptimos de los factores.

Un primer objetivo en el manejo de una matriz de experimentos es la optimización de los productos o diseño de proceso, esto es, para determinar el mejor nivel o el nivel óptimo de cada factor. El nivel óptimo para un factor es el nivel que está dado por un alto valor de η en la región experimental. Algunos efectos estimados pueden usarse para este propósito.

La meta en el proyecto es tratar que las botellas de refresco en su contenido sean homogéneas y lo más cercano a 600 ml. Comparando los valores de la tabla 5.3 es preferible que en la longitud del tubo $\eta=599.33$ ml es preferible a $\eta=592$ ml, porque la diferencia para la media total de 597.78 es muy grande.

TESIS CON
FALLA DE OPCIÓN

Así, la mejor longitud del tubo de llenado es L_1 , la mejor altura del espargidor H_3 , la mejor presión de llenado es P_1 o P_3 y el mejor diámetro de llenado es ϕ_3 , debido a que la diferencia de estos con respecto a la media total es muy pequeña y se puede concluir con ayuda de la matriz de experimentos que la mejor serie para el llenado es $L_1H_1P_3\phi_3$.

5.5 Modelo aditivo para los efectos de factor.

Aunque se hayan empleado simples promedios para estimar el efecto de los factores de los experimentos observados ($\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_9$). También se puede determinar la combinación óptima de las series, examinando el efecto de cada factor de manera separada; la justificación de este procedimiento es la siguiente:

- ✓ Emplear el modelo aditivo como una aproximación.
- ✓ Emplear un arreglo ortogonal para planear la matriz de experimentos.

Al examinar el modelo aditivo. La relación entre η y los parámetros del proceso L, H, P y Φ ; puede ser complicada. La determinación empírica de esta relación puede ser muy costosa. Sin embargo, en otras situaciones cuando η es elegido sensatamente, la relación puede aproximarse adecuadamente con la siguiente ecuación:

$$\eta(L_i, H_j, P_k, \Phi) = \mu + l_i + h_j + p_k + \phi_l + e \quad (5.5)$$

En donde μ es la media total; es decir, el valor de la media de η para la región experimental. La desviación de μ es causado por la serie del factor L en un nivel L_i es l_i ; los términos h_j, p_k y ϕ_l representados por desviaciones similares

de μ causados por los términos H_j , P_k y Φ_l , respectivamente; y e para los términos de error. [PHADKE, MADHAV: 1989]

Al modelo aditivo se le puede referirse también como un *modelo de superposición* o un *modelo de separación de variables*. En un modelo de superposición implica que el efecto total de todos los factores (o variables) es igual a la suma de los efectos individuales de cada factor. Esto es posible para los efectos individuales de cada factor ya sea lineal, cuadrático o de orden más alto. De cualquier manera, en un modelo aditivo se involucran dos o más factores no alojados. [PHADKE, MADHAV: 1989]

Por la definición h_1 , h_2 , y h_3 son las desviaciones de μ causado por los tres niveles del factor L. Así:

$$h_1 + h_2 + h_3 = 0 \quad (5.6)$$

de manera similar:

$$h_1 + h_2 + h_3 = 0 \quad (5.7a)$$

$$p_1 + p_2 + p_3 = 0 \quad (5.7b)$$

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0 \quad (5.7c)$$

Esto puede observarse en la sección 5.3 al estimar los efectos de los factores es equivalente a un apropiado modelo aditivo, definido por las ecuaciones (6.5), (6.6), (6.7a), (6.7b) y (6.7c): para un pequeño método de cuadrados. Esta es una consecuencia de emplear un arreglo ortogonal para planear una matriz de experimentos.

Considerando la ecuación (5.2) para la estimación del efecto de la serie de longitud del tubo en un nivel 1.

$$\begin{aligned}
 m_{.1} &= (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)/3 \\
 &= [(\mu + h_1 + h_1 + p_1 + \phi_1 + e_1) + (\mu + h_1 + h_2 + p_2 + \phi_2 + e_2) \\
 &+ (\mu + h_1 + h_3 + p_3 + \phi_3 + e_3)]/3 \\
 &= [3(\mu + h_1) + (h_1 + h_2 + h_3) + (p_1 + p_2 + p_3) \\
 &+ (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) + (e_1 + e_2 + e_3)]/3
 \end{aligned}$$

