

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería

Maestría en Procesos Industriales



Modelo Estadístico para la Validación de un Sistema Automático de Visión en
Producción Continua, para la Inspección al 100% en Zonas Grafiladas de
Envases de Vidrio

Tesis

Que presenta para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería en Procesos Industriales

José María Rodríguez Cuevas

Director de Tesis

M.C. Rigoberto Zamora Alarcón

Mexicali Baja California

Febrero del 2005

Para Ana Bárbara y José María RM
Mis eternas fuentes de energía, inspiración y amor

Índice

1.0 INTRODUCCION	6
2.0 IMPACTO ECONOMICO QUE PUEDE ESPERARSE DEL PROYECTO	7
3.0 RESUMEN DEL PROYECTO	9
4.0 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	11
5.0 ALCANCES Y LIMITACIONES	14
6.0 OBJETIVOS	16
7.0 METAS O RESULTADOS ESPERADOS	17
8.0 METODOLOGIA	18
9.0 APOYO TÉCNICO	19
10.0 MARCO DE REFERENCIA	20
10.1 Fabrica de Envases de Vidrio	22
10.2 Elaboración de Envases de Vidrio	23
Paso 1 Materias Primas y Casa de Mezclas	23
Paso 2 Horno de Fundición	24
Paso 3 Maquina de Formado	24
Paso 4 Recubrimientos Superficiales y Templado	25
Paso 5 Inspección	25
5.1 Pruebas de Laboratorio	26
Presión interna, carga vertical, impacto, choque térmico	
5.2 Inspección en Línea	26
Inspección de previa, squeezer, transfer, INEX, AGR, luminosa, CIM.	
11.0 JUSTIFICACIÓN DEL MODELO ESTADÍSTICO DE VALIDACIÓN	31
11.1 Sistema de Inspección	31
11.1.1 Cámara de Inspección	31
11.1.2 Iluminación	32
11.1.3 Banda Transportadora	33
11.1.4 Rodillo Giratorio	33
12.0 MODELO ESTADISTICO	35
12.1 Diseño del Modelo para el Experimento	36
12.2 Condiciones del Experimento	39

12.3 Interpretación de Resultados	40
14.0 Bibliografía	45

Índice de Anexos

- Anexo 1. Formato para la Presentación de Proyectos de Investigación.
Sistema de Inspección Robótica para Procesos de Manufactura con
Movimiento Continuo

- Anexo 2. Tabla de Defectos Emhart Powers
Tabla de Inspección Emhart Powers

- Anexo 3. Partes de un Contenedor

- Anexo 4. Bloques de Corridas

- Anexo 5. Matriz de Resultados Bloque Resultado

1.0 INTRODUCCIÓN.

Conforme los productos y sistemas de producción se han venido desarrollando en las diferentes etapas de evolución de la industria, la necesidad de fabricar con mayor calidad, eliminando los costos y tiempos muertos por inspección crecían. Conforme el mercado ha evolucionado, sus necesidades y exigencias se han vuelto más estrictas, cada vez los clientes se fueron involucrando más y más en los procesos productivos, exhortando y exigiendo a sus proveedores (en este caso los fabricantes) una mayor calidad, y un menor costo, con un menor tiempo de entrega. Con tales exigencias del mercado, las líneas de inspección de los fabricantes se fueron extendiendo, instalando estaciones de inspección a lo largo de todo el proceso de producción, hasta llegar a los extremos de revisar el producto unos instantes antes de ser embarcado o inclusive en las mismas instalaciones del cliente, llevando equipos de gente a las instalaciones del cliente a inspeccionar producto de dudosa calidad antes de ser metidos a las líneas del cliente¹.

Los sistemas de calidad modernos rompen este esquema y llevan a la organización a una “gestión de la calidad” en donde todas las áreas pertenecientes a la empresa están involucradas en un “Sistema de Calidad Total”, el cual no solamente controla sino que asegura y gestiona (Administra) la calidad (y el riesgo de la no calidad) del producto o servicio que el cliente recibirá.

En el mundo en que vivimos hay miles de plantas de manufactura que fabrican un sinnúmero de productos. Obviamente, sería maravilloso que todos los productos manufacturados por estas plantas resultara ser un producto de tal calidad que fuera producido, empacado, y enviado directamente a los clientes sin ninguna preocupación por la presencia de defectos o fallas. Esto no solamente aseguraría a los clientes una buena y consistente calidad, pero haría el proceso de manufactura “cero complicado”.

La realidad sin embargo, no es ni siquiera remotamente simple, e inclusive el empresario mas optimista no espera tener un perfecto nivel de “control de calidad”, inclusive es aceptable que algunos productos contengan cierto tipo de fallas, algunas tan serias que causen que el producto sea rechazado. Siendo entonces esto una verdad, un empresario con conciencia de calidad naturalmente quiere eliminar los productos defectivos, e incluso interceptarlos antes de que lleguen a las manos del valioso cliente. Para lograr esto muchas plantas mantienen tropas de inspectores que buscan los

¹ Donald J. Wheeler, Understanding Industrial Experimentation, Second Edition, 1998 SPC Press Incorporated

defectos en los productos mientras estos pasan a través de las líneas o de las diferentes etapas de producción.

Ahora, los seres humanos tenemos muchas grandes y buenas cualidades, pero nuestra habilidad como inspectores visuales no es uno de nuestros puntos fuertes. Sin embargo muchos inspectores son muy buenos analizando e interpretando lo que ven, pero ningún ser humano es perfectamente bueno realizando rutinas prolongadas y repetitivas de inspección. Es un hecho comprobado, que después de un tiempo prolongado, los inspectores de control de calidad visual se aburren, se fatigan o se ciclan, y pueden cometer errores. Además, la inspección por humanos es muchas veces inefectiva para efectos de costos, plantas manufactureras alrededor del mundo gastan anualmente un gran porcentaje de sus horas-hombre disponibles en inspecciones visuales, inspecciones que pueden a la larga, *desempeñarse mas eficientemente y por un menor costo por sistemas de inspección automáticos.*

La industria del vidrio no es la excepción, como se tratará mas adelante, la inspección juega un papel muy importante en la manufactura de envases y contenedores de vidrio. Las máquinas elaboradoras de envases de vidrio debido a su diseño no pueden entregar una eficiencia mayor al 99%. Esto es porque en esencia el diseño del sistema de la elaboración de envases industrialmente (a granel) no ha cambiado mucho desde su invención. Se han agregado controles numéricos, PLC's, etc., y se han logrado avances en diseño de molduras (y su enfriamiento), pero a final de cuentas, el vidrio sigue siendo manejado muy "bruscamente", las temperaturas del vidrio son absorbidas sumamente rápido por las molduras, generando choques térmicos que afectan la consistencia molecular del vidrio lo cual a su vez ocasiona defectos y micro fisuras que no pueden ser "controladas" en su totalidad. Es por eso que se instalan grandes cantidades de equipos variados de inspección, *para dar confiabilidad a un sistema, que desde su diseño, no es 100% confiable.* Y sin embargo, estos equipos son limitados, y existen zonas del envase que siguen siendo "ciegas" para los equipos, es decir, no las pueden inspeccionar los equipos, y se sigue recurriendo al inspector de control de calidad visual humano.

El sistema de inspección propuesto, pretende solucionar este problema de la industria de la elaboración de envases de vidrio.

2.0 IMPACTO ECONÓMICO QUE PUEDE ESPERARSE DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

Un sistema de inspección de visión por computadora es el más eficiente en la industria del vidrio sin detrimento en la calidad. En la actualidad, las empresas mexicanas buscan ser competitivas en un marco que se encuentra dentro de la manufactura de clase mundial, y es aquí donde el proyecto al que pertenece esta tesis actúa en la disminución de costos que tienen gran relevancia para el aumento de las utilidades de las empresas. Dentro del margen de automatización establecida para procesos continuos, el proyecto propuesto permitirá disminuir costos en calidad e inspección, así como en mantenimiento.

3.0 RESUMEN DEL PROYECTO DE TESIS

Se propone generar un modelo estadísticamente válido que pueda dar a conocer la capacidad de inspección de un sistema que visualice al 100% las zonas “grafiladas” de los envases de vidrio en movimiento sobre una línea de producción continua a una velocidad constante, que sea capaz de reconocer características físicas del objeto durante el movimiento; estas características serán defectos preestablecidos y programados al sistema. Este sistema contribuirá en forma positiva a la eficiencia del proceso de manufactura de la elaboración de envases de vidrio, ya que las características físicas (o defectos) que se intentará reconocer con el sistema, con la tecnología actual no son posibles de reconocer.

Las características (o defectos) del envase se pueden determinar durante su traslado a través de una estación montada en la línea de producción, sin interrumpir el flujo continuo que un proceso como este impone.

Para lograr esta tesis, me he integrado a un equipo de investigación de la Universidad Autónoma de Baja California el cual esta formado por 4 Investigadores-Maestros de la UABC, mi puesto dentro del proyecto de investigación es el de “Participante Externo a la UABC” es decir que represento a una persona dentro de la industria, la cual primeramente validará la necesidad de realizar un proyecto como este, y posteriormente diseñaré un modelo estadístico de experimentos, el cual servirá para encontrar las capacidades de inspección del sistema, dejando el modelo establecido para la retroalimentación para mejorar continuamente el sistema hasta lograr que sea funcional bajo estándares y requerimientos de la industria de la elaboración de envases de vidrio. Mis funciones dentro del proyecto de investigación en si, son:

- 1) Colaborar en el diseño del sistema, mediante la asesoría a los demás miembros del proyecto, para dar a conocer la problemática en la industria y las necesidades de un sistema como este.
- 2) Analizar y presentar todas las variables involucradas que un sistema de inspección como este debe considerar. Así como definir las variables a manipular en este equipo en particular.
- 3) Generar un modelo matemático, estadísticamente válido para conocer la capacidad de inspección del sistema en condiciones normales de operación de una línea de inspección continua de envases de vidrio
- 4) Generar las condiciones que regirán la toma de decisiones en cuanto a la capacidad de inspección del sistema.