Al tomar los valores de las ecuaciones (5.7a), (5.7b) y (5.7c); la ecuación de arriba se reduce a los siguientes términos:

$$m_{.1} = (\mu + h_1) + (e_1 + e_2 + e_3)/3 \quad (5.8)$$

Así, $m_{.1}$ es un estimado de $(\mu + h_1)$

Además el término de error en la ecuación (5.8) es un promedio de los tres términos de error. Si se supone que σ_e^2 es la varianza promedio para los términos de error e_1, e_2, \dots, e_3 . Entonces el error de varianza para el estimado de $m_{.1}$ es aproximadamente $(1/3)\sigma_e^2$. (Nota: Al calcular los errores de varianza del estimado $m_{.1}$ y otros estimados, se tratarán los términos de error individuales como variables independientes aleatorias con media cero y varianza σ_e^2 . En realidad esto es solamente una aproximación, debido a que los términos de error incluidos en el error de la aproximación aditiva; si estos no son estrictamente variables independientes aleatorias con media cero. Además esta aproximación es adecuada porque el error de varianza es usada sólo con propósitos cualitativos.

Al sustituir la ecuación (5.5) en la ecuación (5.3) y verificando que el estimado de $m_{.2}$ es $\mu + h_2$ con error de varianza $(1/3)\sigma_e^2$.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

5.6 Análisis de varianza.

Los diferentes factores afectan en el llenado de las botellas en distintos grados. La magnitud relativa de los efectos de factor pueden determinarse de la tabla 5.3. Los cuales dan el promedio de η para los tres niveles de cada factor. Un mejor sentido de el efecto relativo de los diferentes factores se pueden obtener con la descomposición de la varianza, la cual es comúnmente llamada análisis de varianza (ANOVA). El ANOVA es necesario para estimar el error de varianza por los efectos de factor y el error de predicción de la varianza.

5.7 Analogía con el análisis de Fourier.

Una razón importante para transformar el análisis de Fourier de una señal eléctrica es para determinar la potencia en cada armónica, para evaluar la importancia relativa de las diferentes armónicas. La gran amplitud de una armónica, el largo de la potencia esta adentro y lo más importante de que este adentro es la descripción de señal. Similarmente, un propósito importante de una fuerte analogía entre la ANOVA y la descomposición de la potencia de una señal eléctrica dentro de las diferentes armónicas: (PHADKE, MADHAV: 1989)

- Los nueve valores observados de η son análogos a la señal observadas.
- La suma de los valores cuadrados de η es análogo para la potencia de la señal.
- La media general η es análoga por la parte *dc* de la señal.
- Los cuatro factores son propios de las cuatro armónicas.
- Las columnas en la matriz de experimentos son ortogonales, el cual es análogo para la ortogonalidad de las diferentes armónicas.

La analogía entre el análisis de Fourier de la potencia de una señal eléctrica y ANOVA es mostrada en el siguiente diagrama(5.5):

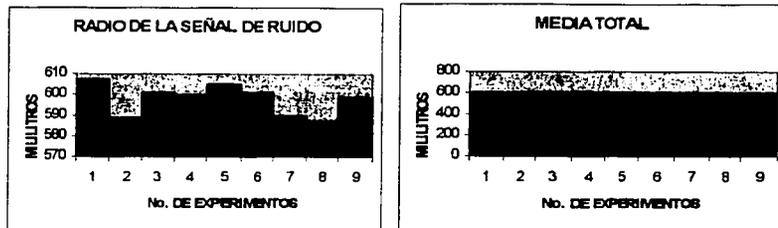


Diagrama 5.5 Se observan las diferencias de cada uno de los experimentos contra la media total.

Los experimentos son ordenados a lo largo del eje horizontal. La media total es trazada como una línea recta de un componente *dc*. El efecto de cada factor es mostrado como una armónica. Los niveles del factor *L* para los experimentos 1, 2, y 3 es L_1 . Si, la altura de la onda es trazada como m_{L1} para estos experimentos. Similarmente, la altura de la onda para los experimentos 4, 5, y 6 es m_{L2} y la altura para los experimentos 7, 8, y 9 es m_{L3} . Las ondas para los otros factores son trazadas de manera similar. Por la virtud del modelo aditivo, el η observado para cualquier experimento es igual a la suma de las alturas de la media total y la desviación de la media causada por los niveles de los cuatro factores. Para referirse a las ondas de los diferentes factores mostrados en la figura anterior. Esto es claro que los factores *L*, *H*, *P* y ϕ son en el orden decreciente de acuerdo a su importancia. (PHADKE, MADHAV: 1989)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.8 Cálculo de la suma de cuadrados.

La suma de los valores cuadrados de η es llamado la gran suma total de cuadrados. Así, tenemos:

$$\begin{aligned} \text{Gran suma total de cuadrados} &= \sum_{i=1}^9 \eta_i^2 \\ &= 608^2 + 589^2 + 601^2 + 600^2 + 605^2 + 601^2 + 590^2 + 587^2 + 599^2 \\ &= 369664 + 346921 + 361201 + 360000 + 366025 + 361201 + 348100 + \\ &344569 + 358801 \\ &= 3216482 \text{ m}^2. \end{aligned}$$

La gran suma total de cuadrados es análogo a la señal total de la potencia en el análisis de Fourier. Esta puede descomponerse en dos partes - la suma de cuadrados debido a la media y la suma total de cuadrados, las cuales son definidas a continuación:

$$\begin{aligned} \text{La suma de cuadrados debido a la media} &= (\text{Número de experimentos}) \times \bar{m}^2 = \\ &= 9(597.78)^2 = 9(357338.27) = 3216044.44 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{La suma total de cuadrados} &= \sum_{i=1}^9 (\eta_i - \bar{m})^2 \\ &= (608-597.78)^2 + (589-597.78)^2 + (601-597.78)^2 + (600-597.78)^2 + \\ &(605-597.78)^2 + (601-597.78)^2 + (590-597.78)^2 + (587-597.78)^2 + \\ &(599-597.78)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 10.22^2 + (-8.78)^2 + 3.22^2 + 2.22^2 + 7.22^2 + 3.22^2 + (-7.78)^2 + (-10.78)^2 + 1.22^2 \\
 &= 104.45 + 77.09 + 10.37 + 4.93 + 52.13 + 10.37 + 60.53 + 116.21 + 1.49 \\
 &= 437.56 \text{ m}^2.
 \end{aligned}$$

La suma de cuadrados debido a la media es análoga a la señal de la potencia dc y la suma total de cuadrados es análoga a la señal de potencia ac en el análisis de Fourier. Porque m es el promedio de los nueve valores de η_i , se tiene la siguiente identidad algebraica:

$$\sum_{i=1}^9 (\eta_i - m)^2 = \sum_{i=1}^9 \eta_i^2 - 9m^2$$

Los cuales también pueden escribirse como:

La suma total de cuadrados =

(la gran suma total de cuadrados) - (la suma de cuadrados debido a la media)

$$437.56 = 3216482 - 3216044.44$$

$$437.56 = 437.56$$

La ecuación de arriba es análoga a la verdadero análisis de Fourier que la señal de potencia ac es igual a la diferencia entre la potencia total y la señal de potencia dc .

La suma de cuadrados debido al factor L es igual a la desviación cuadrada total de la onda para el factor L de la línea representada por la media total.

Existen tres experimentos en cada nivel L_1 , L_2 y L_3 . Consecuentemente:

$$\begin{aligned}
 \text{Suma de cuadrados debido al factor } L &= 3(m_{L1}-m)^2 + 3(m_{L2}-m)^2 + 3(m_{L3}-m)^2 \\
 &= 3(599.33-597.78)^2 + 3(602-597.78)^2 + 3(592-597.78)^2 \\
 &= 3(1.56)^2 + 3(4.22)^2 + 3(-5.78)^2
 \end{aligned}$$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

$$= 3(2.42) + 3(17.83) + 3(33.38) = 7.26 + 53.48 + 100.15$$

$$= 160.89 \text{ m}^2$$

$$\text{Suma de cuadrados debido al factor H} = 3(m_{H1}-m)^2 + 3(m_{H2}-m)^2 + 3(m_{H3}-m)^2$$

$$= 3(599.33-597.78)^2 + 3(593.67-597.78)^2 + 3(600.33-597.78)^2$$

$$= 3(1.56)^2 + 3(-4.11)^2 + 3(2.56)^2$$

$$= 3(2.42) + 3(16.90) + 3(6.53)$$

$$= 7.26 + 50.70 + 19.59$$

$$= 77.56 \text{ m}^2$$

$$\text{Suma de cuadrados debido al factor P} = 3(m_{P1}-m)^2 + 3(m_{P2}-m)^2 + 3(m_{P3}-m)^2$$

$$= 3(598.67-597.78)^2 + 3(596-597.78)^2 + (598.67-597.78)^2$$

$$= 3(0.89)^2 + 3(-1.78)^2 + 3(0.89)^2$$

$$= 3(0.79) + 3(3.16) + 3(0.79)$$

$$= 2.37 + 9.48 + 2.37$$

$$= 14.22 \text{ m}^2$$

$$\text{Suma de cuadrados debido al factor } \phi = 3(m_{\phi 1}-m)^2 + 3(m_{\phi 2}-m)^2 + 3(m_{\phi 3}-m)^2$$

$$= 3(604-597.78)^2 + 3(593.33-597.78)^2 + (596-597.78)^2$$

$$= 3(6.22)^2 + 3(-4.44)^2 + 3(-1.78)^2$$

$$= 3(38.72) + 3(19.75) + 3(3.16)$$

$$= 116.15 + 59.26 + 9.48$$

$$= 184.89 \text{ m}^2$$

Al aplicar el mismo procedimiento en las demás líneas se puede observar que las diferentes sumas de los cuadrados debido a los diferentes factores L, H, P y ϕ son respectivamente 160.89, 77.56, 14.22 Y 184.89. Estas sumas de valores cuadrados son tabuladas en la tabla(5.4).