- 5) Generar las tablas y bloques de corridas de cada experimento a llevarse a cabo para determinar la capacidad de inspección del sistema.
- 6) Dejar establecido el modelo de diseños de experimentos e interpretación de resultados para que se tenga retroalimentación, y así mejorar continuamente el sistema hasta llevarlo a una funcionalidad que cumpla con los requerimientos y estándares de la industria de la elaboración de envases de vidrio.

Los detalles del proyecto de investigación se presentan en el [anexo 1](#).

4.0 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Una de las áreas de la ingeniería que actualmente ha tenido gran desarrollo es la automatización industrial. Esta disciplina busca mejorar varios aspectos de los procesos industriales, reemplazando al ser humano en tareas como la disminución de riesgos en tareas peligrosas o repetitivas, minimizar los tiempos del proceso, la inspección detallada y precisa, todo para proteger al ser humano, eliminar el error humano y por consiguiente elevar la calidad de los productos.

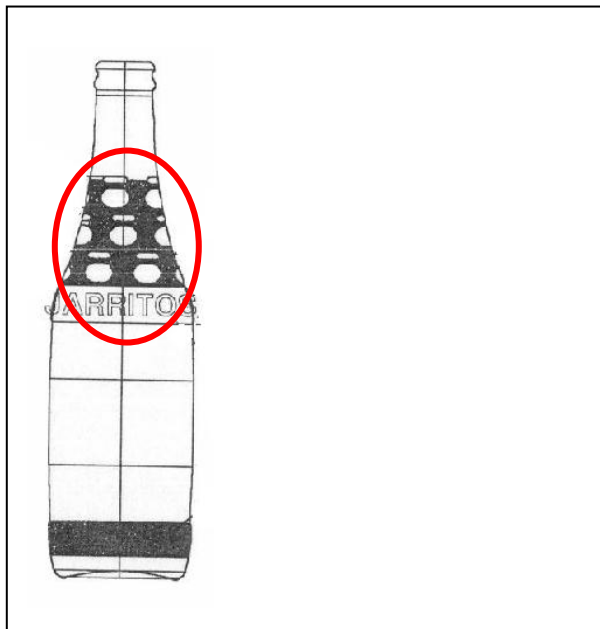
Con todo lo anterior se logra un menor costo de los productos y mayores beneficios a fabricantes, trabajadores y consumidores. Los fabricantes de materiales que usan procesos continuos tales como la elaboración de envases de vidrio, se encuentran bajo la presión creciente de proveer calidad consistente en sus productos. Muchos de los usuarios de estos productos demandan una mayor calidad, un menor costo, una mayor seguridad de la capacidad del producto, y en el caso particular del vidrio, demandan diseños muy elaborados, que tengan mayor resistencia, y sean envases más ligeros (menor cantidad de vidrio en el envase). Estos requisitos más severos, y el hecho de que las máquinas no pueden ser 100% eficientes obligan a los fabricantes a tener una inspección del material al 100%. Los sistemas de inspección en base a un muestreo del producto (generalmente por hechos humanos) fallan regularmente al no detectar muchos de los defectos, y ya no son adecuados para utilizarlos como la única inspección en la línea de producción / inspección, en la actualidad se utilizan como parte del sistema de inspección como lo veremos mas adelante.

En líneas de ensamble o manufactura convencionales, las piezas de trabajo son transportadas a varias estaciones de trabajo a través de una banda transportadora. Cuando una pieza llega a la estación de trabajo, esta es removida de la banda utilizando un mecanismo de posicionamiento y después de ser procesada se regresa a la banda transportadora para ser llevada a otra estación de trabajo en donde se le realizará otro proceso, cada vez que el manipulador toma o coloca una pieza de trabajo en la banda transportadora se debe detener la pieza y posteriormente realizar la operación, esto toma un tiempo que afecta al tiempo completo del proceso y al mismo tiempo decrementa la eficiencia promedio en la producción. Para un proceso continuo como es el de la elaboración del vidrio, inspecciones de este tipo son simplemente no factibles e ilógicas. Debido a que la manufactura del vidrio depende de la fundición de materias en un horno, el cual una vez que es encendido nunca más (hasta la terminación de su vida útil) es apagado, el flujo de la producción es constante y continuo (ver sección de elaboración de

vidrio), es por eso que las estaciones de inspección no deben detener el flujo del envase, deben ser precisas, inspeccionar al 100% la producción y además arrojar información estadística que sirva como retroalimentación del proceso para la toma de decisiones acerca del mismo.

La tabla 1 muestra los beneficios a obtener por el uso de un sistema computarizado visual automático integrado a la manufactura en función de los conceptos de inspección, calidad, transporte y mantenimiento.

AREAS GRAFILADAS. También consideradas “zonas ciegas”, pues los equipos de inspección por visión actuales, no pueden detectar cierto tipo de defectos (generalmente defectos críticos) en estas zonas. Entenderemos una zona grafilada de un envase, una zona donde el envase por diseño mismo de la moldura, tiene protuberancias, dibujos, rugosidades o cualquier otro efecto de decoración establecido por el cliente. Dado que los equipos de inspección por visión utilizan la comparación óptica, los reflejos de sombras o haces luminosos para detectar defectos en el envase, y estas zonas emiten sombras y/o reflejos sin un patrón que pueda fácilmente interpretarse, e incluso engañar a los sensores ópticos confundiendo entre una sombra común o normal debida al diseño o grafilado y un defecto en sí.



La imagen muestra un envase que es manufacturado en una empresa elaboradora de envases de vidrio, en el círculo rojo se muestra el área grafilada del envase, zona ciega para los equipos de inspección existentes en el mercado

Tabla 1. Beneficios a obtener por el uso de un sistema computarizado visual automático integrado a la manufactura

Concepto	Mejora	Beneficio
INSPECCIÓN		
Tiempos de inspección	Inspección al 100%	1. Aumento de utilidades 2. Disminución de costos 3. Aumento de la confiabilidad del producto
Demoras por inspección	No detenerse para realizar inspección Eliminación de demoras	
CALIDAD		
Criterios de aceptación	Flexibilidad a cambios de criterio de aceptación	1. No costos por modificación 2. No tiempo muerto por set-up de adecuación a criterios 3. Flexibilidad a nuevos criterios de aceptación 1. Adecuación total a contorno de inspección 2. No necesita estar detenido el producto para inspeccionarlo 3. Flexibilidad a nuevos criterios de aceptación 4. Mayor higiene en manejo de inspección
Instrumentos de inspección	1. Precisión en contorno total del producto 2. No tiene contacto directo con el producto al inspeccionar	
TRANSPORTE		
Velocidad de movimientos del proceso	Adecuación a distintas velocidades de producción	Adecuación a distintas velocidades de producción sin pérdida de precisión
Movimientos a inspección	Eliminación de movimientos a zona especial de inspección	La inspección se maneja en el proceso y no fuera de él
Manejo de material para inspección	1. Eliminación de movimientos de material para inspección 2. No tiene contacto directo con el producto a inspeccionar	1. No tiene contacto directo con el producto a inspeccionar 2. Mayor higiene en manejo de inspección
MANTENIMIENTO		
Calibración de instrumentos de inspección	1. Disminución de tiempo muerto por calibración de equipo 2. Disminución de tiempo muerto por nuevos criterios de aceptación	1. No costos por modificación 2. No tiempo muerto por set-up de adecuación a criterios 3. Flexibilidad a nuevos criterios de aceptación 1. Eliminación de tiempo muerto por limpieza de equipo de inspección 2. No tiene contacto directo con el producto a inspeccionar 3. Mayor higiene en manejo de inspección
Limpieza de instrumentos de inspección	1. Disminución de tiempo muerto por limpieza de equipo 2. No tiene contacto directo con el producto a inspeccionar	

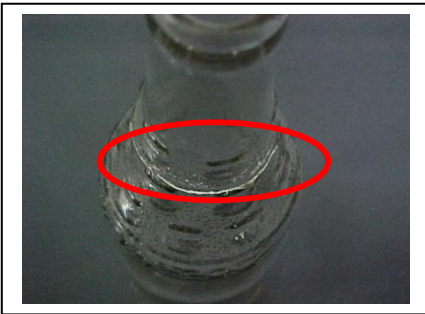
5.0 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO DE TESIS

El proyecto esta limitado a generar el modelo matemático, estadísticamente valido para conocer la capacidad del sistema de inspeccionar dos tipos de defectos a tres niveles de intensidad cada uno en áreas grafiladas de envases de vidrio, consideradas para los equipos de inspección actual como “zonas ciegas”. Y solamente se trabajará con envases de color cristalino, debido a que en la empresa donde se estarán haciendo pruebas, el vidrio cristalino que se produce en el sistema del horno 1, representa un 98% de la producción anual (de este horno) y por lo tanto los efectos y resultados del sistema propuesto serán más significativos.

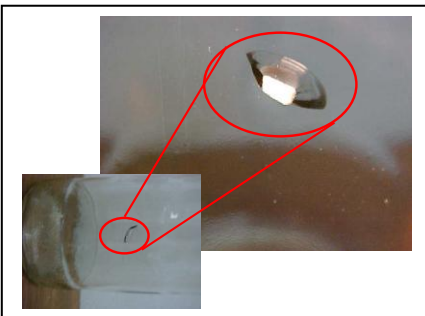
Para realizar experimentos, se utilizará cierto tipo de envases los cuales tienen el grafilado en la zona del “hombro” del envase.

Solamente se trabajará en buscar inspeccionar 2 tipos de defectos:

1.- Rayas Brillosas. Fisuras en la superficie del envase, las cuales corren a través del espesor del contenedor, que cuando al reflejar la luz en ellas aumenta la intensidad del brillo, por eso el nombre de “Raya Brillosa”.



2.- Infundidos. Materiales extraños, ajenos a la mezcla del vidrio, que no lograron ser fundidos en el horno. Los cuales se presentan como piedras de material refractario del horno, y partículas por lo general metálicas, provenientes de contaminación de este material en los lotes de vidrio reciclado externo.