La suma de los valores cuadrados de los diferentes factores son análogos a la potencia en las diferentes armónicas, y son una medida de relativa importancia de los factores en el cambio de los valores de η .

Tabla 5.4 Tabla de ANOVA para η .

Factor/Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media Cuadrada	F
L. Longitud del tubo	2	160.89	80.44	3.51
H. Altura del esparcidor	2	77.56*	38.78	1.69
P. Presión de llenado	2	14.22*	7.11	0.31
ϕ . Diámetro del tubo	2	184.89	92.44	4.03
Error	0	0	-	
Total	8	437.56		
(Error)	(4)	(91.78)	(22.94)	

- ♦ Las sumas de los valores cuadrados debido a los diferentes factores son análogos a él poder de las diferentes armónicas, y además son una medida de la importancia relativa de los factores en el cambio de los valores de η .

Así, el factor Φ tiene una mayor porción en la variación total de η . En realidad este factor es responsable de $(184.89/437.56) \times 100 = 42.25$ por ciento de la variación de η . El factor L es responsable de la siguiente gran porción en un 36.77 por ciento; El factor H tiene una variación del 17.73 por ciento y el efecto del factor P es de 3.25 por ciento del total de la variación de η . Conociendo el efecto de los factores (esto es, conociendo los valores de l_i , h_j , p_k y ϕ_l), se puede emplear el modelo aditivo para calcular los términos de

error e_i para cada experimento i . La suma de los cuadrados debido a el error es la suma de los cuadrados de los términos de error. Así tendremos que:

$$\text{La suma de cuadrados debido a el error} = \sum_{i=1}^9 e_i^2$$

En el presente caso de estudio, el número total de parámetros del modelo (μ , l_1 , l_2 , l_3 , h_1 , h_2 , h_3 , etc.) es 13; el número de limitaciones, definidas por las ecuaciones (5.5) y (5.7) es 4. El número de los parámetros del modelo menos el número de limitaciones es igual al el número de experimentos. Por lo tanto, el término de error es idénticamente cero para cada experimento. Por lo tanto, la suma de cuadrados debido a el error es también cero. Nota: Esto no es necesariamente la situación con todas las matrices de experimentos.

[PHADKE, MADHAV: 1989]

5.8.1 Relación entre las diferentes sumas de cuadrados.

La ortogonalidad de una matriz de experimentos implica la siguiente relación entre las diferentes sumas de cuadrados:

$$\begin{aligned} &(\text{suma total de cuadrados}) = \\ &(\text{suma de las sumas de los cuadrados debido a los diferentes factores}) + \\ &(\text{suma de cuadrados debido al error}) \end{aligned} \quad (5.9)$$

La ecuación (5.9) es análoga a la ecuación de Parseval's para la descomposición de una señal de potencia dentro de la potencia de las diferentes armónicas. La ecuación (5.9) es usada a menudo para calcular la

suma de cuadrados debido al error, después de calcular la suma total de cuadrados y la suma de cuadrados debido a los diferentes factores.

Para la matriz de experimentos descrita en este proceso, la ecuación (5.9) queda de la siguiente forma:

(Suma total de cuadrados) =

(Suma de las sumas de cuadrados debido a los factores L, H, P y Φ) + (Suma de cuadrados debido a el error)

Nota: estas diferentes sumas de cuadrados son tabuladas en la tabla 5.4 para satisfacer la ecuación de arriba.

5.8.2 Grados de libertad.

El número de parámetros independientes asociados con la entrada propia de una matriz de experimentos, o un factor, o una suma de cuadrados es llamado *grados de libertad*.

El factor L tiene tres niveles, estos pueden caracterizarse por tres parámetros: l_1 , l_2 y l_3 . Así el factor L tiene solo dos parámetros independientes; es decir, tiene dos grados de libertad. De manera similar los factores H, P y Φ ; tienen cada uno dos grados de libertad. En general los grados de libertad asociados con un factor serán: el número de niveles menos uno. Así, los grados de libertad asociados con la suma total de cuadrados es: $9 - 1 = 8$.

La ortogonalidad de la matriz de experimentos implica la siguiente relación entre los diferentes grados de libertad:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

(Grados de libertad de la suma total de cuadrados) =

(La suma de los grados de libertad de los diferentes factores) + (Los grados de libertad del error) (5.10)

La similitud entre las ecuaciones (5.9) y (5.10). La ecuación (5.10) es útil para calcular los grados de libertad del error. En el presente caso de estudio, los grados de libertad de el error son casi cero. Esto es coherente con lo observado anteriormente con los términos de error, son idénticamente cero para cada experimento en este caso de estudio.