Ambos defectos causan esfuerzos (estrés / tensión) en la estructura molecular del vidrio, que por consecuencia debilitan la resistencia mecánica del contenedor, ocasionando roturas en las líneas de llenado de los clientes o peor aún, ocasionando roturas tardías en los almacenes o centros de distribución de los intermediarios o con el consumidor final.

6.0 OBJETIVO(S)

PARA EL PROYECTO DE TESIS

Evaluación del diseño y desempeño de un sistema de visión automático para la inspección al 100% de la “zona grafilada” de envases de vidrio en procesos continuos.

Obtención del modelo matemático, estadísticamente válido que mediante un modelo similar al de diseño de experimentos, podrá determinar los parámetros de uso donde el sistema sea capaz y confiable. Generando las condiciones del modelo matemático, los bloques de corridas de experimentos, y estableciendo puntos de decisión basándose en los resultados que se obtengan de correr los diferentes bloques de combinaciones de variables; así como todas las tablas de captura de información y bloques de combinación de variables y sus intensidades.

DENTRO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Integración del sistema a una estación de inspección en una línea de manufactura por medio del acoplamiento de componentes eléctricos, ópticos, mecánicos, y software, dentro de una empresa manufacturera elaboradora de envases de vidrio.

7.0 METAS O RESULTADOS ESPERADOS (DEL PROYECTO DE TESIS)

- Obtención de un modelo matemático, estadísticamente válido que mediante una estructura similar a la de diseño de experimentos, podrá determinar los parámetros de uso donde un sistema de inspección visual sea capaz y confiable de detectar dos tipos de defectos establecidos.
- Generar las condiciones bajo las cuales se regirá para la toma de decisiones en cuanto a la capacidad de inspección del sistema.
- Generar los bloques de combinaciones aleatorias de variables para que el equipo encargado de correr estas tenga una base o guía a seguir para llevar a cabo el experimento.
- Generar las matrices necesarias para la captura de información.
- Establecer los criterios para interpretación de los resultados del conjunto de bloques.

8.0 METODOLOGÍA

En la tabla se indican los pasos a seguir por el *proyecto de investigación*, y en la columna de la derecha se indica cuales de estas etapas corresponden al trabajo elaborado en el *proyecto de tesis*:

ETAPA		DESCRIPCIÓN	PARTE EN EL PROYECTO DE TESIS
1	Idear el sistema	En esta etapa, se trabajará de lleno en las necesidades, alcances y limitaciones del sistema, para poder idear el diseño óptimo para las necesidades a satisfacer.	Presentar la problemática y las necesidades de calidad para idear este sistema
2	Diseño del hardware del sistema de visión	En esta tarea se realizará la elección de la cámara, tarjetas de adquisición	
3	Construcción del sistema	Instalación de banda transportadora, instalación de iluminación.	
4	Puesta en operación del sistema	El sistema debe identificar las superficies (cámara), interpretar las lecturas y generar las señales (programa), y que estas sean identificadas como aceptación o rechazos.	
5	Desarrollo de modelo de experimentos y pruebas de hipótesis	En esta etapa se trabajara modelando diseño de experimentos para obtener la capacidad y confiabilidad del sistema, manipulando o "jugando con las variables de velocidad de línea (3 velocidades) e intensidad de iluminación y además esperando obtener lecturas (aceptación / rechazo) de los defectos (2 defectos con 3 diferentes intensidades)	Corazón de este trabajo de tesis. Generando un modelo de pruebas o "experimentos" estadísticamente válidos para conocer la capacidad del sistema
9	Obtención de parámetros de desempeño	Es decir, una vez construido el sistema, y funcionando, y ya que se hallan llevado a cabo los experimentos, se podrá entonces conocer la capacidad o funcionalidad del sistema (sus parámetros de desempeño)	
10	Modelar experimento para mejorar continuamente el proceso	El sistema en cuestión debe ser funcional y ser capaz de inspeccionar confiablemente, bajo estándares de la industria, lo cual se debe lograr haciendo modificaciones en base a retroalimentación. Este modelo generará los datos para dicha retroalimentación	Esta es la tercera etapa de la tesis donde se dejara el mapa trazado para que lo experimentos sean llevados a cabo, y el sistema mejorado
11	Puesta a punto del sistema de acuerdo a estándares y parámetros de la industria	Desarrollo físico de las pruebas y experimentos modelados en el punto anterior.	
12	Realización del manual de operación, seguridad y mantto del sistema.	Este punto será cubierto por un tesista de licenciatura, ayudante de uno de los miembros del proyecto de investigación.	

9.0 APOYO TÉCNICO (Para la elaboración del sistema – no del proyecto de Tesis)

El proyecto será realizado en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California unidad Mexicali. Para la realización del mismo se cuenta con el acceso a la infraestructura siguiente.

1. Laboratorios de instrumentación electrónica y computación del área de postgrado de la Facultad de Ingeniería UABC.
2. Biblioteca. La biblioteca central de la UABC cuenta con una buena cantidad de libros sobre el tema del proyecto.
3. Laboratorios de procesos industriales de la carrera de Ingeniero Mecánico. Donde se cuenta con dos bandas transportadoras horizontales (METZGAR, Modelo No. M701E24181034) de 800 libras de capacidad, $\frac{3}{4}$ caballos de fuerza, 12 pies de longitud y 18 pulgadas de ancho; las cuales se utilizarán para las pruebas del sistema.
4. Laboratorio de Electro-óptica, del Instituto de Ingeniería-UABC.
5. Por lo que se refiere a recursos humanos, los participantes en este proyecto cuentan con un perfil de estudios y trabajo que corresponde al área de interés de este proyecto.

Además, una vez desarrollado, probado y analizado el prototipo, se pretende montarlo en una línea de inspección real en la empresa Fábrica de Envases de Vidrio S.A. (FEVISA). La asesoría por parte de los Jefes de Taller de Vidrio Frió (encargado de instalar, mantener, y dar servicio a los equipos de inspección), Aseguramiento de Calidad, y Gestión de Calidad será de gran importancia y utilidad para el desarrollo en esta etapa del proyecto.

10.0 MARCO DE REFERENCIA

El vidrio como material, tiene propiedades formidables, y sus ventajas han sido exitosamente adaptadas por innovadoras plantas de manufactura del vidrio, para promover su competitividad en el mercado del empaque, y la decoración principalmente.

La madre naturaleza fue la primera en elaborar vidrio, en una forma de roca volcánica llamada obsidiana. Cuando el hombre descubrió este material –junto con otros tipos de vidrio formados naturalmente como las piedras de cristal, ágata y onyx,-lo uso en forma de punta de flecha, cuchillos, y otras herramientas primitivas aprovechando su rigidez y filo. Y no fue hasta 7000 A.C. que el vidrio fue moldeado por el hombre.

Los antiguos Egipcios fueron los primeros grandes usuarios del vidrio, dando a este formas exóticas y llamativas que usaban como joyería, siendo alrededor de los 3000 A.C. la era dorada del vidrio.

No fue hasta los 1500 A.C. que los envases de vidrio se comenzaron a elaborar. Estos primeros contenedores se elaboraban con un método que utiliza un concepto que hasta el día de hoy con los procesos más modernos sigue siendo la base de la formación de los contenedores de vidrio, “el soplar aire a un trozo de vidrio fundido para darle profundidad y la forma de contenedor”. Con la “invención” de “soplar el vidrio”, para el año 200 A.C., en ciudades como Alejandría, donde el vidrio era reservado solamente para ser usado por la realeza, este se volvió indispensable para el transporte de mercancías y un factor decisivo en la promoción del comercio y el intercambio.

En la era moderna (D.C.) miles de años después en 1608, los comerciantes Ingleses que llegaron a Estados Unidos a Jamestown, Virginia diseñaron y elaboraron el primer horno de fundición y la industria norteamericana nació. Y no fue hasta 1881 que a Philip Arbogast de Pittsburg, se le otorgó su primera patente para el proceso de “Prensa-Soplo”, y en 1886, a Howard Ashley en Inglaterra se le otorgó la patente del proceso “Soplo-Soplo” para elaborar envases y contenedores de vidrio. En este periodo de tiempo, la industria manufacturera de la elaboración de envases y contenedores sufrió un cambio que más adelante la llevaría al concepto moderno de manufactura, y bajo el cual se trabaja hoy en día. Fue en 1903 que Owens inventó la máquina automática de formado de envases, haciendo posible la producción en masa de envases y contenedores de peso, capacidad y altura uniformes, revolucionando así la industria del embotellado (altas velocidades), y así el vidrio entró a la era moderna.

Los dos procesos básicos de manufactura son utilizados hoy en día en las máquinas modernas de formado. Ha habido muchos refinamientos en ambos lados, las

máquinas y mecanismos de operación, y en la ingeniería y diseño de las molduras, estos últimos resultando en eficiencias de producción por encima del 97%, y han mejorado los estándares de calidad y resistencia de los envases.

Algunas de las propiedades del vidrio son:

- El vidrio es químicamente inerte. La corrosión por bases ácidas no es un problema
- Es impermeable y no poroso. Resguarda contra la humedad y la invasión de oxígeno. Sanitario y sin olor
- En contenedores es ideal para líneas de llenado de alta velocidad.
- Es sellable. Productos sin usar pueden ser guardados para su uso futuro
- Puede ser apilado.
- Es retornable. Puede ser usado para procesar alimentos y otros productos a altas temperaturas.
- Se puede usar sellado de alto torque. Ayuda a contrarrestar las fugas
- No se deteriora, corroe, o desmancha.
- No necesita de recubrimientos interiores. Los alimentos no se contaminan.
- Es aceptado por la FDA
- Natural e inmediatamente reconocible.
- Resistente a la presión interna.
- Barato.
- Reciclable
- Propiedades de sellado hermético
- No afecta el color ni el sabor del producto que puede contener. Entre Otras

10.1 Fabrica de Envases de Vidrio S.A. de C.V. "FEVISA"

Fábrica de Envases de Vidrio S.A. (FEVISA) es una empresa MEXICANA que se dedica a la producción, venta y distribución de envases y contenedores de vidrio para botellas de sodas, y cerveza. Tiene una antigüedad de mas de 16 años.

En el comienzo FEVISA tenía una producción de solamente una cuarta parte de lo que produce ahora. Hace 15 años fue encendido su primer horno de fundición, produciendo envases de botellas de vino en una máquina que constaba de 8 secciones que producían una sola botella a la vez, y tres años después comenzó a trabajar la segunda máquina similar a la primera (también de 8 secciones) de ese horno. El primer horno tuvo una vida útil de 7 años, y en marzo de 1996 fue destruido, y así arrancó el segundo horno de fundición de la planta, esta vez con 2 máquinas de 10 secciones que pueden producir dos botellas cada una a la vez. Este horno todavía esta en funcionamiento.

En la actualidad FEVISA tiene una producción diaria superior a 2,500,000 botellas, esta cifra se debe al contrato millonario que celebró con la compañía elaboradora de cerveza más grande de EE.UU., Anheuser Busch (Budweiser). Para lograr tal magnitud de producción, y así cumplir con los requerimientos especificados por su ahora más nuevo y más importante cliente, en FEVISA se construyeron 2 hornos más con una capacidad diaria de 9.1 toneladas de materia acumulada cada uno, tales hornos cuentan con dos máquinas de 10 secciones independientes cada uno (4 máquinas en total). Las máquinas son denominadas I.S. o Independent Section (de sección independiente) esto es porque cada sección de cada máquina tiene la capacidad de producir 2 botellas a la vez. Y esto aunado a la producción de las dos máquinas del primer horno arroja una producción de más de 1,500,000 envases de vidrio diarios.

Este trabajo se enfoca en trabajar en el sistema de producción del horno número 1 de FEVISA, dado que es el sistema con mas áreas de oportunidad en cuanto a inspección del producto.

10.2 Elaboración de Envases de Vidrio

El siguiente diagrama explica a grandes rasgos el proceso de la transformación de las materias primas en vidrio, y posteriormente la formación de los envases y contenedores.

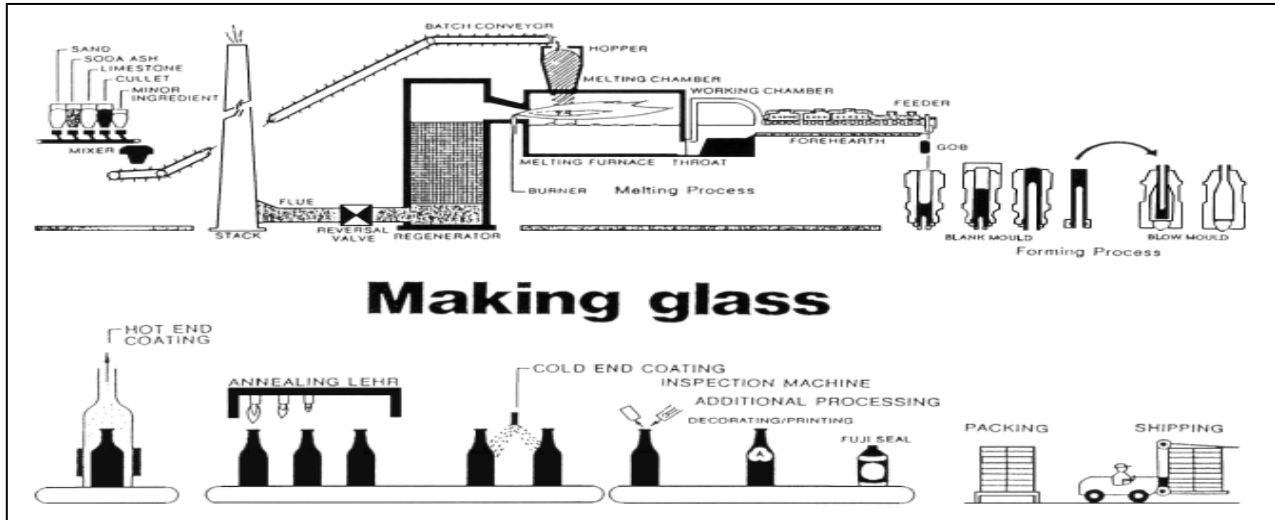


Fig 1. Elaboración de Envases de Vidrio

La siguiente explicación de la elaboración e inspección de envases de vidrio, esta basada en el sistema del horno 1 de Fabrica de Envases de Vidrio S.A. Este es un proceso "soplo-soplo", y es el primer sistema de producción instalado en la planta, el cual elabora una tercera parte de la producción de FEVISA, y atiende la demanda del segundo cliente más importante de la empresa.

Paso 1. Materias primas y Casa de Mezclas

Las diferentes materias primas que conforman la formula del vidrio son mezcladas y fundidas. Estas materias primas son almacenadas en silos, para esto se utilizan elevadores o canjilones, los cuales transportan las materias desde el nivel del suelo donde son descargadas, hasta silos de almacenamiento. Posteriormente por medio de gravedad y con la ayuda de vibradores las materias son mezcladas de acuerdo a la fórmula para hacer vidrio según sea el color a elaborar. Una vez mezcladas las materias, estas son de nuevo elevadas por medio de canjilones hasta una altura por encima del horno en donde hay otro silo el cual contiene ya la mezcla, de ahí pasaran las materias mezcladas al horno de fundición.

Paso 2 Horno de Fundición

Antes de entrar las materias al horno de fundición, estas pasan por un aparato denominado hydramix, el cual consta de un gusano sinfín por el cual pasa la mezcla a la vez que se le inyecta agua, esto con el fin de que al momento de entrar la mezcla al horno, no se volatilice y las partículas más finas de arena se mezclen con los gases que hay adentro del horno y así se pierdan propiedades deseadas desde las concentraciones específicas de las materias.

La materia es alimentada al horno por medio de una “pala alimentadora” la cual esta en constante movimiento de lado a lado en un radio de 50 cm, alimentando la materia en diferentes secciones del horno.

El horno trabaja en 3 secciones: Fundición, es la parte más caliente del horno (aproximadamente 1700°C), y aquí se funde la mezcla de materias; Refinamiento. En esta segunda sección del horno, el vidrio fundido es limpiado de impurezas como piedras, infundidos e inclusive burbujas que se hallan podido formar durante la fundición, ya que el vidrio pasa por una serie de escalones y paredes dentro del horno que van filtrando a la mezcla fundida, en esta zona las temperaturas llegan a los 1400°C; Por último esta la sección de Acondicionamiento, es donde el vidrio pasa por una canal construido aparte del horno, en el cual se puede controlar la temperatura (subir o bajar) del vidrio que ya entrará a la maquina de formado, la temperatura óptima para el formado de envases oscila entre los 1200° y los 1100°C.

Paso 3 Máquina de formado

El primer paso para formar la botella, es alimentar la máquina con el vidrio fundido, para lo cual se deja escapar un chorro de vidrio fundido del final de la sección última del horno (acondicionamiento), y este chorro es cortado en trozos los cuales caen por medio de gravedad en la máquina. Este paso es crítico ya que aquí se determina el peso del envase el cual regula su capacidad volumétrica.

Las máquinas actuales de formado de vidrio, son denominadas I.S. (Independent Section), ya que constan de secciones independientes que elaboran envases, esto es, las maquinas pueden tener desde una hasta 30 secciones, y cada una de estas funciona independientemente de las otras, es decir que si se para una sección, las demás siguen funcionando sin problema alguno, o por el contrario, se pueden parar todas las secciones de la máquina con la excepción de una y ésta funciona como si nada sucediera. Esto facilita de sobre manera los mantenimientos y trabajos sobre las máquinas sin afectar (si

se hace un buen programa de mantenimiento preventivo) la productividad de la máquina. Además de esto existen máquinas con secciones que pueden elaborar, una, o dos, tres y hasta cuatro envases a la vez. FEVISA cuenta con 5 máquinas de 10 secciones dobles (es decir que pueden elaborar 2 botellas a la vez), y con una máquina de 10 secciones triples.

Paso 4 Recubrimientos Superficiales y Templado

Una vez formado el envase este es atomizado por una solución óxido-metálica la cual sirve como base para un recubrimiento que se describe mas adelante, una vez atomizado, el contenedor pasa a través de otro horno el cual aumenta su temperatura hasta 900°C y después la disminuye lenta y gradualmente hasta 80°C, esto para eliminar esfuerzos y tensiones que se pudieron haber formado en las moléculas del vidrio debido al tremendo choque térmico que sufre este al ser formado el envase (de 1100° a 600°C en menos de 40 segundos). Saliendo de este horno, el envase es rociado con un polímero, para darle lubricidad y el envase pueda resistir el “manejo” que se le da a través de las líneas de inspección del elaborador, y de las líneas de llenado del cliente.

Paso 5 Inspección

Un “buen” contenedor es uno que pase por las líneas de llenado de los clientes sin causar ninguna dificultad y contenga el producto hasta el consumidor final. Por lo tanto es esencial que antes de que un contenedor sea vendido, este pase exitosamente la inspección de estándares que cumplan con los requerimientos del cliente. Hay aproximadamente 1000 defectos que se pueden formar en el envase durante el proceso de producción, algunos fuera del control del operador, es por eso que es importante que el personal de producción conozca y aprenda los defectos y sobre todo que sepa que remedios usar para poder eliminarlos. ([Ver anexo 2, Tabla de defectos Emhart Powers](#))

La inversión en equipos de inspección por parte de las empresas elaboradoras de vidrio representa aproximadamente un 25% de la inversión total en equipos (hornos, maquinas formadoras, y equipos de inspección) esto para respaldar el hecho de que las máquinas I.S. siguen conceptos que desde su diseño no son perfectos, es decir los defectos se siguen generando en los envases independientemente de la capacidad tecnológica y humana de la planta. Esa es otra discusión en la cual no se adentrará en este trabajo.

La inspección de los envases se hace bajo ciertas normas las cuales se nombran a continuación, estas son solamente algunas de las pruebas más importantes a las que los envases son sometidos:

5.1 Pruebas de Laboratorio.

1. Pruebas de Presión Interna. (ASTM C-147)

Los envases deben de resistir cierta presión que se les ejerce desde su interior, mas si estos son para envasar líquidos con gas (sodas o cerveza).