Esto se acostumbra para escribir el análisis de varianza en una forma tabular mostrada en la tabla 5.4. La media cuadrada para un factor es calculada por la división de la suma de cuadrados por los grados de libertad.

5.8.3 Estimación del error de varianza.

El error de varianza, el cual es igual a el error de la media cuadrada, puede estimarse como sigue:

Error de varianza =

suma de cuadrados debido a el error / grados de libertad de el error (5.11)

El error de varianza es denotado por σ_e^2 .

Con el interés de sacar la mayor información de una matriz de experimentos, todos o la mayoría de las columnas pueden usarse para estudiar el proceso o parámetros del producto. Como un resultado, los grados de libertad no estiman el error de varianza. No se puede estimar el error de varianza directamente. Sin embargo, una aproximación para estimar el error de varianza se obtiene al calcular la suma de cuadrados correspondiente de los

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

factores que tienen una media cuadrada baja. Como una regla de dedo, se sugiere que la suma de cuadrados correspondiente a la mitad baja de los factores (como quedo definido por las menores medias cuadradas) que corresponden a la mitad baja de los grados de libertad, usados para estimar el error de la media cuadrada o el error de varianza.

Esta regla es similar para considerar la mitad superior de las armónicas en una expansión de Fourier como error y empleando el resto para explicar la función investigada. En el siguiente ejemplo se emplean los factores H y P; para estimar el error de la media cuadrada.

Al observar los valores juntos tienen cuatro grados de libertad y el total de sus sumas cuadradas es igual a 91.78. Por lo tanto el error de varianza es 22.95 ml^2 .

En el análisis de Fourier de una señal, es común para calcular la potencia en todas las armónicas, el emplear esas armónicas con gran potencia para explicar la señal y tratar el resto como error.

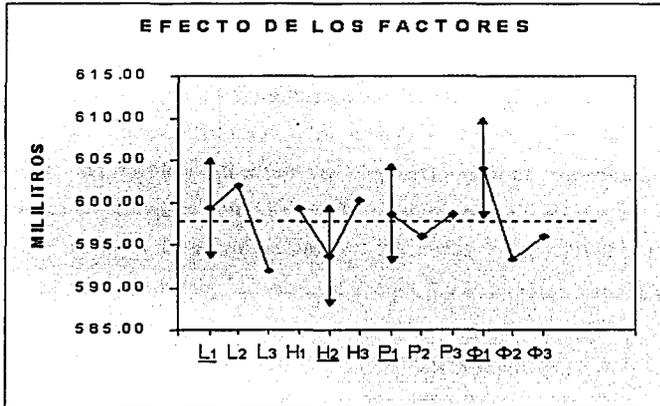
La reunión de la suma de cuadrados de los factores bajos, es exactamente análoga a esta practica. Después de evaluar la suma de cuadrados de todos los factores, se retienen solo los factores de la mitad superior para explicar la variación en la respuesta de η del proceso y el resto para estimar aproximadamente el error de varianza. (PHADKE, MADHAV; 1989)

5.8.4 Intervalos de confianza para los efectos de factor.

Los intervalos de confianza para los efectos del factor son útiles para evaluar el tamaño de las variaciones causadas por los cambios de los niveles en los factores para estimar el error de la desviación estándar. La varianza

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de los efectos de cada nivel de factor para este caso es $(1/3)\sigma^2_e = (1/3)(22.95) = 7.65 \text{ ml}^2$. Así el ancho del intervalo de confianza de la doble desviación estándar, los cuales son aproximadamente 95 por ciento del intervalo de confianza, para cada efecto estimado es $\pm 2\sqrt{7.65} = \pm 5.53 \text{ ml}$.



5.8.5 Radio de varianza.

El radio de varianza, denotado por F en la tabla 5.4, es el radio de la media cuadrada debido al factor y el error de la media cuadrada. Un gran valor de las medias de F , el efecto de estos factores es grande comparado con el error de varianza. También el gran valor de F , lo más importante de estos factores es la influencia de la respuesta de η en el proceso. Si, los valores de F pueden usarse para ordenar los renglones de los factores.

En el diseño robusto se emplea el radio de F solo de forma cualitativa de los efectos relativos de los factores. Un valor de F menor a una media de los

efectos de los factores es pequeño el error del modelo aditivo. Un valor de F mas grande que dos medias de los factores no es totalmente pequeño. Visto que entre más grande que cuatro medias, el efecto de los factores es totalmente grande.

5.8.6 Interpretación de las tablas de ANOVA.

Al hacer referencia a la suma de cuadrados en la columna de la tabla 5.4. Se debe de notar que el factor Φ realiza la mayor contribución a el total de la suma de cuadrados; es decir, $(184.89/437.56) \times 100 = 42.25$ por ciento de el total de la suma de los cuadrados. El factor L hace la siguiente contribución mayor, $(160.8/437.56) \times 100 = 36.77$ por ciento de el total de la suma de cuadrados. Los factores H y P juntos solamente aportan un 20.98 por ciento de la suma total de cuadrados. Cuando un factor hace la contribución más grande, indica la influencia del efecto de este en la respuesta η . En esta matriz de experimentos, se emplean los grados de libertad para estimar los efectos de los factores (cuatro factores con dos grados de libertad, aportan 8 grados de libertad para la suma total de cuadrados). Así, estos grados de libertad nos permiten estimar el error de varianza. Al emplear los factores de la mitad abajo, estos hacen que una media cuadrada pequeña, para estimar el error de varianza. Por lo tanto, para obtener el error de la suma de cuadrados, se debe de sacar el total de la suma de cuadrados de los factores H y P . Estos dan como resultado 91.78 como un estimado del error de varianza. Un gran efecto de un factor es relativo al error de varianza, que se puede determinar de la columna de F . A un gran valor de F , un gran efecto de un factor, es comparado con el error de varianza.

5.9 Predicción y diagnóstico.

5.9.1 Predicción de η bajo condiciones óptimas.

Como se discutió anteriormente, un primer objetivo de conducir experimentos en el Diseño robusto es para determinar el nivel óptimo para cada factor. Para el proyecto de llenado de botellas, una de las dos condiciones óptimas identificadas son L_1 , H_1 , P_3 y ϕ_3 .

Puede ser usada para predecir el valor de η bajo las condiciones óptimas, denotadas por η_{opt} , como sigue:

$$\begin{aligned} \eta_{opt} &= m + (m_{L_1} - m) + (m_{\phi_3} - m) & (5.12) \\ &= 597.78 + (599.33 - 597.78) + (596 - 597.78) \\ &= 597.78 + 1.55 + (-1.78) \\ &= 597.55 \text{ ml} \end{aligned}$$

La suma de cuadrados debido a los factores H y P son pequeñas y estos términos son incluidos como error, no podemos incluir las correspondientes mejoras en la predicción de η bajo condiciones óptimas: ¿Por qué las contribuciones por factores tienen una pequeña suma de cuadrados ignorada? Porque si incluimos la contribución de todos los factores, éste puede mostrar la predicción de mejoramiento en η excediendo el actual mejoramiento realizado, esto es, nuestra predicción puede inclinarse en el lado mayor. Pasando por alto la contribución de los factores con las pequeñas sumas de cuadrados puede reducirse esta inclinación. Esta es una regla de dedo. Para

una predicción más precisa, se necesita el uso apropiado de los coeficientes disminuidos por Taguchi. [PHADKE, MADHAV; 1989]

El modelo aditivo es también útil en la predicción de la diferencia de las dos condiciones de proceso en el llenado de botellas de refresco sin gas. El mejoramiento anticipado en el cambio de las condiciones de proceso de la serie inicial a la serie optima.

El modelo aditivo es también útil en la predicción de la diferencia en el llenado entre las dos condiciones del proceso. El mejoramiento anticipado en el cambio de las condiciones de el proceso de la serie inicial ($L_2 H_2 P_1 \Phi_1$) con la serie optima ($L_1 H_1 P_3 \Phi_3$) es:

$$\begin{aligned} \Delta\eta &= \eta_{\text{opt}} - \eta_{\text{inicial}} = (m_{L1} - m_{L2}) + (m_{\Phi3} - m_{\Phi1}) & (5.13) \\ &= (599.33 - 602) + (596 - 604) \\ &= (-2.67) + (-8) = -2.67 - 8 = -10.68 \text{ ml.} \end{aligned}$$

Los términos H Y P no se incluyen por la razón de que el modelo aditivo incluye el error en estos por no afectar el proceso de gran forma.

5.9.2 Verificación de los experimentos (Conformación).

Después de determinar las condiciones optimas y predecir la respuesta bajo estas condiciones, se lleva a cabo los experimentos con el conjunto de parámetros óptimos y entonces se compara los valores observados con la predicción hecha.

Como ya comentamos anteriormente, la confirmación estuvo fuera de nuestro alcance.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.9.3 Varianza en la Predicción de Error.