Esta prueba mide la resistencia del envase a no reventarse por problemas de presión interna.

2. Prueba de Carga vertical. (ISO 8113)

Los envases generalmente son sellados o tapados por su parte superior, esta prueba mide la resistencia del envase a soportar cargas (fuerzas) verticales.

3. Pruebas de Impacto (DIN 52 295)

Esta prueba crea esfuerzos de tensión en las partes sensibles del contenedor como el hombro, talón, y corona. ([Ver anexo 3. Diagrama de partes de un contenedor](#)) Los envases en las líneas de inspección de la planta elaboradora y en las líneas de llenado de los clientes están en constante golpeteo entre ellos, esta prueba simula ese golpeteo y mide la resistencia del envase a tales golpes.

4. Prueba de Choque Térmico (ASTM C-149)

Provee la medición del envase y su habilidad a soportar esfuerzos creados cuando es sujeto a cambios bruscos de temperatura.

5.2 Inspección en Línea. ([Ver anexo 4. Sistema de Inspección en Línea - fotos](#))

Además de las pruebas de laboratorio, y por razones que hemos estado explicando a lo largo de este documento, los envases de vidrio deben ser inspeccionados al 100%, para lograr esto sin interrumpir el flujo constante del vidrio a través de los hornos y las maquinas de formado, lo cual ocasionaría desperdicios grandes de dinero, la inspección debe hacerse en línea. A continuación se presenta un diagrama de la línea número 11 de producción de envases de vidrio de FEVISA, en el diagrama podemos ver la forma lineal y continua del sistema de producción utilizado en la mayoría de las plantas “vidrieras”, y lo utilizaremos como referencia para todos efectos que este trabajo conlleve.

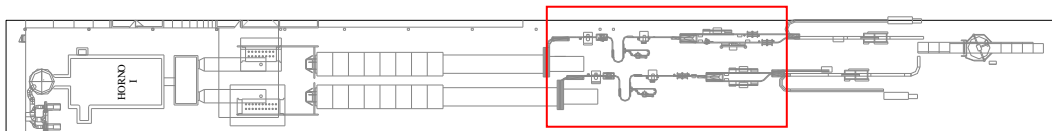


Fig 2. Línea de producción / inspección típica de envases de vidrio

En rojo esta encerrada la parte de la línea donde se encuentra la inspección y las diferentes estaciones y/o equipos que la conforman. En todas estas estaciones de inspección se revisan diferentes características de los envases, muchas de estas características solamente pueden ser inspeccionadas por equipos automáticos que puedan lograr inspecciones acertadas al 100% manteniendo siempre el mismo nivel de confianza durante periodos muy prolongados de tiempo y a la alta velocidad que se mueven los envases a través de la línea. A continuación veremos detalladamente uno por uno los equipos / estaciones de inspección de la línea de producción donde se implementara el sistema, con el fin de lograr un entendimiento y una conciencia de la necesidad e impacto que un sistema de inspección tendrá en este tipo de industria. Pues no solamente no existe un sistema, que logre inspeccionar zonas grafiladas, en la fabrica donde se implementara sino que en la actualidad no hay una planta elaboradora de envases de vidrio que cuente con un sistema automático de inspección para zonas grafiladas, como veremos mas adelante estas zonas solamente se inspeccionan con el apoyo de una persona, también veremos las desventajas de este método actual.

Inspección de Previa.

Es la primera inspección al producto en el área de “Vidrio Frío”. Se encuentra justo a la salida del templador de la línea de producción. Esta inspección es realizada por un Inspector(a), sus rutinas incluyen:

- Cada 12 horas sacar una muestra de 20 envases (las 20 cavidades que puede producir la máquina), y revisar dimensiones de cuerpo y corona (boquilla del envase) con calibres pasa no-pasa; peso; espesores; defectos visuales.
 - Revisar que los equipos de inspección de las líneas estén tirando correctamente los defectos.
 - Registrar todos sus resultados en el sistema de comunicación interna para mantener la información del producto actualizada.

Squeezer (Apretador)

Es la segunda inspección al producto en el área de “Vidrio Frío”. Se encuentra justo a la entrada a las líneas de inspección. Inspección al 100% en línea.

- Esta inspección es realizada por un equipo el cual:

- 1) Ejerce presión sobre las paredes del envase, el cual pasa a través de un rodillo y una banda, si el envase cuenta con alguna imperfección que lo debilite, como fisuras, micro fisuras, y/o pared delgada.
- 2) Los pedazos de vidrio de los envases rechazados siguen en la banda por la que van los envases y son rechazados en el “transfer”.

Transfer

Es el tercer equipo en la línea de inspección en el área de vidrio frío. Se encuentra justo a la salida del squeezer (apretador). No es un equipo de inspección.

Este equipo transfiere el envase de una banda a otra sujetando al envase de las paredes, para que de esta manera los pedazos de vidrio que quedaron de envase “rechazado” por el squeezer caigan a la banda de rechazo

INEX 5*512 Súper Inspector

Es la tercera inspección al producto en el área de Vidrio Frío. Se encuentra después de una curva “de acumulamiento”. Inspección al 100% en línea. Que utiliza cámaras que graban la imagen de cada envase que inspecciona y después la compara contra un estándar de producto.

Este equipo realiza:

- Inspección en la “pared” del envase, buscando irregularidades como arrugas, piedras, infundidos, columpios, etc.
- Inspección dimensional. Altura, diámetros del cuerpo-cuello, inclinados, deformes

AGR

On line Thickness Measuring System

Es la cuarta inspección al producto en la línea. Se encuentra después del INEX. Inspección al 100% en línea. El equipo utiliza cabezas sensoriales (capacitores), para medir el espesor del envase hasta en 4 zonas, rechazando todo envase que se encuentre fuera de las especificaciones.

Luminosa

Es la quinta estación de inspección al producto en la línea. Se encuentra después del AGR.

Este equipo esta instalado para contrarrestar las debilidades de los demás equipos instalados a través de la línea. Aproximadamente, el 90% de los envases que se fabrican en la línea de producción número 11 de FEVISA son "grafilados" es decir tienen un grabado en su cuerpo. Este grabado es diseñado por el cliente y es para dar cierto aspecto deseado al envase. El problema es que para detectar cierto tipo de defectos (infundidos, checks, rayas brillosas, plieques entre otros) en zonas grafiladas, los equipos instalados no tienen la capacidad. La luminosa consiste en un plano blanco luminoso (lámpara) antepuesto al paso de los envases para que una persona este viendo todos los envases que pasan y poder observar y reconocer defectos que los equipos no rechazan. Los inspectores en la luminosa son (o deberían ser) rotados cada 15 minutos, para evitar fatigas que pueden causar errores de inspección, los cuales probablemente resulten en producto no conformante que llegue a las líneas de llenado de los clientes.

CIM

(Combined Inspection Machine)

Es la sexta inspección en la línea en el área de Vidrio Frío.

Se encuentra después de la luminosa

- Inspección al 100% en línea. Es una estación doble.
- Este equipo combina las funciones de un Inspector de doble cabezal (Plug y Dip) y de un "check detector".

El doble cabezal inspecciona:

- Plug inspecciona los envases buscando cuellos chupados, introduciendo un pistón por la boca del envase.
- Dip, inspecciona coronas mal formadas y/o deformes.

El Check Detector (detector de fisuras) revisa la corona y talón buscando fisuras o checks.

Como podemos observar la inspección al 100% que se realiza en los equipos y estaciones no es del todo segura pues para inspeccionar las áreas del envase grafiladas, seguimos requiriendo el ojo y buen juicio de un inspector humano. Ahora los seres humanos tenemos muchas grandes y buenas cualidades, pero nuestra habilidad como inspectores visuales no es uno de nuestros puntos fuertes. Sin embargo muchos inspectores son muy buenos analizando e interpretando lo que ven, pero ningún ser

humano es perfectamente bueno realizando rutinas prolongadas y repetitivas de inspección. Es un hecho comprobado, que después de un tiempo prolongado, los inspectores de control de calidad visual se aburren, se fatigan o se ciclan, y pueden cometer errores.

El sistema en el que se trabajará propone eliminar estas dudas y evitar pérdidas a la empresa por retrabajo (en este caso triturar y volver a fundir el vidrio), reclamaciones de proveedores, y reinspecciones.

11.0 Justificación del Modelo Estadístico de Validación / Marco teórico

Para poder diseñar un experimento válido estadísticamente que su resultado sea el conocimiento de la capacidad de operación de un sistema de inspección, primeramente se debe de conocer la manera de funcionar del sistema.

11.1 Sistema de Inspección

El sistema de inspección esta diseñado para trabajar en línea, es decir podrá operar montado en una línea típica de inspección de envases de vidrio como la que se muestran en paginas anteriores.

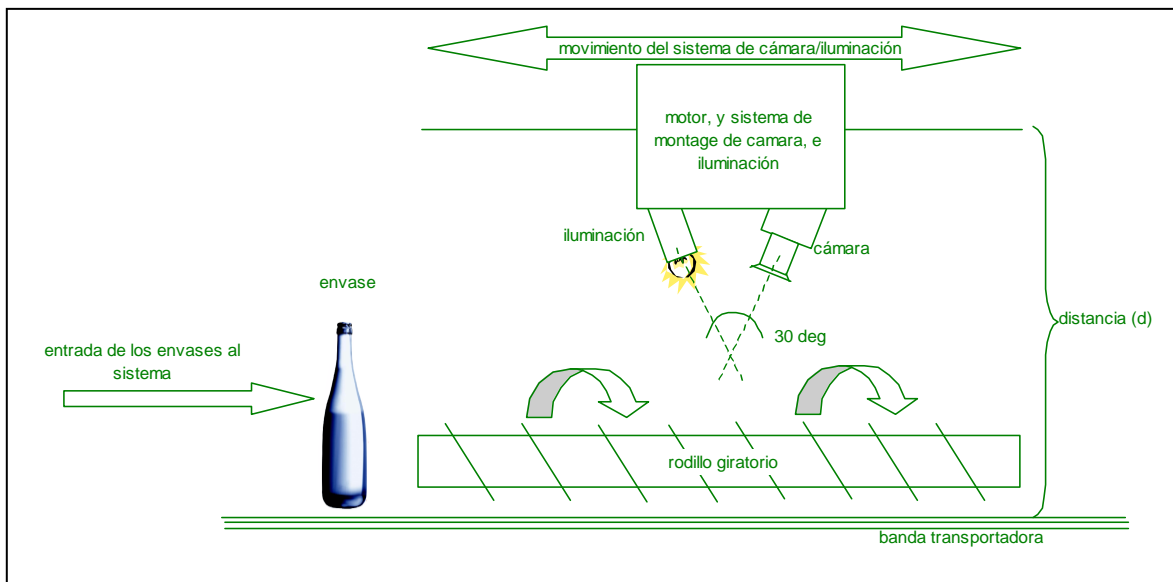


Fig 3. Sistema Automático de Visión en Producción Continua, para la Inspección al 100% en Zonas Grafiladas de Envases de Vidrio

Las variables de control que pueden ser manipuladas y que afectan directamente la capacidad de operación de la cámara son: La Iluminación y la Velocidad de la Banda.

Estas variables de control son afectadas por algunas de las partes mas relevantes a nuestro proceso del sistema, las cuales se describen a continuación.

11.1.1 Cámara de Inspección.

Esta cámara es marca DALSA (canadiense), modelo SP-13-02K30, que puede “ver” 2048 pixeles en línea, hasta 10 líneas de 1”, su modo de operar es “de barrido”. Es decir que reconoce imágenes y las presenta (por medio de una interfase a una computadora / monitor) en un plano de dos dimensiones. Esto es de gran utilidad para leer imágenes en movimiento, ya que al “barrer” la imagen, puede colocar en un plano de dos dimensiones una superficie tridimensional simulando un desdoble de la imagen para

colocarla en un plano bidimensional. La figura 4, muestra la manera en que la cámara presenta las imágenes en el monitor una ves “desdobladas”. En el cuadro 1 aparece la

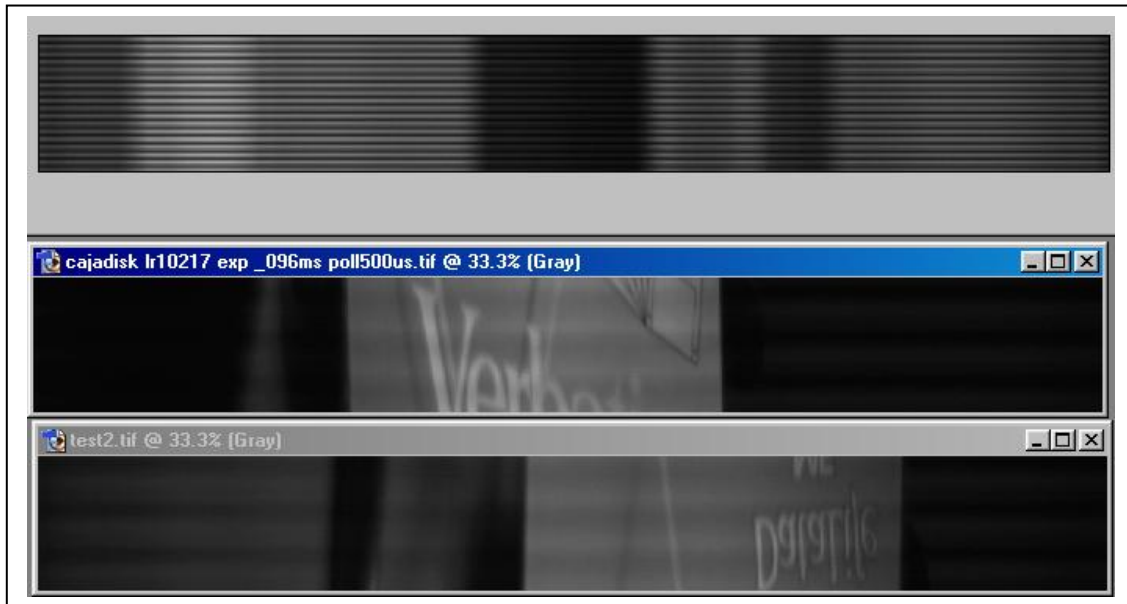


Fig. 4 Imagen de una caja de disquetes vista ya en el monitor como envía la señal la cámara

figura al pasar a una velocidad de 4 plg/seg, en el cuadro 2 aparece la imagen procesada como la “ve” la cámara, y en el cuadro 3 apreciamos la imagen en espejo invertido, cualidad que tiene también esta cámara.

La cámara tendrá un óptimo funcionamiento cuando la iluminación sea la adecuada, y la nitidez de las líneas de video por segundo dependen de la velocidad del objeto. Con esto, reconocemos entonces las variables críticas de operación de la cámara, y por lo tanto, serán las variable a manipular en el modelo estadístico.

11.1.2 Iluminación

La iluminación es proporcionada por una lámpara instalada en el sistema que esta al mismo nivel de la cámara de inspección y esta montada en el mismo aparato. La inclinación del eje central de la iluminación es de 30 grados con respecto al eje central de la cámara (especificación proporcionada por el proveedor). Siendo la iluminación una variable de control para el sistema de inspección manipularemos 3 diferentes intensidades de iluminación (i_1 , i_2 , i_3) dado que cómo veremos adelante, manipularemos 3 niveles también en la velocidad, de esta manera mantendremos la ortogonalidad del modelo. Como este trabajo se enfoca al modelo estadístico solamente, los valores para i_1 , i_2 , i_3 , no se especificarán, y deberán ser aportados por el equipo que lleve a cabo los

experimentos, sin embargo la iluminación inicial (i_1) debe ser la iluminación natural del área donde se instalará el sistema, por lo que el equipo realizador de los experimentos deberá analizar esta condición, y replicarla al momento de realizar las corridas de los bloques del experimento.

11.1.3 Banda Transportadora

La función de esta parte del equipo es la de mover los envases a través del sistema de inspección. Como la finalidad de este sistema es estar montado sobre una línea de inspección de envases de vidrio, las velocidades de operación de la banda transportadora dependerán de las velocidades de la línea de inspección de envases. Como estaremos trabajando en un sistema para la inspección de envase Jarritos, es necesario entender la forma de producción de este producto para poder determinar los niveles de la variable de control velocidad. Como se observó en la figura 2, la línea de producción / inspección se divide en 2 piernas para la inspección, esto tiene dos fines. El primero es disminuir la velocidad de flujo de los envases por los equipos de inspección, es decir se reduce a la mitad la velocidad del flujo. La segunda finalidad es que si cualquier equipo de inspección de una pierna se detiene ya sea por un mal funcionamiento o por que se le esta dando algún tipo de mantenimiento, o cualquier otra razón, el flujo de la producción no sea interrumpido, mandando la producción total de la máquina por una sola pierna de la línea de inspección. Esto da flexibilidad al personal de servicios de apoyo a la producción para que puedan trabajar y mantener en optimas condiciones los equipos de inspección.

Siendo la velocidad una variable de control para el sistema de inspección manipularemos 3 diferentes intensidades de velocidad (v_1 , v_2 , v_3) dado que cómo se expuso atrás, manipularemos también 3 niveles también en la iluminación, manteniendo la ortogonalidad del modelo. Como este trabajo se enfoca al modelo estadístico solamente, los valores para v_1 , v_2 , v_3 , no se especificarán, y deberán ser aportados por el equipo que lleve a cabo los experimentos, sin embargo la velocidad inicial (v_1) debe ser la velocidad de la máquina IS actual. La velocidad (v_2) deberá ser $= v_1 \times 2$, y la velocidad $v_3 = v_1 \times 3$

11.1.4 Rodillo giratorio.

Su función básicamente es la de rotar los envases, para que la cámara pueda captar la imagen total del grafilado de cada envase que pasa por el sistema, generando la imagen “desdoblada” en un plano de 2 dimensiones del grafilado, para pueda ser analizado por el sistema, el cual emitirá la señal de aceptación o rechazo según ordenes preprogramadas en él.

Una manera estadística de correlacionar estas variables (iluminación, velocidad, defeco 1 y defeco 2) cada una a tres diferentes niveles de intensidad, es mediante la aplicación del diseño de experimentos. Sin embargo el modelo estadístico que se pretende generar toma solamente la estructura del diseño de experimentos para generar los bloques de corridas a todas sus combinaciones posibles, pero cambia al momento de establecerse las condiciones, mismas que regirán la toma de decisiones basándose en los resultados obtenidos de cada bloque (o experimento). Cada bloque o experimento tiene un resultado, y la combinación de estos resultados es el factor de decisión final acerca de la efectividad del sistema.

Y si se trata de efectividad del sistema, se deberán establecer entonces criterios ó condiciones acerca del sistema, mismas que como ya se mencionó regirán cada decisión. Estos criterios son básicamente, que el sistema detecte (y haga rechazar) envases defectuosos, y detecte, y haga no-rechazar (o acepte) envases no-defectuosos.

12.0 Modelo Estadístico

Bien. Ahora que ya conocemos las variables críticas de control (iluminación y velocidad de banda). Y como definimos en la parte 5.0 Alcances y Limitaciones del proyecto de tesis, trabajaremos con 2 tipos de defectos (rayas brillosas e infundidos). Estos dos tipos de defectos serán nuestras variables no controladas ya que un defecto no es planeado y nunca se sabe con exactitud la magnitud del mismo. Por lo cual nuestro modelo comienza tomar forma de la siguiente manera:

VARIABLES QUE PUEDEN SER CONTROLADAS:

- *Velocidad de la banda transportadora (botellas por minuto) a tres niveles*
- *Iluminación que se aplicará al sistema a tres niveles*

VARIABLES QUE NO SON CONTROLADAS (DEFECTOS):

- *Raya Brillosa a tres niveles (longitud de la fisura)*
- *Infundido a tres niveles (diámetro del infundido)*

Para ambos defectos, la “intensidad” será determinada por su medida longitudinal. Es decir que para las rayas brillosas tendremos longitudes de A centímetros, B centímetros y C centímetros de longitud. Y para los infundidos, se trabajará con defectos de aproximadamente de a centímetros, b centímetros, y c centímetros de diámetro. Ahora

El modelo estadístico a elaborar, debe ser un camino a seguir para que se conozca la capacidad de inspección del sistema. La capacidad de inspección del sistema estará medida respecto a la cantidad de botellas por minuto que el sistema pueda inspeccionar. Desde luego esta inspección debe ser confiable. La confiabilidad del sistema se debe dar en dos dimensiones, la “dimensión de aceptación” y la “dimensión de rechazo”. Con estas dimensiones se quiere dar a entender que el sistema de manera ideal, debe desechar las botellas defectuosas SIEMPRE, y debe No-desechar las botellas que no son defectuosas SIEMPRE. Esto quiere decir que se deben tener aceptaciones y rechazos acertados. La manera de comprobarlo estadísticamente se discutirá mas adelante en el establecimiento de la hipótesis del experimento.