Para determinar la varianza en la predicción de error necesitamos determinar la proximidad de los valores de η_{opt} observados con los de η_{opt} de la predicción. El error de predicción, el cual es la diferencia entre η_{opt} observado y η_{opt} de la predicción, tiene dos componentes independientes. El primer componente es el error en la predicción de η_{opt} provocada por los errores estimados de m , m_{L1} y $m_{\Phi3}$. El segundo componente es el error de repetición de un experimento por que estos dos componentes son independientes, la varianza de la predicción de el error es la suma de sus respectivas varianzas.

Al considerar el primer componente. Esta varianza puede mostrarse de la forma igual a $(1/n_0) \sigma_e^2$, donde σ_e^2 es la varianza del error cuya estimación se realizó anteriormente, n_0 es el equivalente en la simple medida para la estimación de η_{opt} . Este equivalente puede calcularse como sigue:

$$(1/n_0) = (1/n) + [(1/n_{L1}) - (1/n)] + [(1/n_{\Phi3}) - (1/n)] \quad (5.14)$$

Donde n es el número de renglones en la matriz de experimentos y n_{L1} es el número de niveles de L_1 repetidos en la matriz de experimentos, estos es, n_{L1} es la duplicación del número del factor en el nivel L_1 y $n_{\Phi3}$ es la duplicación del número de los factores en un nivel Φ_3 .

Al observar la correspondencia entre la ecuación (5.14) y (5.12). El término $(1/n)$ en la ecuación (5.14) corresponde al término m en la ecuación de predicción (5.12); y los términos $(1/n_{L1} - 1/n)$ y $(1/n_{\Phi3} - 1/n)$ corresponden respectivamente a los términos $(m_{L1} - m)$ y $(m_{\Phi3} - m)$. Esta correspondencia

puede usarse para generalizar la ecuación (5.14) para otra fórmula de predicción.

Ahora al considerar el segundo componente. Se debe suponer la repetición de la verificación del experimento en n_r tiempos bajo las condiciones óptimas y llamar el promedio η para estos experimentos como el η_{opt} observado. El error de repetición está dada por $(1/n_r)\sigma_e^2$. Así, la varianza de la predicción del error, σ_{pred}^2 , será:

$$\sigma_{pred}^2 = [(1/n_0)] \sigma_e^2 + [(1/n_r)] \sigma_e^2 \quad (5.15)$$

En el ejemplo, $n_r=9$ y $n_{01} = n_{03} = 3$. Así:

$$(1/n_0) = (1/9) + (1/3 - 1/9) + (1/3 - 1/9) = (1/9) + (2/9) + (2/9) = 5/9.$$

Suponiendo $n_r = 4$. Entonces:

$$\begin{aligned} \sigma_{pred}^2 &= [(5/9)] \sigma_e^2 + [(1/4)] \sigma_e^2 \\ &= [(5/9)(22.95)] + [(1/4)(22.95)] \\ &= 12.75 + 5.74 = 18.49 \text{ ml}^2. \end{aligned}$$

La correspondencia de las dos desviaciones estándar en los límites de confianza para el error de predicción ± 8.6 ml. Si el error de predicción está fuera de estos límites, se sospecha de la posibilidad de que el modelo aditivo no es adecuado. En otro caso se considera que el modelo aditivo es adecuado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6.9.4 Uniformidad de la predicción de la varianza del error.

Es obvio de la ecuación (.15) en la varianza del error de predicción, σ_{pred}^2 , es el mismo para todas las combinaciones de los niveles de los factores en la región experimental. Esto no es cuestionable en una combinación en particular o no corresponde a uno de los renglones de la matriz de experimentos. Antes de trabajar con la matriz de experimentos no se podemos conocer la combinación óptima. Por lo tanto, esto es importante para tener la propiedad de uniformidad del error de predicción.

TESIS CON FALLAS NO SATIS
 FALLA DE ORIGEN

Faint, illegible text covering the majority of the page, possibly bleed-through from the reverse side.

13
8

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al realizar las series de la experimentos en el banco de pruebas, se observó que algunas series dan como resultado los 600 ml, y algunos otros se encuentran dentro de las tolerancias permitidas; ya sea de menor o mayor contenido, pero estos valores no se pueden tomar aun debido a que pueden ser inestables a los factores de ruido, por lo que el método sugiere que se estudien para tomar una serie con valores controlados.

De los resultados observados en los factores de ruido se podría decir que la mejor serie es $L_1H_1P_3\phi_3$, donde

$$L_1 = 90 \text{ mm}$$

$$H_1 = 42 \text{ mm}$$

$$P_3 = 594.5 \text{ Pa}$$

$$\phi_3 = 6.5 \text{ mm}$$

pero como se menciona anteriormente este no es un valor controlado por el método de Taguchi.