El modelo consiste en una serie de experimentos bien planeados, los cuales arrojarán como resultado la capacidad de inspección del sistema según diferentes condiciones tanto de las variables críticas del sistema (velocidad e iluminación), así como de los

defectos (rayas brillosas e infundidos). Conforme estas condiciones vayan cambiando, los resultados serán diferentes. El objetivo de este diseño esta dividido en 2:

- a) Conocer la capacidad inicial del sistema
- b) Lograr la mejora continua del sistema hasta llevarlo a condiciones de operación estándar de la industria

Conocer la capacidad inicial del sistema quiere decir que después de correr todas las combinaciones del experimento y conocer cuales son las respuestas del sistema ante las diferentes combinaciones de factores de entrada (velocidad, iluminación y defectos). Una vez conocida la capacidad del sistema se pueden hacer modificaciones y ajustes para cada vez tener mejores respuestas (aceptaciones y rechazos acertados), lo cual es precisamente la segunda parte del objetivo del modelo estadístico.

12.1 Diseño del Modelo para el Experimento

A continuación se describirá el desarrollo del modelo estadístico para el experimento. En la siguiente tabla muestra el diseño del experimento. Se describe paso a paso con matrices la forma en que las 4 variables se están combinando unas con otras.

Matriz de Experimento Raya Brillosa – Velocidad de Línea

	A. RB de 2cm de Diámetro	B. RB de 1cm de Diámetro	C. RB de 0.5cm de Diámetro
X. Vel. 1	AX	BX	CX
Y. Vel. 2	AY	BY	CY
Z. Vel. 3	AZ	BZ	CZ

Matriz de Experimento Infundido – Velocidad de Línea

	a. Infundido de 1cm de Diámetro	b. Infundido de 0.5cm de Diámetro	c. Infundido de 2mm de Diámetro
X. Vel. 1	aX	BX	cX
Y. Vel. 2	aY	BY	cY
Z. Vel. 3	aZ	BZ	cZ

Matriz de Experimento Raya Brillosa – Iluminación

	A. RB de 2cm de Diámetro	B. RB de 1cm de Diámetro	C. RB de 0.5cm de Diámetro
x. Ilum. 1	Ax	Bx	Cx
y. Ilum. 2	Ay	By	Cy
z. Ilum. 3	Az	Bz	Cz

Matriz de Experimento Infundido – Iluminación

	a. Infundido de 1cm de Diámetro	b. Infundido de 0.5cm de Diámetro	c. Infundido de 2mm de Diámetro
x. Ilum. 1	ax	bx	cx
y. Ilum. 2	ay	by	cy
z. Ilum. 3	az	bz	cz

Ahora, se debe diseñar la matriz del experimento combinado (considerar siempre el efecto de las 4 variables una sobre la otra), pues aunque el enfoque de realizar los experimentos por separado es cómodo pues solamente se harán un número determinado (y mucho menor al de un experimento combinado), la ineficiencia del experimento por no considerar las combinaciones, resultara en la pérdida de información muy valiosa. En particular, ninguno de los efectos principales será estimado muy eficientemente, y no habrá nada de información acerca de las posibles interacciones².

Matriz de Experimento combinando las 4 variables.

No. de Corrida Aleatorio	No. de Corrida	Iluminación Nivel	Velocidad Nivel	Raya Brillosa Nivel	Infundido Nivel
61	1	3	1	3	1
30	2	2	1	1	3
66	3	3	2	1	3
5	4	1	1	2	2
76	5	3	3	2	1
38	6	2	2	1	2
10	7	1	2	1	1
68	8	3	2	2	2
75	9	3	3	1	3
42	10	2	2	2	3
44	11	2	2	3	2
58	12	3	1	2	1
11	13	1	2	1	2
67	14	3	2	2	1
6	15	1	1	2	3
28	16	2	1	1	1
70	17	3	2	3	1
23	18	1	3	2	2
57	19	3	1	1	3
9	20	1	1	3	3
35	21	2	1	3	2
1	22	1	1	1	1
2	23	1	1	1	2
15	24	1	2	2	3

² Wheeler. Understanding Industrial Experimentation

No. de Corrida Aleatorio	No. de Corrida	Iluminación Nivel	Velocidad Nivel	Raya Brillosa Nivel	Infundido Nivel
64	25	3	2	1	1
71	26	3	2	3	2
4	27	1	1	2	1
81	28	3	3	3	3
45	29	2	2	3	3
55	30	3	1	1	1
32	31	2	1	2	2
33	32	2	1	2	3
3	33	1	1	1	3
22	34	1	3	2	1
53	35	2	3	3	2
25	36	1	3	3	1
17	37	1	2	3	2
60	38	3	1	2	3
27	39	1	3	3	3
78	40	3	3	2	3
37	41	2	2	1	1
51	42	2	3	2	3
24	43	1	3	2	3
59	44	3	1	2	2
12	45	1	2	1	3
21	46	1	3	1	3
26	47	1	3	3	2
56	48	3	1	1	2
47	49	2	3	1	2
36	50	2	1	3	3
80	51	3	3	3	2
40	52	2	2	2	1
74	53	3	3	1	2
13	54	1	2	2	1
18	55	1	2	3	3
20	56	1	3	1	2
19	57	1	3	1	1
16	58	1	2	3	1
62	59	3	1	3	2
50	60	2	3	2	2
39	61	2	2	1	3
54	62	2	3	3	3
29	63	2	1	1	2
34	64	2	1	3	1
46	65	2	3	1	1
77	66	3	3	2	2
7	67	1	1	3	1
31	68	2	1	2	1
65	69	3	2	1	2
8	70	1	1	3	2

No. de Corrida Aleatorio	No. de Corrida	Iluminación Nivel	Velocidad Nivel	Raya Brillosa Nivel	Infundido Nivel
41	71	2	2	2	2
48	72	2	3	1	3
73	73	3	3	1	1
43	74	2	2	3	1
52	75	2	3	3	1
69	76	3	2	2	3
72	77	3	2	3	3
63	78	3	1	3	3
79	79	3	3	3	1
49	80	2	3	2	1
14	81	1	2	2	2

Donde en cada columna de las 4 variables los números representan las 3 diferentes intensidades de cada uno. La columna “No Aleatorio de Corrida” representa la secuencia en que esa corrida en específico será llevada a cabo. La siguiente columna “No. de Corrida” representa la secuencia original en que las corridas fueron estructuradas.

Ahora como se puede observar, el experimento consta de 81 combinaciones, en donde se contemplan todas las intensidades de las variables y se combinan todas a la vez. Los resultados de cada combinación serán ya sea la aceptación o el rechazo de las botellas buenas o las defectuosas respectivamente, de esto comprendemos que las respuestas serán datos por atributos: Pasa o No-pasa. Para entender la interpretación de estos resultados pasemos a plantear las condiciones del experimento.

12.2 CONDICIONES DEL EXPERIMENTO

Como se mencionó anteriormente se espera que el sistema sea funcional y capaz de acuerdo a estándares de la industria, midiendo su capacidad para rechazar envases defectuosos y de aceptar envases no defectuosos, para lo que se generaron las siguientes condiciones.

Condición 1

Cada combinación presenta una posible oportunidad para que el equipo rechace o no el producto. Un rechazo será considerado como un éxito y un No-rechazo será considerado como un fracaso. Excepto en el caso del bloque Dummy (explicación del “bloque Dummy” mas adelante)

Debido a que el experimento será utilizado para determinar la capacidad de inspección del equipo, se deberán correr mas experimentos. Esta cantidad deberá ser la

suficiente para poder tomar una decisión en cuanto a la capacidad del equipo para rechazar envases defectuosos. Partiendo de que una confiabilidad aceptable de inspección de un equipo es del 99.95%³, entonces se realizarán 100 repeticiones de cada corrida. Utilizando el programa Mini Tab se generan las tablas para cada corrida (como se hizo con la tabla 1) donde obtendremos las 81 combinaciones por bloques de 100, donde cada bloque contendrá los ordenes de cada combinación. Además se generó un “Bloque Dummy”, el cual contiene envases No-Defectuosos, el motivo de este bloque es el de también retar al equipo a aceptar envases No-defectuosos. Con este bloque Dummy se complementa el análisis del equipo para rechazar envases defectuosos y de aceptar envases no defectuosos. Exclusivamente para el bloque Dummy, se tomará como un resultado positivo el fracaso, es decir cuando el equipo no rechace el envase no-defectuoso.

Condición 2

Si el porcentaje de éxito de cada combinación en las 101 corridas (incluyendo el bloque Dummy) es mayor o igual 99.95%, entonces se considerará al equipo capaz para rechazar envases defectuosos y de aceptar envases no defectuosos de acuerdo a estándares de la industria.

12.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Es necesario mencionar que cuando se lleven a cabo los experimentos, los valores de las intensidades de cada variable sean sustituidos por los valores reales de las mismas, es decir:

1. Para la iluminación, los valores en las tres diferentes intensidades deberán ser valores reales, partiendo de la intensidad i_1 , la cual debe ser la iluminación natural del área donde el equipo será instalado.
2. Para la velocidad, deberán ser los valores: velocidad actual de la máquina de producción (en botellas por minuto), velocidad de la máquina de producción por dos (doblando la velocidad), y velocidad de la máquina de producción por tres (triplicando la velocidad) El desarrollo de los experimentos determinará cuales son las velocidades optimas de operación del sistema, sin embargo: se busca que la

³ Benchmark de Equipos de inspección instalados en una línea de inspección de envases de vidrio, donde el nivel de error del equipo es del 0.05%

velocidad mínima de operación funcional del sistema sea la de la velocidad actual de la máquina (botellas por minuto)

3. Para la Raya Brillosa: 2, 1 y 0.5 centímetros.
4. Para el infundido; 1, 0.5 centímetros y 2 milímetros.

Punto importante por mencionar es que el modelo matemático, es flexible de manera que en los valores modelados pueden ser sustituidos por valores reales (cualquiera que estos sean) y la capacidad de emitir resultados no se verá afectada.

La capacidad del sistema de aceptar o rechazar los diferentes defectos a las diferentes condiciones de operación (específicamente velocidad de línea), y las diferentes intensidades de los defectos (raya brillante e infundidos) será precisamente lo que se busca obtener con este experimento.

Se deben correr los experimentos, siguiendo las tablas que se proporcionan para tal motivo ([ver anexo 5. Bloques de corridas](#)), siguiendo estrictamente la aleatoriedad de las corridas por combinación, y se deben vaciar los datos obtenidos de cada corrida de combinación de los 100 bloques en la “Matriz de Resultados de Corridas por Bloques” ([ver anexo 6](#)).

Una vez que se hallan corrido los 81 experimentos de los 101 bloques, y los resultados hallan sido anotados en la “matriz de resultados de corridas por bloque” anexa, siguiendo el criterio establecido en la Condición 1. Se procederá a obtener los estadísticos correspondientes, que son los porcentajes de éxito por combinación, (la matriz de resultados de corridas por bloque, contiene un campo para este dato):

Y, se tomarán decisiones en base a la Condición 2.

- 12.3.1) El promedio de éxito de las 101 corridas de cada combinación debe ser mayor o igual a 99.95%.

De no ser así, y una o más combinaciones no cumplen con esta condición no necesariamente el equipo se debe considerar No-capaz, y se debe continuar con el análisis de los resultados para poder tomar una decisión acerca del equipo, sin embargo, se deben analizar esa o esas combinaciones y extender el experimento, ver punto 12.3.3

- 12.3.2) El promedio de los promedios de éxito de las 101 corridas por las 81 combinaciones de variables, debe ser mayor o igual a 99.95%. Si esta condición se cumple, entonces podemos avanzar con el análisis. De no

cumplirse esta condición, el equipo no es capaz para su operación industrial, y se deben hacer ajustes en el diseño del equipo, su hardware y software.

12.3.3) Cuando el promedio de éxito de las 101 corridas de cada combinación no es mayor o igual a 99.95%, pero es mayor a 99%⁴, se debe de revisar el equipo para buscar y encontrar soluciones para mejorar el desempeño del mismo, y continuar con el análisis. Las soluciones para mejorar el equipo tendrán que ver con el hardware o software del equipo y las personas encargadas del diseño del equipo deberán hacerse cargo de esta tarea.

Sin embargo si el promedio de éxito de una o más de las 101 corridas de cada combinación es menor a 99%, el equipo no es capaz para su operación industrial, y se deben hacer ajustes en el diseño del equipo, su hardware y software.

12.3.4) Además de cumplirse las condiciones expuestas en los puntos 12.3.1 y 12.3.2, para que se considere capaz el equipo, para las corridas del Bloque Dummy, el promedio de porcentajes de “fracaso”, es decir que el envase halla sido aceptado, en las 81 combinaciones debe ser mayor o igual al 99.95%. Si esta combinación de condiciones sucede entonces podremos aceptar al equipo como capaz de funcionar bajo estándares de la industria.

De no cumplirse la condición para el bloque Dummy, esto quiere decir que el equipo de inspección sea susceptible a rechazara producto aceptable. Esto es totalmente insatisfactorio. Cuando el promedio de los porcentajes de “fracaso” de las 81 combinaciones del bloque Dummy es menor a 99.95% pero mayor a 99%, entonces el equipo se debe de revisar para buscar y encontrar soluciones para mejorar el desempeño del mismo, y continuar con el análisis. Las soluciones para mejorar el equipo tendrán que ver con el hardware o software del equipo y las personas encargadas del diseño del equipo deberán hacerse cargo de esta tarea.

Sin embargo si el promedio de “fracaso” de las 81 combinaciones del bloque Dummy es menor a 99%, el equipo no es capaz para su operación industrial, y se deben hacer ajustes en el diseño del equipo, su hardware y software.

⁴ un 99% de eficiencia en el rechazo se considera una variación “arreglable” por el equipo técnico del fabricante. INEX Inspection Systems, Pro Scanner Manual

13.0 Conclusiones

Dentro del trabajo de diseño de un equipo de inspección, la parte de validación estadística de la capacidad de funcionamiento exitoso, es elemento fundamental para poder colocar el instrumento dentro de un ambiente real de trabajo. Las pruebas de laboratorio como paso previo a una instalación y desarrollo del trabajo en una situación de ambiente real de trabajo son un ejemplo aproximado a la realidad. La validación de un sistema de este tipo debe hacerse en condiciones que asemejen lo más posible las condiciones de un ambiente real / normal de trabajo, y es labor del equipo de diseño, generar estas características ambientales, y de ser posible probar el equipo en una línea de producción real.

El experimento diseñado debe llevarse a cabo ya sea en condiciones simuladas de ambiente real de trabajo, o en condiciones reales, los resultados serán más contundentes de llevarse a cabo los experimentos en una situación real (aunque con defectos simulados) de ambiente de trabajo.

El diseño del experimento contempló primeramente una combinación de 4 variables de atributos, dos de las cuales son controladas (velocidad de banda e intensidad de la iluminación), y dos mas no-controladas (nivel de defecto raya brillante y nivel de defecto infundido), todas las variables a tres niveles, siendo rangos de intensidad del defecto para las variables no-controladas, y lo mismo, niveles de intensidad, para las variables controladas.

Los niveles de intensidad para las variables no-controladas fueron determinados por análisis de datos históricos de defectos encontrados en una línea común de producción de envases de vidrio, se utilizaron datos correspondientes a 12 meses. Los niveles para las variables controladas fueron determinados por las condiciones mínimas a las que se espera que el sistema sea funcional (valor agregado) y de ahí mover su capacidad a la de un sistema de mayor beneficio para la industria.

El siguiente elemento en el diseño del experimento son los bloques de corridas. Se obtuvieron 81 combinaciones posibles para cada uno de los 3 niveles de las 4 variables a combinar en el experimento. Además de esto se determinó realizar 100 corridas de cada combinación determinando llevar a cabo las 81 combinaciones de manera aleatoria, para asemejar lo más posible a la realidad el experimento, por lo que a cada juego de 81 combinaciones llevadas a cabo aleatoriamente se le llamo bloque. Además de esto se generó un bloque "Dummy", el cual contempla la contraparte de todo equipo de

inspección, y es la de tener envase no-defectuoso, el cual no queremos que el equipo rechace por obvias razones de efectividad del mismo.

Por último y como parte cúspide del diseño del experimento, tenemos la interpretación de resultados.

(este punto fue determinado basándose en estándares ya establecidos en la industria de elaboración e inspección de envases de vidrio, los cuales son exigidos por fabricantes de envases de vidrio a los proveedores de los equipos de inspección)

Es claro que para poder validar el equipo como funcional dentro de condiciones normales de operación en una línea de inspección de envases de vidrio, se deben cumplir las condiciones de rechazo de producto defectuoso y aceptación del producto no-defectuoso. El diseño del experimento y la interpretación de los resultados deben ser rígidos e inflexibles, es decir que no existen desviaciones a la interpretación de los resultados, de esta manera se logra la robustez del equipo, la seguridad del equipo de diseño respecto al desempeño del equipo y la satisfacción del usuario final, meta que debe ser siempre primordial. Es responsabilidad del equipo de diseño, el hacer los cambios necesarios al equipo para lograr cumplir con las condiciones de interpretación de resultados, y el experimento deberá realizarse una y otra vez desde el principio siempre que se hallan realizado cambios de diseño, infraestructura, o software al equipo de inspección, esta condición también es inflexible.

Por último, los resultados que deben esperarse del sistema diseñado deben ser:

- 1) Que el sistema funcione con una velocidad mínima igual a la velocidad actual de trabajo de la línea de inspección de envases de vidrio. Es decir que para que el sistema se considere funcional, en una línea de inspección de envases de vidrio, en condiciones normales de trabajo debe de operar por lo menos con las condiciones actuales de operación.
- 2) Se deben llevar a cabo los experimentos y buscar que para los diferentes defectos, en lo individual y combinados el sistema rechace las muestras (de acuerdo con los porcentajes establecidos en los puntos 12.3.1 al 12.3.3) en la mínima intensidad de los defectos (situación óptima)

14.0 BIBLIOGRAFÍA

- (1) Douglas C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, Fifth Edition, 2001, Arizona State University
- (2) Donald J. Wheeler, Understanding Industrial Experimentation, Second Edition, 1998 SPC Press Incorporated
- (3) Mini Tab Inc. Mini Tab Training Manual, Factorial DOE using Mini Tab.
- (4) Tsai M. C. and Lee C. H., Tracking Control of a Conveyor Belt: Design and Experiments, IEEE Transactions on Robots and Automation, Vol. 12, No. 1, 1996, 126-131 pp.
- (5) Bertil A. Brandin, The Real-Time Supervisory Control of an Experimental Manufacturing Cell, Transactions on Robots and Automation, Vol. 12, No. 1, 1996, 1-14 pp.
- (6) Groover Mikell P., Automation Production System and Computed Integrated Manufacturing. Englewood Cliffs.
- (7) Groover Mikell P., Fundamentos de Manufactura Moderna “Materiales, Procesos y Sistemas. Prentice Hall 1995. Englewood Cliffs.
- (6) Benjamín W. Niebel., Ingeniería Industrial “Métodos, Tiempos y Movimientos”. AlfaOmega 1996. Pennsylvania