La manera de trabajar con un experimento controlado se lleva acaba estimando el efecto de cada factor y clasificando el valor de este como señal de ruido. Debido a que los factores tiene tres niveles, se debe de tomar el valor del efecto de nivel mas cercano a la media general que es de 597.78 ml, los efectos estimados que se seleccionaron para este proceso son los siguientes:

L₁. Longitud del tubo = 599.33

H₁. Altura del esparcidor = 599.33

P₂. Presión de llenado = 598.67

Φ₂. Diámetro del tubo = 596

Aunque estos valores son cercanos al contenido de llenado de las botellas, conforman la mejor serie para el llenado debido a que son valores controlados por el método, estos valores nos garantizan que el llenado de las botellas será homogéneo y lo mas cercano a los 600 ml.

El análisis de varianza asume que las variables del proceso que más afectan llenado, son: la longitud del tubo de llenado y el diámetro del tubo de llenado. Mientras que las variables que no tienen gran influencia en el llenado son: la altura del esparcidor y la presión de llenado.

En estas dos ultimas el método sugiere que en ellas se lleve el error de varianza que se puede generar para el llenado de botellas.

Al estimar los intervalos de confianza, se determina el tamaño de los cambios generados al pasar de un nivel a otro; de tal forma se obtiene una desviación estándar con un intervalo de confianza de ± 5.53 ml.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO VII
CONCLUSIONES

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Faint, illegible text covering the upper portion of the page, possibly bleed-through from the reverse side.

Faint, illegible text covering the lower portion of the page, possibly bleed-through from the reverse side.

CONCLUSIONES

El método de Taguchi aplicado al proceso de llenado de bebidas saborizadas sin gas, resultó una herramienta efectiva para solucionar y controlar la variación del nivel de llenado (contenido neto), el cual era nuestro problema fundamental a tratar en esta tesis. Esto, debido a que el método va dirigido a definir un plan de experimentos basado en pautas bien definidas, usando un juego especial de series llamado arreglos ortogonales con el fin de realizar el número mínimo de experimentos para obtener la información más completa de todos los factores que afectan el parámetro crítico del proceso.

Este método requiere de un importante trabajo de análisis para determinar los parámetros críticos del proceso, así como los efectos de estos parámetros, además de una planeación cuidadosa para el diseño de los experimentos.

El aplicar el método Taguchi a nuestro proceso nos da como resultado, los parámetros del proceso y sus valores, para que sea un proceso robusto, el cual será verificado en el proceso real.

El aplicar y dar seguimiento al método Taguchi de arreglos ortogonales representa beneficios importantes al proceso de envasado actual, debido al ahorro por la disminución de la variación del nivel de llenado (contenido neto) en el proceso, disminución del costo de las pruebas para ajustar valores de proceso en las condiciones actuales y ahorro de gastos aplicados por accesoria y asistencia extranjera para el control de la variación del nivel de llenado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Debido a los resultados obtenidos en esta tesis se propone a los departamentos técnicos de control de calidad, impulsar en el futuro la utilización del método Taguchi de arreglos ortogonales para el control del proceso de llenado de bebidas gasificadas, de tal manera que se analicen y verifiquen los resultados y se comprueben los beneficios de aplicación de este método.

También nos dimos cuenta de que el método Taguchi es una poderosa herramienta para mejorar la productividad ya que se enfoca a mejorar la función fundamental del producto o del proceso y con esto reducir costos de los mismos.

La globalización en nuestros días, fuerza a las empresas a reducir costos, mejorar la calidad y el servicio, así que el método Taguchi es una muy buena opción para alcanzar dichos objetivos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

REFERENCIAS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1950

1950

1. MEMORIA TÉCNICA. 1ª CONFERENCIA NACIONAL SOBRE
TECNOLOGÍA DE ENVASADO DE BEBIDAS.
Instituto Mexicano de Profesionales de Envase y Embalaje, S. C. 2001
2. MANUAL DE SERVICIO DE LLENADORAS. Holstein. Kappert. 1980
3. QUALITY ENGINEERING USING ROBUST DESIGN.
Editado por AT&T Bell Laboratories. 1989
4. TAGUCHI TECHNICAL QUALITY ENGINEERING. Ross, Phillip J.
Edit. Mc. Graw Hill. 29a. edición
5. TAGUCHI APPROACH TO QUALITY ENGINEERING
www.cnde.iastate.edu/staff/bforoura/html/taguchi.html
6. SIX SIGMA CORPORATION
www.isixsigma.com
6. SIX SIGMA
www.sixsigma.com
7. http://www.ee.iitb.ernet.in/~apte/CV_PRA_TAGUCHI_INTRO.htm
8. <http://kernow.curtin.edu.au/www/Taguchi1>

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN