

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA ENSENADA



MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

**“OPTIMIZACIÓN DE LA PRUEBA DE JALÓN UTILIZANDO LA METODOLOGÍA TAGUCHI Y
ELIMINACIÓN DEL DEFECTO POR COPLANARIDAD EN LA LÍNEA PRISMA I,”**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO EN
MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA

YOLANDA ANGÉLICA BÁEZ LÓPEZ

DIRECTOR

M. C. JORGE LIMÓN ROMERO

ENSENADA B. C., 2008.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA**

**“OPTIMIZACIÓN DE LA PRUEBA DE JALÓN UTILIZANDO LA METODOLOGÍA TAGUCHI Y
ELIMINACIÓN DEL DEFECTO POR COPLANARIDAD EN LA LÍNEA PRISMA I”**

TESIS

Que para obtener el grado de maestría en ingeniería presenta:

Yolanda Angélica Báez López

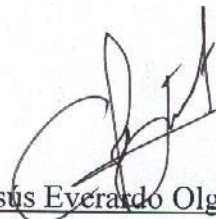
Aprobada por:



M.C. Jorge Limón Romero
Director de tesis



M.C. Claudia Camargo Wilson
Miembro del comité



M.C. Jesús Everardo Olguín Tiznado
Miembro del comité

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por su amor infinito que me impulsa día a día a luchar por lo que quiero y creo.

A mis amigos del alma Diego, Claudia, Jesús, Jorge Luis, Alma, Jorge, Heidy, Ever Gutiérrez, que me han demostrado que son mi familia y que siempre han estado ahí para apoyarme.

A mis compañeros y amigos de maestría: Liliana Avendaño, Fernando Velázquez, Mónica Villalpando, Ericka Lugo, Diego Tlapa, con los que pase momentos inolvidables de cariño y apoyo mutuo.

A la académica de Ingeniería Industrial: Miguel Ángel Cadena, Dra. Blanca, Claudia, Jesús, Jorge, Diego, Javier, que con su amistad y apoyo han contribuido a la realización de este logro.

A todos mis amigos de la FIE, Rosa Martha, Ever, Eliud, Anita, Luisa, Pablo, Luis Juárez, Efrén, Octavio, que con su alegría me hicieron más gratos los momentos de mi paso por la maestría.

A los directivos de la facultad Dr. Oscar Roberto López Bonilla, M.C. Everardo Inzunza González, M.C. Joel Ojeda por el gran apoyo que he recibido de su parte en todos los proyectos que he emprendido.

A mi director el M.C. Jorge Limón Romero que con sus sabios consejos y su ejemplo de superación constante, me impulsó a la realización y culminación de este trabajo. Gracias por el apoyo.

A mis amigas Claudia Limón y Cinthia Pérez que con su amistad sincera, me han enseñado a disfrutar las cosas sencillas de la vida.

A Benjamín Corral, Ericka Huizar y Lidia que fueron piezas claves para la realización de este trabajo y que su apoyo incondicional hizo posible el éxito de esta investigación.

DEDICATORIA

A mis padres Rosario Báez Ramírez y Yolanda López Nava quienes siempre me han brindado su amor y apoyo incondicional, y que con su ejemplo me motivan a luchar y seguirme superando.

A mis hermanos Ana Sugey, Jessica Minelli y Jesús Amado con los que he aprendido el verdadero significado de la palabra hermano, que con sus ocurrencias y especial alegría han hecho de mi vida algo divertido.

A mis cuñados Iván Soto y Sinuhe Panduro por tener la buena suerte de encontrar a mis hermanas.

A mi gran amor Joseam por su alegría, que con sus juegos y ocurrencias me recuerda que nunca debemos dejar de ser niños.

A mi piedra en el zapato, Diego Alfredo Tlapa Mendoza, que simplemente sin él los regaños no sería tan divertidos, por ayudarme y brindarme su amistad sincera. Gracias compa casi hermano.

A mi gran amiga Claudia Camargo, por ha contribuido en gran medida a llegar a donde me encuentro, por su amistad sincera e incondicional.

A todos ellos por ser la mayor bendición que Dios me ha dado

FICHA METODOLÓGICA

FICHA METODOLÓGICA	
Disciplina de estudio	Ingeniería Industrial
Área del conocimiento	Diseño experimental
Especialidad	Método Taguchi
Objeto de estudio	Método Taguchi para fijar los niveles de los factores que afectan al producto de Prisma I.
Sujeto de estudio	Línea Prisma I de la empresa Dialight de México, S.A. de C.V.
Problema abordado	Falta de resistencia del producto final de la línea Prisma I y alto porcentaje de rechazo por defecto de coplanaridad.
Finalidad	Describir los factores que afectan la resistencia del producto y diseñar un experimento que permita fijar los factores a niveles que aumentan la resistencia y conocer las causas que originan la coplanaridad.
Tipo de investigación	Exploratoria, Descriptiva y Experimental
Modelo aplicado	Método Taguchi
Aportación	Fijar los niveles de los factores que intervienen en la resistencia del producto final de Prisma I, reducir la variación del producto y eliminar el defecto por coplanaridad
Autor	Ing. Yolanda Angélica Báez López
Director	M.C. Jorge Limón Romero

Tabla 1: Ficha metodológica

Fuente: Elaboración propia

ÍNDICE GENERAL

FICHA METODOLÓGICA	v
ÍNDICE GENERAL	vi
GLOSARIO	xiii
RESUMEN.....	xvi
ABSTRAC	xvii
1.0 INTRODUCCIÓN	2
1.1 MAPA ESTRUCTURAL DE LA TESIS	4
1.2 ANTECEDENTES.....	5
1.2.1 ANTECEDENTES GENERALES.....	5
1.2.1.1 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	5
1.2.1.2 APLICACIONES DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS	7
1.2.2 MÉTODOS EXPERIMENTALES	8
1.2.2.1 ALGORITMO DE APROXIMACIONES ESTOCÁSTICAS.....	9
1.2.2.2 METODOLOGÍA DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA	9
1.2.2.3 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE VINING Y MYERS, (1990).....	10
1.2.2.4 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE DEL CASTILLO Y MONTGOMERY, (1993).....	11
1.2.2.5 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE LIN Y TU, (1995)	11
1.2.2.6 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE COPELAND Y NELSON, (1996)	12
1.2.2.7 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE AMES, (1997)	12
1.2.2.8 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE KIM Y LIN, (1998)	12
1.2.2.9 MÉTODO DE KUSHNER Y CLARK, (1978).....	13
1.2.3 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS.....	15
1.2.4 ANTECEDENTES LOCALES	16
1.2.4.1 ANTECEDENTES Y DATOS GENERALES DE LA EMPRESA	16
1.2.4.2 LÍNEA PRISMA I.....	20
1.2.4.3 PRUEBA DE JALÓN	23
1.2.4.4 COPLANARIDAD	23
2.0 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EMPLEADA.....	26
2.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	27
2.3 CONCEPCIÓN DE LA IDEA DE INVESTIGACIÓN.....	27

2.4 BUSQUEDA DE INFORMACIÓN	28
2.4.1 DOCUMENTACIÓN GENERAL.....	28
2.4.2 DOCUMENTACIÓN ESPECIALIZADA	28
2.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	28
2.5.1 METODOLOGÍA DEL TRABAJO	28
2.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	28
2.6.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	28
2.6.2 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	30
2.6.3 ALCANCE DEL ESTUDIO	30
2.7 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	30
2.8 OBJETIVOS	30
2.8.1 OBJETIVO GENERAL	30
2.8.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
2.9 HIPÓTESIS	31
2.9.1 HIPÓTESIS PRINCIPAL	31
2.9.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	31
1.3 JUSTIFICACIÓN	31
1.3.1 APORTACIÓN PRÁCTICA	34
1.3.2 IMPACTO SOCIAL	34
1.3.3 CONTRIBUCIÓN DEL ESTUDIO	34
1.3.4 BENEFICIARIOS	34
2.10 DIAGRAMA DE CONGRUENCIA.....	35
2.11 ÁMBITO ESPACIAL Y TEMPORAL.....	36
2.11.1 MARCO ESPACIAL	36
2.11.2 MARCO TEMPORAL	36
2.12 TIPO DE INVESTIGACIÓN	36
2.12.1 INVESTIGACIÓN EXPLORATIVA	36
2.12.2 INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA	36
2.12.3 INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	37
2.13 RESULTADOS ESPERADOS.....	37
3.0 MARCO DE REFERENCIA	40
3.1 EL MÉTODO TAGUCHI.....	40
3.1.1 LA FILOSOFÍA DE CALIDAD DE TAGUCHI	41

3.2 CONCEPTOS UTILIZADOS EN INGENIERÍA DE CALIDAD	44
3.2 LAS TRES METAS DE TAGUCHI	45
3.4 FUENTES DE VARIACIÓN	45
3.4.1 FACTORES DE CONTROL (VARIABLES INDEPENDIENTES)	46
3.4.2 FACTORES INDICATIVOS	46
3.4.3 FACTORES DE RUIDO (VARIABLES NO CONTROLABLES).....	46
3.4.4 FACTORES DE SEÑAL.....	46
3.4.5 EFECTO DE INTERACCIÓN DE FACTORES	46
3.5 DISEÑO DE PARÁMETROS.....	47
3.5.1 PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN EL DISEÑO DE PARÁMETROS	48
3.6 LA RAZÓN SEÑAL A RUIDO	50
3.6.1 TIPOS DE RAZÓN SEÑAL A RUIDO.....	50
3.6.2 BENEFICIOS DEL USO DE LAS RAZONES SEÑAL A RUIDO.....	51
3.7 MALENTENDIDO EN TORNO A LOS MÉTODOS TAGUCHI	53
3.8 INGENIERÍA DE CALIDAD Y EL DISEÑO EXPERIMENTAL.....	53
3.8.1 INTERACCIONES Y MATRICES ORTOGONALES.....	54
3.9 RESINA EPOXI.....	56
3.9.1 PD955MY: POLÍMERO TERMOESTABLE SMT.....	56
3.9.1.1 DESCRIPCIÓN	56
3.9.1.2 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES	57
3.9.1.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	57
3.9.1.4 PROCESAMIENTO	57
3.9.1.5 CURADO.....	57
3.9.1.6 LIMPIEZA.....	57
3.9.1.7 EMPACADO	57
3.9.1.8 ALMACENAMIENTO	57
3.10 DIAGRAMA DE PARETO	58
4.0 MATERIALES Y MÉTODOS	60
4.1 MATERIALES.....	60
4.1.1 MATERIALES UTILIZADOS EN EL PROCESO	60
4.1.2 EQUIPO UTILIZADO PARA LAS PRUEBAS	61
4.2 MÉTODOS	62
4.2.1 DESARROLLO DEL EXPERIMENTO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PRUEBA DE JALÓN	62

4.2.1.1 DETERMINAR LA CARACTERÍSTICA DE CALIDAD QUE DEBE SER OPTIMIZADA	62
4.2.1.2 IDENTIFICAR LOS FACTORES DE RUIDO Y LAS CONDICIONES DE PRUEBA	63
4.2.1.3 IDENTIFICAR LOS FACTORES DE CONTROL Y SUS NIVELES	64
4.2.1.4 DISEÑAR LA MATRIZ DEL EXPERIMENTO Y DEFINIR EL PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE DATOS	66
4.2.1.5 CONDUCIR EL EXPERIMENTO	69
4.2.2 METODOLOGÍA PARA LA ELIMINACIÓN DEL DEFECTO POR COPLANARIDAD	70
4.2.2.1 DEFINIR EL PROYECTO	70
4.2.2.2 MEDIR LA SITUACIÓN ACTUAL	72
4.2.2.3 ANALIZAR LAS CAUSAS RAÍZ	72
4.2.2.4 MEJORAR LAS VARIABLES CRÍTICAS DE CALIDAD (VCC)	74
4.2.2.5 CONTROLAR PARA MANTENER LA MEJORA	75
5.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS	77
5.1 AUMENTO A LA RESISTENCIA DE LA PRUEBA DE JALÓN	77
5.1.1 ANALIZAR LOS DATOS Y DETERMINAR LOS NIVELES ÓPTIMOS	77
5.1.2 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO	78
5.1.3 ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS ARROJADOS EN EL EXPERIMENTO	80
5.1.3.1 ANOVA PARA LOS DATOS TRASFORMADOS	80
5.1.3.2 ANOVA PARA LOS DATOS SIN TRASFORMAR	81
5.1.4 PREDECIR EL FUNCIONAMIENTO CON LOS NIVELES ÓPTIMOS	83
5.1.5 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	85
5.2 DISMINUCIÓN DEL DEFECTO POR COPLANARIDAD	87
5.2.1 PRUEBA DE COMPARACIÓN DE DOS PROPORCIONES	87
5.2.1 NIVEL DE SIGMA	88
5.2.2 BENEFICIOS ADICIONALES	89
6.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
6.1 CONCLUSIONES PARA LA RESISTENCIA A LA PRUEBA DE JALÓN	93
6.2 CONCLUSIONES PARA LA DISMINUCIÓN DEL DEFECTO POR COPLANARIDAD	95
6.3 RECOMENDACIONES	96
7.0 BIBLIOGRAFÍA	98
8.0 ANEXOS	100
ANEXO 1	100
ARREGLOS ORTOGONALES MÁS FRECUENTES	100
ANEXO 2	102

NIVELES DE CALIDAD DE SIGMA Y NO CONFORMIDADES POR MILLÓN DE OPORTUNIDADES	102
ANEXO 3.....	103
RESULTADOS DE LA PRUEBA DE VALIDACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA PRUEBA DE JALÓN	103

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA ESTRUCTURAL DE LA TESIS	4
FIGURA 2: MODELO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN (MONTGOMERY, 2001)	6
FIGURA 3: INDICADORES PRISMA	18
FIGURA 4: SEÑALES DE TRÁFICO	18
FIGURA 5: ILUMINACIÓN DE ESTADO SÓLIDO	18
FIGURA 6: INDICADORES PARA TARJETAS DE CIRCUITOS	18
FIGURA 7: INDICADORES DE PREVENCIÓN AÉREA	18
FIGURA 8: ILUMINACIÓN Y SEÑALES FERROVIARIAS	18
FIGURA 9: INDICADORES PARA AEROPUERTOS	19
FIGURA 10: INDICADORES PARA VEHÍCULO	19
FIGURA 11: DIRECCIONAL NISSAN ALTIMA 2007	19
FIGURA 12: LOCALIZACIÓN DE DIALIGHT	19
FIGURA 13. HOUSING, LENTE, LED Y FIXTURA	20
FIGURA 14. SHOWER HEAD. PROCESO DE INYECCIÓN DEL EPOXI	20
FIGURA 15. TAPA DE LA FIXTURA, PARA EVITAR EL DEFECTO POR COPLANARIDAD	20
FIGURA 16. PIEZAS CURADAS	21
FIGURA 17. DIAGRAMA DE FLUJO DE PRISMA	22
FIGURA 18. PRUEBA DE JALÓN	23
FIGURA 19. PANTALLA DEL EQUIPO FIGURA 20. MECANISMO DESTRUCTIVO	23
FIGURA 21. LÍMITES DE COPLANARIDAD DE PRISMA	23
FIGURA 22. HOUSING DE PRISMA	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURA 23. CÁMARA MEDIDORA DE COPLANARIDAD	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURA 24: LA FUNCIÓN DE PÉRDIDA DE TAGUCHI	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURA 25: PALANCA DE LA CALIDAD (ESCALANTE, 2003)	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURA 26: ESQUEMA DE MÉTODO TAGUCHI	48
FIGURA 27. EJEMPLO DE UN DIAGRAMA DE PARETO	58
FIGURA 28. COMPONENTES DEL PRODUCTO PRISMA	60
FIGURA 30. DIFERENTES ÁNGULOS DE LA FIXTURA UTILIZADA EN LA LÍNEA PRISMA	60
FIGURA 29. PEGAMENTO EPÓXICO PD955MY	60
FIGURA 31. SHOWER HEAD	61
FIGURA 32. TAPA DE FIXTURA	61
FIGURA 33. HORNO SIKARMA	61
FIGURA 34. CÁMARA PARA MEDIR COPLANARIDAD	61
FIGURA 35. EMPACADO AL VACÍO	62
FIGURA 36. MÁQUINA AMETEK MANSFIELD & GREEN DIVISION	62
FIGURA 37. PRODUCTO CON COPLANARIDAD	70
FIGURA 38. PUNTO CRÍTICO DE CALIDAD POR COPLANARIDAD	70
FIGURA 39. COPLANARIDAD REPRESENTA EL DEFECTO MÁS ALTO DE PRISMA	72
FIGURA 40. PARETO PARA DETERMINAR LAS CAVIDADES CON MAYOR NÚMERO DE DEFECTOS	73
FIGURA 42. CURVATURA DE LA LÁMINA	73
FIGURA 41. DISEÑO ACTUAL DE LA TAPA DE LA FIXTURA	73
FIGURA 43. COMPONENTE DEL NUEVO DISEÑO DE LA TAPA	74
FIGURA 44. PRESIÓN UNIFORME DE LA TAPA SOBRE LA FIXTURA	74
FIGURA 45. PLANOS DE LA NUEVA TAPA	74
FIGURA 46. ORIFICIOS DE LA TAPA	74
FIGURA 47. DISEÑO PROPUESTO	75
FIGURA 48. ORIFICIOS DE LA TAPA	75
FIGURA 49. TAPA CON TORNILLOS PARA FIXTURA	90
FIGURA 50. NUEVO DISEÑO DE TAPA DE FIXTURA	91
FIGURA 51. PROTOTIPO DE LA TAPA PROPUESTA	91

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: FICHA METODOLÓGICA.....	V
TABLA 2. PARTES POR MILLÓN DE DEFECTOS EN DIALIGHT DE MÉXICO, 2007	32
TABLA 3. CANTIDAD DE DEFECTOS DE PRISMA PRISMA, 2007	33
TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS DE PRISMA 2007	33
TABLA 5. DIAGRAMA DE CONGRUENCIA	35
TABLA 6. MATRIZ ORTOGONAL L_{12} (2^{11}).....	55
TABLA 7. ARREGLO ORTOGONAL L_8	67
TABLA 8. ARREGLO ORTOGONAL RESULTANTE	68
TABLA 9. ARREGLO ORTOGONAL L_4	68
TABLA 10. MATRIZ DE DISEÑO	69
TABLA 11. DATOS RECOPIADOS PARA LA RESISTENCIA A LA PRUEBA DE JALÓN	70
TABLA 12. PARTES POR MILLÓN (PPM) DE DEFECTOS DE LA EMPRESA DIALIGHT DE MÉXICO, S.A. DE C.V.	71
TABLA 13. TOTAL DE DEFECTOS POR CAVIDAD.....	73
TABLA 14. CÁLCULO DE LA RAZÓN SEÑAL A RUIDO PARA LA RESISTENCIA A LA PRUEBA DE JALÓN	78
TABLA 15. RESPUESTAS PARA LA RESISTENCIA A LA PRUEBA DE JALÓN (RELACIÓN S/R)	78
TABLA 16. RESPUESTA PARA LA RESISTENCIA A LA PRUEBA DE JALÓN (MEDIA).....	78
TABLA 17. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS DATOS DE LA S/R DE LOS FACTORES PRINCIPALES	80
TABLA 18. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS DATOS DE LA S/R, AGRUPANDO LA SC DE LOS FACTORES D Y E A LA SC DEL ERROR	80
TABLA 19. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS DATOS NORMALES	81
TABLA 20. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS DATOS NORMALES, AGRUPANDO LA SC DE LOS FACTORES D Y E A LA SC DEL ERROR	81
TABLA 21. PREDICCIÓN DEL VALOR ÓPTIMO	83
TABLA 22. FACTORES Y NIVELES DE PREDICCIÓN.....	83
TABLA 23. INTERVALO DE CONFIANZA PARA LA PREDICCIÓN	84
TABLA 24. RESULTADO DE LA PRUEBA T-PAREADA PARA LOS SET UP	85
TABLA 25. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE COMPARACIÓN DE DOS PROPORCIONES.....	87

LISTA DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. NÚMERO DE DEFECTOS DE PRISMA, 2007.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
GRÁFICA 4. PRINCIPALES DEFECTOS DE PRISMA, 2007.....	Error! Bookmark not defined.
GRÁFICA 3. RESULTADOS PARA LA RESISTENCIA A LA PRUEBA DE JALÓN UTILIZANDO LAS S/R.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
GRÁFICA 4. RESULTADOS PARA LA RESISTENCIA A LA PRUEBA DE JALÓN UTILIZANDO LAS MEDIAS.....	Error! Bookmark not defined.

GRÁFICA 5. DIAGRAMA DE CAJAS PARA LA DIFERENCIA DE MEDIAS	68
GRÁFICA 6. DIAGRAMA DE VALORES INDIVIDUALES	Error! Bookmark not defined.
GRÁFICA 7. PRUEBA DE NORMALIDAD SET UP ACTUAL	69
GRÁFICA 8. PRUEBA DE NORMALIDAD SET UP PROPUESTO	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

GLOSARIO

Acciones Correctivas: son aquellas orientadas a eliminar la causa de una no-conformidad que se ha detectado. Se orientan a prevenir recurrencias.

Aleatorización: consiste en hacer corridas experimentales en orden aleatorio; este principio aumenta la posibilidad de que el supuesto de independencia de los errores se cumple.

Bloqueo: es nulificar o tomar en cuenta en forma adecuada todos los factores que pueden afectar la respuesta observada.

Capacidad: esta palabra se usa en el sentido de posibilidad basada en realizaciones contrastadas y lograr resultados mensurables.

Curado: proceso en el cual la resina alcanza su temperatura de cocción.

Defecto: pieza que no cumple con las especificaciones.

Diseño de experimentos: consiste en planear un conjunto de pruebas experimentales, de tal manera que los datos generados puedan analizarse estadísticamente para obtener conclusiones válidas y objetivas acerca del sistema o proceso.

Error aleatorio: es la variabilidad observada que no se puede explicar por los factores estudiados; y resulta del pequeño efecto de los factores no estudiados y del error experimental.

Error experimental: componente del error aleatorio que refleja los errores del experimentador en la planeación y ejecución del experimento.

Experimento: es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto. Dicho experimento permite aumentar el conocimiento acerca del sistema.

Epoxi: resina utilizada para sujetar el Housing del LED.

Factores controlables: son variables de proceso que se pueden fijar en un punto o en un nivel de operación. Se distinguen porque para cada uno de ellos existe la manera o el mecanismo de cambiar o manipular su nivel de operación.

Factores estudiados: son las variables que se investigan en el experimento para observar como influyen o afectan en la variable de respuesta.

Factores no controlables o de ruido: son variables que no se pueden controlar durante la operación normal del proceso. Un factor que ahora es no controlable puede convertirse en controlable, cuando se tenga el mecanismo o tecnología para ello.

Fixtura: molde que se utiliza para colocar las piezas durante su ensamble, facilitando su manufactura.

Niveles y tratamientos: los diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental se llaman *niveles*. Una combinación de niveles de todos los factores se llama *tratamiento o punto de diseño*.

Matriz de diseño: es el arreglo formado por las diferentes condiciones de proceso que serán corridas, incluyendo las repeticiones.

Medida: se refiere al hecho de que la capacidad del proceso sea cuantificada con los datos que, a su vez, son el resultado de la medición del trabajo realizado por el proceso.

Optimización: técnica matemática que sirve para extraer la información sobre el punto óptimo que tienen el modelo ajustado.

Planeación: son actividades encaminadas a entender el problema, diseñar y realizar las pruebas experimentales adecuadas.

Proceso: es una combinación única de máquinas herramientas, métodos materiales y hombres.

Producto: la medición se hace sobre el producto dado que la variación del producto es el resultado final.

Repetición: consiste en correr más de una vez un tratamiento o combinación de factores.

Unidad experimental: es la muestra de artículos que es necesario producir en una condición de operación del proceso para obtener, a partir de ellos una medición o dato representativo de lo que ahí ocurre.

Variabilidad: se refiere a la diversidad de resultados de una variable o de un proceso.

Variable de respuesta: es la característica del producto cuyo valor interesa mejorar mediante el diseño de experimentos.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad aplicar la metodología Taguchi, así como la metodología DMAMC de seis sigma, en una línea de producción de una empresa transnacional, para aumentar la resistencia del producto a la prueba de jalón y disminuir el número de defectos por coplanaridad, falta de planitud, del producto; por ser éstos los problemas de calidad más graves de la línea, la que a su vez representa el 40% de las ventas de la empresa.

Mediante Taguchi, se identificaron los factores que afectan a la resistencia y se fijaron los niveles óptimos de operación de cada uno, asegurando que el proceso se vuelva robusto a los factores incontrolables o de ruido, con lo cual se logró incrementar en un 50% la resistencia a la prueba de jalón del producto.

El defecto del producto, por coplanaridad, se redujo en un 85%, siguiendo los pasos de la metodología DMAMC, mediante la cual fue posible encontrar los factores que ocasionaban tal defecto, identificando como factor principal la tapa de la fixtura, ya que ésta no ejercía presión uniforme, por lo que se propone un nuevo diseño, el cual tienen como ventaja adicional que simplifica dos de las operaciones del proceso evitando lesiones al operador.

La investigación tiene una enorme aportación, ya que permitirá a la empresa obtener mayores utilidades al eliminar sus desperdicios y asegurar la calidad del producto, lo cual le permitirá permanecer en el mercado y continuar siendo una fuente de empleo. Para esquematizar el trabajo, en la Figura 1 se muestra el mapa estructural de la tesis.

ABSTRAC

This research work deals with the development of Taguchi, experimental design methodology, and, Six Sigma DMAIC, quality methodology, for a production line in a transnational company. The objective is to increase the product resistance to the pull test and to decrease its number of coplanarity defects, lack of planitud, which are the most important quality problems in a production line which represents 40% of the company sales.

By using Taguchi, there were identified the factors affecting the resistance and the optimal operation levels were established. This was done ensuring that the process becomes robust to the uncontrollable factor, noise, which increased the product resistance to the pull test by 50%.

The product coplanarity defect was decreased by 85%, following the DMAIC methodology steps, by which the defect source factors were found. The fixture cover was identified as the main of these factors, since it did not put a uniform pressure. Then, a new design is proposed, which not only fix the mentioned problem, it also simplifies two process operations avoiding injuries to the operator.

These results represent an important contribution, improving the company profits by eliminating wasting and ensuring the product quality, which will allow the company to be competitive and an important employer. Figure 1 shows the structural map of the thesis as a general scheme of this work.



CAPÍTULO I



INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se realiza una semblanza de las diferentes formas dentro del diseño experimental, además de una presentación acerca de la empresa donde se desarrolló el proyecto y la justificación del mismo.

1.0 INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la calidad en la industria se ha convertido en un factor de competitividad, e incluso de supervivencia. El mercado ha ido exigiendo año tras año niveles de calidad crecientes, con la convicción de que un aumento en la calidad del producto se traduce en una reducción de costos, y por lo tanto en una fuente de beneficios para la cadena de proveedores-clientes.

Una de las técnicas, quizá la más potente y representativa, es la Ingeniería de Calidad desarrollada por el doctor Taguchi en Japón, durante los años 50 y 60, lo que le permitió a la industria japonesa dar un paso gigante y aventajar en muchos aspectos a la industria occidental.

Ingeniería de calidad es una serie de planteamientos para predecir y prevenir las dificultades o problemas que podrían ocurrir en el mercado después de que un producto se vende y es usado por el cliente bajo múltiples condiciones ambientales y de utilización durante el periodo de vida diseñado¹.

Otra metodología de aseguramiento de la calidad del producto, es sin duda DMAMC de Seis Sigma, la cual representa una estrategia de mejora continua del negocio que busca encontrar y eliminar las causas de los errores, defectos y retrasos en los procesos, enfocándose en aquellos aspectos que son críticos para el cliente. Esta metodología es altamente sistemática y cuantitativa orientada a mejorar la calidad del producto o del proceso con tres áreas prioritarias de acción: satisfacción al cliente, reducción del tiempo de ciclo y disminución de los defectos.

Ambas técnicas son utilizadas en la empresa Dialight de México, específicamente en la línea PRISMA I, para mejorar las características críticas de calidad del producto que ahí se elabora. Esa investigación sigue una serie de pasos planeados y sistemáticos que se desarrollan en el presente trabajo.

¹ Diseño robusto (Wu, 1996) utilizando los Métodos Taguchi, Yulin Wu, Alan Wu, American Supplier Institute, Díaz de Santos.

El trabajo de investigación se ha organizado en seis capítulos, en el primero se realiza una revisión bibliográfica del diseño experimental, además de una descripción de los antecedentes de la empresa en donde se desarrolla el proyecto.

Para la culminación de los objetivos de investigación, se presentan los antecedentes y justificación del trabajo, haciendo énfasis en la importancia y aportación práctica del trabajo, lo cual integra al capítulo II. Posteriormente el capítulo III conforma el marco teórico y de referencia del proyecto.

Dentro del capítulo IV, se lleva a cabo la descripción de los materiales y métodos necesarios para la investigación. En el capítulo V se muestra los resultados obtenidos mediante la aplicación de las metodologías Taguchi y DMAMC, para reducir los problemas de calidad de la línea.

Finalmente en el capítulo VI, se muestran las conclusiones, recomendaciones y aportaciones más importantes de la investigación, así como algunas sugerencias para asegurar la calidad del producto.

1.1 MAPA ESTRUCTURAL DE LA TESIS

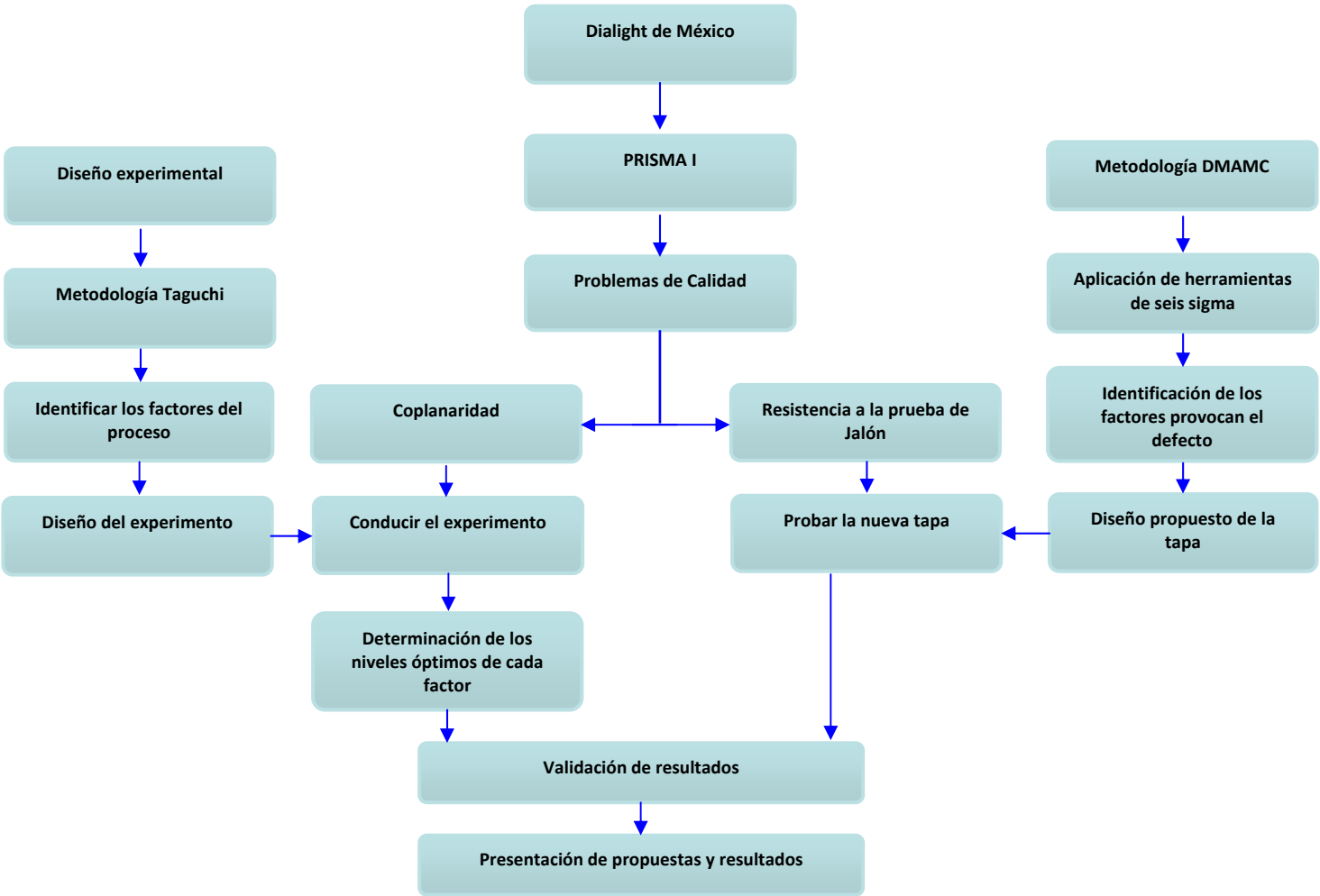


Figura 1. Mapa estructural de la tesis
Fuente: elaboración propia

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 ANTECEDENTES GENERALES

Las estrategias y herramientas para el aseguramiento de la calidad pueden haber cambiado, pero las expectativas básicas de los clientes han sido prácticamente constantes durante mucho tiempo.

La calidad de un producto o servicio es la percepción que el cliente tiene del mismo. Es una fijación mental del consumidor que asume conformidad con un producto o servicio determinado. La calidad es un conjunto de propiedades inherentes a un objeto que le confiere capacidad para satisfacer necesidades implícitas o explícitas. Puede definirse como la conformidad relativa con las especificaciones, en el grado en que un producto cumple las especificaciones del diseño.

En todo proceso influyen factores diversos con mayor o menor intensidad, ya sea con carácter de independencia entre ellos o bien interactuado. El estudio y determinación de la influencia de los factores en el resultado del proceso es vital, por lo que al percatarse de esto, la industria a dado la debida importancia a las técnicas estadísticas que ayudan a controlarlos, mediante su acertado uso se conduce a la más alta calidad y a la reducción de costos.

La implantación y gerencia de un sistema de calidad total no se alcanza en modo definitivo y completo sin la aplicación de técnicas del Diseño Experimental. Dentro de estas técnicas se tiene el extraordinario aporte dado por Taguchi que ha conducido a una simplificación de los cálculos y un enfoque de gran acierto a través de su función de pérdida. La metodología del Diseño de Experimentos ha cobrado una decisiva importancia en las industrias que aspiran al logro de una alta competitividad.

1.2.1.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

De la Vara (2004), menciona que el diseño de Experimentos consiste en determinar cuáles pruebas y cómo es que se deben realizar, para obtener los datos que al analizarlos estadísticamente se obtengan conclusiones y decisiones que deriven en mejoras del desempeño del proceso.

Los investigadores realizan experimentos virtualmente en todos los campos del saber, por lo general para descubrir algo acerca de un proceso o sistema en particular. Literalmente, un experimento es una prueba o ensayo. Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas, en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

El proceso o sistema bajo estudio puede representarse por medio del modelo de la Figura 2, el cual hace posible visualizar el proceso, como una combinación de máquinas, métodos, personas y otros recursos que transforman alguna entrada (a menudo un material), en una salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas de las variables del proceso $X_1, X_2, \dots, X_p$, son controlables, mientras que otras $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$, son incontrolables (aunque pueden hacerse controlables para los fines de la prueba). Entre los objetivos del experimento pueden incluirse:

- Determinar cuales variables tienen mayor influencia en la respuesta y ;
- Determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que y tenga casi siempre un valor cercano al valor nominal deseado;
- Determinar el valor de la x que influyen en y , de modo que la variabilidad de y sea pequeña;
- Determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que se minimicen los efectos de las variables incontrolables $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$.

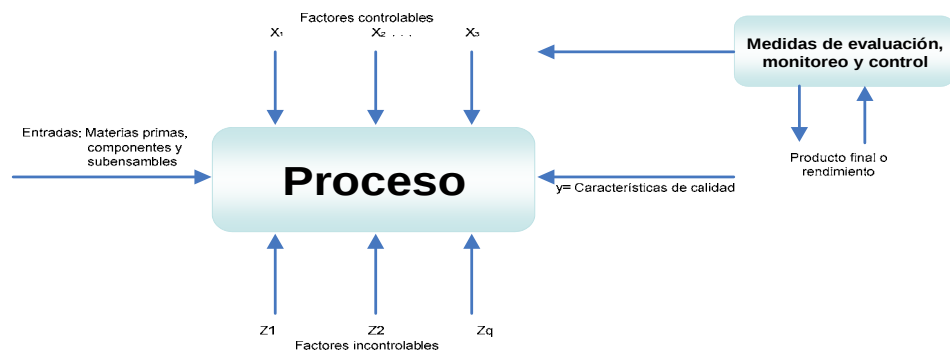


Figura 2: Modelo de un sistema de producción (Montgomery, 2001)

Los métodos de diseño de experimentos tienen un cometido importante en el desarrollo de procesos y en la depuración de procesos para mejorar el rendimiento. En muchos casos, el objetivo puede ser desarrollar un proceso consistente o robusto; esto es un proceso que sea afectado mínimamente por fuentes de variabilidad externas (las Z).

1.2.1.2 APLICACIONES DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos (DDE) es un conjunto de técnicas activas, en el sentido de que no espera que el proceso mande señales útiles, sino que este “manipula” para inducirlo a proporcionar esa información que se requiere para mejorarlo.

El diseño de experimentos permite:

- Reducir los costos de la no calidad
- Aumentar la productividad
- Detectar interacciones entre parámetros
- Elegir los ensayos sobre bases científicas para detectar los efectos de los parámetros y cuantificarlos.
- Hace que dos experimentadores diferentes obtengan diseños equivalentes y, por consiguiente, idénticas conclusiones.
- Que dado un cierto número de ensayos, la precisión obtenida en la estimación de los efectos sea la máxima posible.
- Intervenir a ciencia cierta en los procesos para optimizarlos, corregirlos y mejorarlos; concentrando un esfuerzo experimental en un corto periodo inicial, y obtener los puntos y técnicas operativamente óptimos.

El diseño de experimentos se puede utilizar para alcanzar: (1) mejorar las características de calidad; (2) reducir los costos; y (3) reducir el tiempo de desarrollo del producto y su fabricación. Las características de calidad se mejoran debido a la identificación de los niveles de los factores críticos que optimizan el promedio de la respuesta y minimizan su variabilidad. Esto también lleva a la reducción de desperdicio y retrabajo y, por consecuencia a la reducción de los costos.

Si se conocen los factores que afectan a las características de calidad, se pueden controlar únicamente los factores importantes y relajar las tolerancias en los factores benignos y cuando sea apropiado, seleccionar materiales menos costosos. Para reducir el tiempo que el producto tarda en llegar al mercado, se debe entender que quiere realmente el cliente y utilizar los procedimientos más eficientes para optimizar el diseño del producto y del proceso.

Para aquellos ingenieros que prueban las diferentes estrategias de diseño de nuevos productos o de solución de problemas en la línea de producción, el diseño de experimentos les puede ayudar en: (1) entender las relaciones que existen entre los factores de entrada y las respuestas y con ello, mejorar los métodos; (2) determinar los valores de los factores de entrada que optimizan las respuestas; y (3) la construcción del modelo matemático que relacione los factores de entrada y la respuesta, que a veces se le denomina caracterización del proceso y/o producto.

Uno de los enfoques del diseño experimental más ampliamente utilizado es el método Taguchi, ya que este intenta hacer a los productos y procesos insensibles a los factores incontrolables que pueden afectar el funcionamiento de dichos productos y procesos, y se remota en su aplicación, a la etapa de diseño, mediante el diseño del sistema y posteriormente con el diseño de parámetros.

La filosofía de calidad de Taguchi ha sido ampliamente aceptada en el campo de la calidad y el diseño experimental (Montgomery, 2001). Por lo que, como menciona Escalante (2003), se puede decir que la metodología seis sigma está basada fuertemente en dichos preceptos. Shainin (1991) menciona que una empresa líder en Japón, llamada Nipón Denso, ha adoptado los métodos Taguchi realizando más de tres mil experimentos cada año, lo que probablemente significa casi una tercera parte del total de los experimentos diseñados de todos los tipos en Estados Unidos, en donde AT&T y FORD han promovido dichos métodos.

1.2.2 MÉTODOS EXPERIMENTALES

Muchos productos de importancia industrial están constituidos por mezclas de diversos componentes y la optimización de las propiedades de las mezclas de los distintos ingredientes tiene una gran importancia práctica.

El diseño y análisis de experimentos desempeña un papel muy importante en la mejora de la calidad y la productividad en la industria en general y puede realizar importantes aportaciones en este campo, teniendo en cuenta particularidades de estos problemas.

Mediante el análisis y estudio se puede optimizar un proceso, tal que garantice el cumplimiento de las características de calidad deseables y requeridas, la competitividad y permanencia del producto en el mercado. Es por ello la importancia de la aplicación de métodos para optimizar o controlar sistemas.

A continuación se enlistan técnicas de optimización utilizadas en el diseño y análisis experimental:

1.2.2.1 ALGORITMO DE APROXIMACIONES ESTOCÁSTICAS

Los Algoritmos de Aproximaciones Estocásticas son desarrollados en el año 1951, como métodos alternativos para optimizar o controlar sistemas, en estos métodos su modelo analítico es desconocido, pero es posible estimar su vector gradiente en base a valores o mediciones del sistema. Estos algoritmos, se diferencian en cuanto al método usado para estimar el vector gradiente, de los cuales el método de perturbación simultánea es señalado como el que presenta mayores ventajas en cuanto a cantidad de observaciones por iteración. Este método, al igual que el resto, presentan la desventaja de que si la función es “muy inclinada”, entonces el algoritmo diverge o en caso de ser “muy plana” converge muy lentamente.

1.2.2.2 METODOLOGÍA DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA

La Metodología de la Superficie de Respuesta² (MSR) es una técnica eficiente para la optimización de procesos, la cual tiene como objetivo principal determinar la condición de operación óptima para un sistema, o determinar la región del espacio de los factores en la que se satisfacen las condiciones de operación. Además de que fue diseñada para encontrar los ajustes óptimos para un conjunto de entradas, y poder diseñar variables que maximicen (o minimicen) la respuesta y . Tal problema típicamente se centra en el valor medio de y . Consecuentemente trabaja bien, cuando la varianza de y es pequeña relativamente.

² Los orígenes de la MSR como tal se remiten al trabajo de Box y Wilson (1951), pero es en los últimos 20 años en que, debido en parte a las computadoras, esta metodología ha tenido un desarrollo considerable. tanto en aspectos teóricos como en aplicaciones.

La Metodología de Superficie de Respuesta clásica fue formulada originalmente por Box y Wilson en 1951. Actualmente, Box establece que la clave de su método es que éste procede en pasos. Esta metodología es una colección de técnicas estadísticas y matemáticas útiles para la optimización de funciones estocásticas (Montgomery, 1995).

El primer trabajo consistente en la aproximación de un modelo, en la optimización de un proceso, fue hecho por Box y Draper (1987). Ellos desarrollaron un acercamiento heurístico llamado “Evolución Operativa” (EVOP), el cual iterativamente construye una superficie de respuesta alrededor del óptimo proveniente de una iteración previa. Después, la Metodología de Superficie de Respuesta también se aplicó a modelos de simulación aleatorios.

1.2.2.3 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE VINING Y MYERS, (1990)

El método de respuesta dual que Vining y Myers (1990), propusieron es un ingenioso método para hacer una aproximación de la respuesta dual y . Dicho método es conocido como VM y consiste básicamente en maximizar la capacidad de los procesos productivos para producir dentro de las especificaciones a través del uso de los métodos langranianos para superficies de respuesta dual (Myers y Carter, 1973), métodos que son adaptados para resolver modelos listados a continuación³.

Vining y Myers (1990), proponen los modelos,

$$\text{Minimizar } \hat{W}_{\sigma} \quad \text{Sujeto a } \hat{W}_{\mu} = T \quad (2.1)$$

$$\text{Minimizar } \hat{W}_{\mu} \quad \text{Sujeto a } \hat{W}_{\sigma} \leq T \quad (2.2)$$

misos que pueden ser utilizados para resolver el problema de maximizar los índices de capacidad de los procesos productivos. Estos modelos se construyen de acuerdo a la preferencia que se le asigna al valor de la variable de respuesta; así para el caso en el que el valor nominal es lo mejor, proponen el modelo (2.1), mientras que para los dos casos restantes en los que lo mas grande o lo mas pequeño es lo mejor recurren al modelo (2.2).

³ Tang L.C. and Xu, K., Journal of Quality Technology, “A Unified Approach for Dual Response Surface Optimization”, Vol. 34, No.4, 2002.

De los modelos representados en las ecuaciones (2.1) y (2.2), $\hat{W}_\mu$ y $\hat{W}_\sigma$ representan modelos ajustados de segundo orden, con los que se estiman, respectivamente, las expresiones que representan la relación funcional entre el conjunto de factores controlables y la desviación estándar o entre el valor promedio de la variable de respuesta; mismas que son ajustadas a través del método de mínimos cuadrados. T corresponde en la ecuación (2.1) al valor nominal para el valor promedio de la variable de respuesta y en la ecuación (2.2) corresponde al valor permitido para la desviación estándar.

1.2.2.4 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE DEL CASTILLO Y MONTGOMERY, (1993)

Del Castillo y Montgomery (1993), propusieron un modelo conocido como DM, con el cual solucionaron el problema utilizando el algoritmo del Gradiente Reducido Generalizado (GRG), el cual está disponible en algunos paquetes de software, tales como solver de Microsoft Excel. Se ha demostrado que la aproximación puede manejar el caso en el que el nominal es lo mejor y los casos en el que lo más grande y lo mas pequeño es lo mejor².

1.2.2.5 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE LIN Y TU, (1995)

Lin y Tu (1995), propusieron un modelo conocido como LT, con su aplicación observaron que el esquema de optimización basado en métodos langranianos, en el cual la media estimada es un valor especificado o dado. Así, eliminaron la necesidad de emplear métodos langranianos en la optimización, donde esta eliminación la logran con la transformación del modelo dual (2.1 y/o 2.2) a un modelo de una sola variable. Para este efecto proponen minimizar el Error Cuadrático Medio (MSE) a través de los modelos:

$$\text{Minimizar } MSE = (\hat{W}_\mu - T)^2 + \hat{W}_\sigma^2 \quad (2.3)$$

$$\text{Minimizar } MSE = \hat{W}_\mu^2 + \hat{W}_\sigma^2 \quad (2.4)$$

El modelo (2.3) se usa para optimizar procesos en los que lo nominal es lo mejor, mientras que el modelo (2.4) es utilizado para casos en los que lo menor es lo mejor. Donde $\hat{W}_\mu$ y $\hat{W}_\sigma$ representan, respectivamente, las superficies de respuesta del mejor orden ajustadas para la varianza y la media de la variable de respuesta. T es el valor objetivo para la media de la variable de respuesta².

1.2.2.6 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE COPELAND Y NELSON, (1996)

Copeland y Nelson (1996), propusieron un modelo conocido como CN, mediante el cual, utilizando el método simplex, minimizan los modelos listados a continuación:

$$\text{Minimizar } \hat{\sigma} \quad \text{Sujeta a } (\hat{\mu} - T)^2 \leq \Delta^2 \quad (2.5)$$

$$\text{Minimizar } -\hat{\mu} \quad \text{Sujeta a } \hat{\sigma} \leq \sigma_T \quad (2.6)$$

$$\text{Minimizar } \hat{\mu} \quad \text{Sujeta a } \hat{\sigma} = \sigma_T \quad (2.7)$$

El modelo (2.5) se utiliza para cuando el valor nominal de la variable de respuesta es lo mejor; los modelos (2.6) y (2.7), son utilizados, respectivamente, para situaciones en las que el valor mayor o menor es lo mejor. De la variable de respuesta $\hat{\mu}$ corresponde su valor promedio, T a su valor objetivo y $\hat{\sigma}$ a su desviación estándar y de esta última σ_T representa un valor constante².

1.2.2.7 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE AMES, (1997)

Ames (1997), propuso el siguiente modelo² de la función de pérdida de la calidad, para superficies de respuestas múltiples, aplicable también al caso de respuesta dual:

$$\text{Minimizar } QLP = \sum_{i=1}^m \omega_i (\gamma_i - T_i)^2 \quad (2.8)$$

Donde γ_i es la respuesta estimada para el criterio de calidad i , con el respectivo valor del punto T_i y ω_i es el peso correspondiente a cada respuesta.

1.2.2.8 MÉTODO DE RESPUESTA DUAL DE KIM Y LIN, (1998)

Kim y Lin (1998), desarrollaron el modelo KL, el cual propone una aproximación para la optimización de la superficie de respuesta dual, basada en la formulación de la función de conveniencia de Derringer y Suich (1980), la aplicación de esta función es una técnica popular de optimización multirespuestas. Vining (1998) extendió el trabajo de Khuri y Conlon (1981), Pignatiello (1993), y Ames y colaboradores (1997). Vining propuso un modelo de la optimización usando una función de la pérdida del error medio que incorpora explícitamente las estructuras de la varianza - covarianza de ambas respuestas.

1.2.2.9 MÉTODO DE KUSHNER Y CLARK, (1978)

Kushner y Clark (1978) proponen un método de aproximaciones estocásticas, mismo que a su vez utiliza el método de Lagrange para optimizar funciones con restricciones con desigualdades. Con este método plantean solucionar el siguiente modelo:

$$\text{Minimizar } f(X) \quad \text{Sujeta a } X \in G \quad (2.9)$$

Donde $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$, $G = \{X \in \mathbb{R}^d \mid g_i(X) \leq 0 \mid i = 1, \dots, r\}$ y $g_i: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$

La solución de este modelo se determina con la generación de las sucesiones de vectores aleatorios $\{X_k\}$, $\{\lambda_k^1\}$, ..., $\{\lambda_k^r\}$ ($X_k \in \mathbb{R}^d$, $\lambda_k^i \in \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, r$), cuyos límites convergen con probabilidad 1 a un punto de Karush-Kuhn-Tucker del modelo presentado por la ecuación (2.9), de acuerdo con los dos pasos siguientes:

Paso 1. La sucesión $\{X_k\}$ es generada con el uso de la formula recursiva

$$\tilde{X}_{k+1} = X_k + a_k \hat{\partial} f(X_k) \quad (2.10)$$

Donde a_k representa al k-ésimo elemento de una sucesión de números reales positivos $\{a_k\}$ que converge a cero y su serie diverge, $\hat{\partial} f(X_k)$ representa la estimación de la derivada, evaluada en (X_k) , de la función real de f . Estimación que se obtiene usando el método de diferencias finitas (Kiefer y Wolfowitz, 1952) y la componente i-ésima $X_{i,(k+1)}$ ($i = 1, 2, \dots, d$) esta dada por:

$$X_{i,(k+1)} = \begin{cases} \tilde{X}_{i,(k+1)} & \text{Si } |\tilde{X}_{i,(k+1)}| < A_i \\ A_i (\text{signo de } \tilde{X}_{i,(k+1)}) & \text{Si } |\tilde{X}_{i,(k+1)}| \geq A_i \end{cases} \quad (2.11)$$

donde A_i representa un valor real, tal que $|\tilde{X}_{i,(k+1)}| < A_i$;

Paso 2. La sucesión $\{X_k\}$ es generada con el uso de la formula recursiva

$$\lambda_{k+1}^i = \max \{ 0, \lambda_k^i + a_n \frac{\hat{\partial}[L(X_k, \lambda_k)]}{\partial \lambda_k^i} \} \quad (2.12)$$

donde $\frac{\hat{\partial}[L(X_k, \lambda_k)]}{\partial \lambda_k^i}$ es una estimación (que se obtiene mediante el método de diferencias finitas) de la derivada de la función $L(X_k, \lambda_k)$ con respecto a λ^i evaluada en $(X_k, \lambda_k^1, \lambda_k^2, \dots, \lambda_k^r)$, con

$$L(X_k, \lambda_k) = f(X_k) + \sum_{i=1}^r \lambda^i g_i(X_k) \quad (2.13)$$

$$\lambda_{k+1}^i = \begin{cases} \tilde{\lambda}_{k+1}^i & \text{Si } \tilde{\lambda}_{k+1}^i < B_i \\ B_i & \text{Si } \tilde{\lambda}_{k+1}^i \geq B_i \end{cases} \quad (2.14)$$

con B_i representando a un numero real positivo.

Este método es un procedimiento iterativo y recursivo, es decir, para determinar una nueva solución es tomada en consideración la solución anterior. Además, no requiere estimar o conocer las relaciones funcionales que rigen el comportamiento de los factores controlables con respecto a las variables valor promedio y varianza de la variable de respuesta.

En oposición, este método presenta las siguientes desventajas: en cada iteración, el número de observaciones requeridas para la estimación de las derivadas de cada una de las dos funciones involucradas es igual al doble del número de factores controlables, lo que lo caracteriza como un método menos eficiente en relación con el método de Copeland y Nelson (1996); en la práctica no existe un criterio para determinar el valor del parámetro B_i requerido en la ecuación (2.14), valor que afecta al desempeño de este método, de tal forma que si se le asigna un valor “grande”, entonces se presentan “grandes” oscilaciones en los elementos de la sucesión generada.

1.2.3 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

No es práctico inspeccionar la calidad dentro de un producto: el producto debe hacerse correctamente la primera vez. En consecuencia, el procesos de fabricación debe ser estable o repetible y tener la capacidad de operar con poca variabilidad en torno de la dimensión objetivo o nominal. El control estadístico de procesos (CEP) constituye un conjunto poderoso de herramientas para conseguir la estabilidad de los procesos y mejorar su capacidad mediante la reducción de la variabilidad.

Las principales herramientas del CEP⁴ son:

1. El histograma
2. El diagrama de Pareto
3. El diagrama causa y efecto
4. El diagrama de concentración de defectos
5. La carta de control
6. El diagrama de dispersión
7. La hoja de verificación

Aún cuando estas herramientas son una parte importante del CEP, únicamente el aspecto técnico del tema. Un elemento igualmente importante del CEP es la actitud: el deseo de todos los integrantes de la organización para mejorar en forma continua la calidad y la productividad mediante la reducción sistemática de la variabilidad (Montgomery, 2005).

Los métodos Taguchi pueden ser empleados en cualquier tipo de industria para determinar los factores y fuentes de variabilidad que tienen impacto en la capacidad del proceso para cumplir con sus requerimientos más importantes, por lo que una parte del estudio lo emplea en la optimización de la resistencia a la prueba de jalón del producto; de igual manera se utiliza el control estadístico de procesos, mediante el diagrama de Pareto, para identificar y eliminar las causas que provocan el defecto por coplanaridad de la línea PRISMA I, en la empresa Dialight de México, S.A. de C.V., de la cual se hablará brevemente, además de describir el procesos de Prisma I, así como la prueba de jalón y el defecto por coplanaridad.

⁴ Algunos autores prefieren incluir los métodos de diseño experimental mencionados anteriormente como parte del juego de las herramientas del CEP. En la investigación no se hizo por considerar el CEP como un enfoque de mejoramiento de la calidad en línea que utiliza técnicas basadas en la observación pasiva del proceso, mientras que el diseño de experimentos es un enfoque activo en el que se hacen cambios deliberados en las variables del proceso. Por lo usualmente se hace referencia a los experimentos diseñados como control de calidad fuera de línea.

1.2.4 ANTECEDENTES LOCALES

1.2.4.1 ANTECEDENTES Y DATOS GENERALES DE LA EMPRESA

Dialight es la industria líder reconocida por la aplicación de tecnología LED (Light Emitting Diode) para todo el espectro de aplicaciones visuales incluyendo indicación de estado para los mercados industriales y de comunicaciones, señalamiento para la industria de transporte y el mercado de iluminación.

Dialight ha sido pionera de algunas de las aplicaciones más innovadoras en tecnología LED desde que fue desarrollada a principios de los años 1970's.

Sus productos LED para la industria electrónica, han brindado a muchos ingenieros mejores maneras para indicar el estado en todo tipo de equipo. Las señales de tráfico de Dialight, ha ahorrado a municipios y ciudades millones de dólares en costos de energía y mantenimiento. Las señales LED y luces direccionales para vehículos de carga pesada, la mayoría de las veces, duran más que los mismos vehículos.

Dialight además produce señaladores para las pistas de los aviones, para tableros industriales, semáforos en donde sus LED's son de alta duración y de mayor intensidad que cualquier otro.

Dialight es una organización que vive introduciendo tecnología en todas sus líneas de productos, lo cual contribuye al prestigio logrado hasta ahora, la calidad que los distingue y la competitividad de la organización.

En el año 2001, Dialight estableció operaciones de ensamble en la ciudad de Ensenada, Baja California, México, instalando dos de sus plantas en diferentes locaciones. En el mes de enero del 2007, Dialight decide unificar sus dos plantas para eficientizar sus procesos.

1.2.4.1.1 MISIÓN

La misión de Dialight es traer el valor sólido de la luz a sus clientes desde una amplia gama de industrias y mercados. Los usos estarán en la indicación, señalación y la iluminación usando dispositivos monocromáticos y blancos.

Para llevar a cabo la misión, es necesario entender las necesidades particulares del cliente desde el punto de vista del funcionamiento, confiabilidad, seguridad, longevidad y el costo. Dialight no sólo emplea la comprensión de la tecnología del LED, también es experto en la gerencia termal, ingeniería de óptica, electrónica e ingeniería eléctrica y empaquetado mecánico.

Para satisfacer las necesidades del cliente, Dialight empleará técnicas de calidad en el diseño, la Pre-producción y las fases de producción para brindar un producto y asegurarse que estos y sus estándares se realizan cumpliendo las expectativas del cliente.

Solamente en el cumplimiento con las expectativas del cliente estaremos satisfechos con nuestro propio funcionamiento.

1.2.4.1.2 VISIÓN

Avanzar proporcionando una ventaja competitiva de clase mundial para Dialight.

Esta visión se caracteriza por:

- Las operaciones forman parte de nuestra estrategia de negocios y planeación táctica.
- Productos de calidad, respuesta rápida al mercado, bajo costo y facilidad de servicio.
- Equipo de trabajo bien entrenado, dedicado y motivado.

1.2.4.1.3 POLÍTICA DE CALIDAD

Asegurar que los requerimientos de nuestros clientes se cumplan tanto en calidad, el rendimiento y la confiabilidad del producto, utilizando un enfoque preventivo a la mejora continua.

1.2.4.1.4 OBJETIVOS DE CALIDAD

- Productos libres de defectos.
- Entregas a tiempo.
- Satisfacción total de nuestros clientes.

1.2.4.1.5 PRODUCTOS



Figura 3: Indicadores Prisma



Figura 4: Señales de tráfico



Figura 5: Iluminación de estado sólido



Figura 6: Indicadores para tarjetas de circuitos



Figura 7: Indicadores de prevención aérea



Figura 8: Iluminación y señales ferroviarias



Figura 9: Indicadores para aeropuertos



Figura 10: Indicadores para vehículo



Figura 11: Direccional NISSAN ALTIMA 2007



Figura 12: Localización de Dialight

1.2.4.2 LÍNEA PRISMA I

La línea PRISMA I, esta dedicada exclusivamente a la producción de prismas modelo 591 y 592, el proceso de producción consta de siete etapas:

Etapla I. Se toman las fixturas, las cuales cuentan con 25 cavidades, y se les colocan Housing, lente y mediante una pluma de vacío el LED, en ese estricto orden. Este proceso es completamente manual.



Figura 13. Housing, lente, LED y fixtura

Etapla II. Una vez llenas las 25 cavidades, la fixtura es depositada en una banda transportadora que la conduce a una Shower Head, el cual, mediante una serie de agujas inyecta pegamento Epoxi en el espacio disponible que existe entre el Housing y el LED. Este proceso es automatizado.



Figura 14. Shower Head. Proceso de inyección del epoxi

Etapla III. Justamente antes de que la fixtura entre al horno es retirada de la banda transportadora por un operador, el cual coloca de manera manual una tapa sobre la fixtura atornillándola, para evitar que el producto presente coplanaridad.



Figura 15. Tapa de la fixtura, para evitar el defecto por coplanaridad

Etapla IV. Una vez colocada la tapa la fixtura es colocada de nuevo en la banda, la que se introduce al horno, provocando que el epóxico sea curado por el calor que recibe. El proceso de curado se lleva a cabo mediante un proceso de escalara, es decir, el horno calienta por fases a la fixtura. Las temperaturas a las que el producto es sometido son las siguientes: 306 °C, 300 °C, 294 °C, 170 °C y 70 °C, a una velocidad de 32 revoluciones por minuto.

Etapla V. Después de terminado el proceso de curado, la tapa de la fixtura es retirada, desatornillándola, de manera manual, de la fixtura.



Figura 16. Piezas curadas

Etapla VI. Los prismas, contenidos en la fixtura son pasados por una serie de pruebas:

- *De color:* se aplica presión y verifica que todas las piezas prendan.
- *De curado:* mediante una cámara se verifica que el epoxi haya curado correctamente y se retira el excedente con una navaja afilada.
- *Eléctrica:* mediante esta prueba se verifica la polaridad del LED, de no estar correcta automáticamente el producto es retirado de la fixtura.
- *Coplanaridad:* por medio de una cámara se revisa que el producto no presente defecto por coplanaridad, de ser así, es retirado manualmente por un operador.

Etapla VII. La fixtura pasa a empaque, en donde se verifica si alguna cavidad se encuentra vacía, de ser así se llena la fixtura, pasa a empaque, en donde los Led's son depositados en rollos, para posteriormente ser etiquetados y almacenados en espera de la transacción con el cliente.

Para verificar que el producto cumpla con el requerimiento mínimo de resistencia fijado por la empresa, 5 libras, se lleva a cabo un muestreo, que consiste en aplicar la prueba de jalón a dos piezas cada dos horas.

En la Figura 17, se muestra el diagrama de flujo de la línea PRISMA.

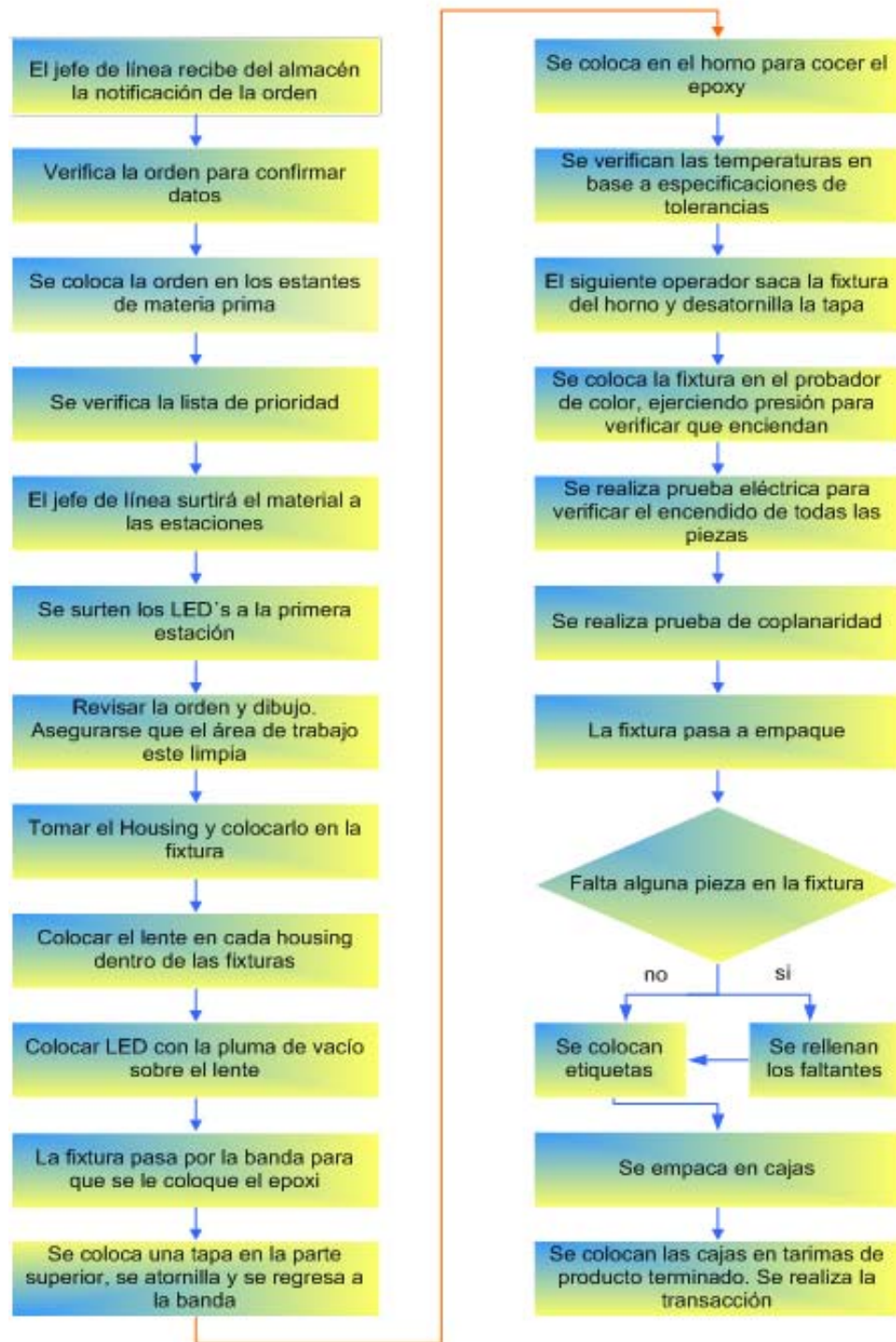


Figura 17. Diagrama de flujo de PRISMA

1.2.4.3 PRUEBA DE JALÓN

La prueba de jalón consiste en colocar la pieza, para ser destruida, en un mecanismo provisto con una cuña. Mecanismo que mide la presión que se requiere para desprender el LED del Housing.

Cabe mencionar que el producto debe cumplir con una especificación mínima de resistencia, establecida por la empresa, de 5 libras. La especificación es de tipo unilateral y se considera que con esa resistencia el producto cumple con la calidad requerida por el cliente.



Figura 18. Prueba de Jalón



Figura 19. Pantalla del equipo

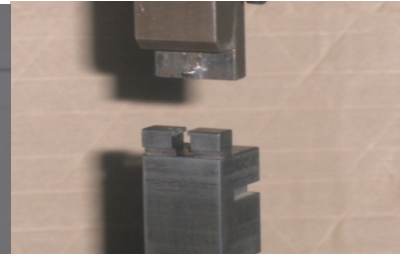


Figura 20. Mecanismo destructivo

1.2.4.4 COPLANARIDAD

Es la falta de planitud, característica geométrica de diseño de construcción y especificación del producto mediante la cual se controla una superficie.

Las variaciones en la superficie pueden estar dentro de dos planos paralelos separados del valor de la tolerancia de planitud, de lo contrario esto provoca fallas al momento de ser colocado el producto sobre los PCB.

En la

Figura 21, que se presenta a continuación se especifican las medidas y parámetros que debe cumplir el producto *prisma* para ser considerado un producto de calidad.

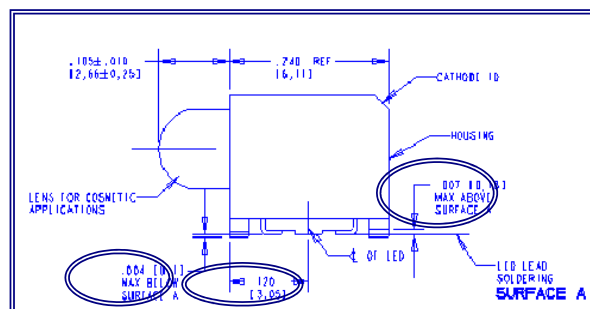
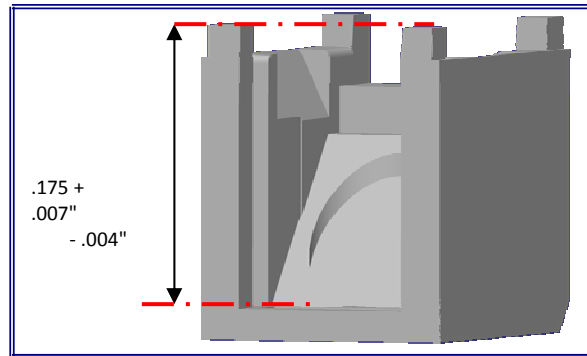


Figura 21. Límites de Coplanaridad de prisma

En la Figura 22, se muestran las medidas críticas que se deben obtener en el producto terminado para evitar el defecto de Coplanaridad: **0.004** máximos por debajo de uno de los extremos del Housing al plano y **0.007** por arriba.

**Figura 22.** Housing de Prisma

1.2.2.4.1 CÁMARA MEDIDORA DE COPLANARIDAD

Esta cámara (Figura 23), es hecha especialmente para Dialight, adaptada, por el proveedor, a las necesidades de la empresa, mide la Coplanaridad de una pieza, fotografiando al producto y comparándolo con las especificaciones determinadas en el sistema, y si ésta rebasa los límites permitidos detiene el proceso hasta que la pieza sea extraída manualmente.

**Figura 23.** Cámara medidora de Coplanaridad



CAPÍTULO II



METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El presente capítulo describe la metodología utilizada en la realización de la investigación, plasmada mediante una matriz de congruencia en la que se encuentran bien definidos los objetivos, preguntas de investigación, hipótesis, así como el planteamiento del problema y los resultados esperados.

2.0 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EMPLEADA

Toda investigación debe ser presentada en forma ordenada y secuencial. Se debe planear escrupulosamente todo el proceso de investigación, cuidando no dejar fuera ningún aspecto importante que pueda afectar el resultado, por lo que el proyecto deberá indicar con claridad lo que se pretende en cada una de las etapas, para poder así cumplir con los objetivos planteados y comprobar las hipótesis del trabajo de investigación.

Para cumplir con el proyecto se ha planteado una metodología desarrollada en el proceso de la investigación científica, la cual consta de los siguientes pasos:

1. Concepción de la idea de investigación
2. Fijar los objetivos por alcanzar
3. Plantear el problema de investigación
4. Formular la idea de investigación
5. Fundamentar la investigación
6. Definir el tipo de investigación
7. Definir la hipótesis
8. Identificar y explicar las variables
9. Elaborar la matriz de congruencia
10. Identificación de la metodología del diseño experimental a utilizar
11. Diseñar el experimento
12. Diseñar el prototipo para el proyecto
13. Correr el experimento
14. Encontrar la solución óptima al problema
15. Validar los resultados
16. Analizar y discutir resultados
17. Desarrollo de la propuesta
18. Conclusiones y recomendaciones

La metodología se orienta a resolver los principales problemas de calidad presentes en la línea PRISMA, de la empresa Dialight de México, establecida en la ciudad de Ensenada, Baja California.

2.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El término “diseño” es el plan o estrategia concebida para obtener la información deseada⁵.

Una vez determinada la metodología del estudio, se identifican los diferentes métodos existentes en el diseño experimental, lo cual forma parte del marco teórico y conceptual del trabajo.

Se realiza un estudio explorativo y descriptivo que proporciona la información necesaria, para conocer y clasificar las variables que intervienen en el proceso. Posteriormente por las características del proyecto se elige la metodología Taguchi para optimizar la resistencia a la prueba de jalón y la metodología DMAMC para solucionar el defecto por coplanaridad.

La investigación centra su estudio en la manipulación de las variables independientes, mediante un experimento diseñado, que optimiza la resistencia a la prueba de jalón y vuelve robusto el proceso a las variables incontrolables o de ruido. La configuración óptima final resultante se valida mediante una prueba de comparaciones pareadas, comparando el set up actual con el propuesto, en el caso de la resistencia a la prueba de jalón, mediante una comparación de proporciones de defectos en el caso coplanaridad.

2.3 CONCEPCIÓN DE LA IDEA DE INVESTIGACIÓN

La idea de investigación surge a partir de que la empresa se pone en contacto con la universidad, por medio de una alumna, posteriormente, mediante una serie de visitas programadas, se conoce la problemática principal de la empresa, la cual consiste en una serie de inconformidades por parte del cliente más importante de ésta, el cual representa el 40% de las ventas.

Dicha problemática estaba causando grandes pérdidas económicas por los problemas de calidad presentados en el producto, además de que el cliente podría rescindir el contrato, lo cual se traduciría en desempleo para una gran cantidad de personas que laboran en la planta.

⁵ Definición obtenida del libro “Metodología de la investigación”, autor: Roberto Hernández Sampieri, tercera edición, pág. 184.

Esto aunado a la idea de que dicha investigación sirva como consulta para una gran cantidad de empresas locales que trabajan controlando sus procesos a prueba y error, sin fijarlos a los niveles óptimos de operación y de forma sistemática, causándoles toda clase de desperdicios.

2.4 BUSQUEDA DE INFORMACIÓN

2.4.1 DOCUMENTACIÓN GENERAL

Para el desarrollo del trabajo, dentro de la documentación general del proyecto se utilizó documentación de uso exclusivo de la empresa, fichas bibliográficas, estudios y reportes de foros, así como algunas páginas de internet.

2.4.2 DOCUMENTACIÓN ESPECIALIZADA

Dentro de la documentación especializada revisada, se tienen tesis doctorales y de maestría, revistas especializadas, investigaciones científicas, revistas electrónicas y bases de datos.

2.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.5.1 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Para la realización del trabajo se utilizaron dos metodologías muy bien definidas, mismas que se explican más a detalle en el capítulo III.

Para aumentar la resistencia a la prueba de jalón, se utilizó la metodología Taguchi, mediante el esquema de procedimiento para el diseño de parámetros propuesto por Unal (1991). La reducción del defecto por coplanaridad se llevó a cabo siguiendo los pasos de la metodología DMAMC.

2.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.6.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En la revisión bibliográfica no se encontró un proceso similar al realizado por la empresa para la producción del PRISMA, esto debido a que es un producto patentado, por lo que sólo Dialight lo produce.

El principal problema de la línea es la falta de control en las variables que intervienen en el proceso, ya que no se conoce con precisión a que niveles deben fijarse y se controlan en base a conocimientos empíricos de los supervisores u operadores, lo que provoca que los productos presenten marcada diferencia en cuanto a la resistencia entre ellos a la prueba de jalón, dando como resultado algunas unidades que no cumplen con la especificación mínima, lo que se deriva en quejas posteriores de los clientes, dado que esta característica de calidad es primordial para la comercialización del producto.

El trabajar a prueba y error para encontrar los niveles a los que el producto presente mayor resistencia provocan una serie de defectos que se traducen en pérdidas para la empresa, como los son: falta o exceso de epóxico, mal curado, mala apariencia del producto.

La búsqueda constante por mejorar el producto, propició un cambio de material en el lente que utilizan en los primas, anteriormente era de Hysol y en base a un estudio estético y económico realizado se demostró que con éste lente se tienen muchos defectos de moldeo y se perdían aproximadamente 500,000 dólares al año, la otra alternativa que es el lente de silicón no presenta este problema, sin embargo, por la propiedad del material tiene la característica de expandirse al momento de ser calentado en el horno; el lente sirve de base al LED, por lo que al dilatarse lo empuja hacia arriba y provoca la coplanaridad. Una vez que el producto regresa a la temperatura ambiente, el lente vuelve a su estado natural, sin embargo, el pegamento ya ha curado, por lo que el defecto ya no puede corregirse. Debido a que se presentó este problema con el nuevo lente fue necesario colocar una tapa a la fixtura que ejerciera presión para evitar que se expandiera el lente y provocará el defecto por coplanaridad.

En el Departamento de Control de Calidad de Dialight de México, se cuenta con un sistema de Acciones Correctivas que se encuentra en red, el área de Calidad recibe los retornos de los Clientes (CM) los identifica y evalúa cuál es el defecto que se presenta, dentro de éstos, los que cuentan con mayor número de retornos o quejas es Coplanaridad, además de los derivados por la falta de control en el proceso, mencionados anteriormente.

2.6.2 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El análisis e implementación de las mejoras del proceso, se llevará acabo solamente en el área de producción Prisma I en Dialight de México, para la familia de productos de dicha línea, 591 y 592. Considerando como características de calidad la resistencia a la prueba de jalón y la coplanaridad de estos productos.

2.6.3 ALCANCE DEL ESTUDIO

Como ya se mencionó el estudio se desarrolla en la línea PRISMA I, por lo que los resultados arrojados por la investigación lo serán óptimos para el proceso que ahí se realiza.

2.7 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿La metodología Taguchi permite identificar y analizar los factores que provocan la variación de la resistencia a la prueba de jalón?
- ¿Es posible establecer un proceso en el que se optimice la resistencia a la prueba de jalón y que sea mínimamente afectado por la vida útil del epoxi, el desgaste de las fixturas y diferencia entre cavidades?
- ¿Es determinante definir y analizar los factores que ocasionan la Coplanaridad para poder eliminarla?
- ¿Es posible eliminar el defecto por Coplanaridad mediante el diseño de una nueva tapa?
- ¿Se simplificarán las operaciones de colocación y retiro de la tapa, con el nuevo diseño de ésta?

2.8 OBJETIVOS

2.8.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo buscado mediante el desarrollo de este proyecto para beneficio de la Empresa Dialight de México es:

Aumentar la resistencia a la prueba de jalón y disminuir el número de defectos por coplanaridad del producto de la línea PRISMA I.

2.8.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y analizar los factores que provocan variación en la resistencia a la prueba de jalón del producto de prisma I, utilizando la metodología Taguchi.
- Establecer un proceso que optimice la resistencia a la prueba de jalón y sea mínimamente afectado por la vida útil del epoxi, el desgaste de las fixturas y la diferencia entre cavidades.
- Determinar y analizar los factores que ocasionan el defecto de Coplanaridad.
- Diseñar una nueva tapa que elimine el defecto por Coplanaridad.

2.9 HIPÓTESIS

2.9.1 HIPÓTESIS PRINCIPAL

Es posible mejorar la resistencia a la prueba de jalón y reducir el defecto por coplanaridad, utilizando la metodología Taguchi y haciendo un rediseño en la tapa de la fixtura, respectivamente.

2.9.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- La metodología Taguchi es adecuada para disminuir la variación de la resistencia a la prueba de jalón del producto de la línea Prisma I.
- La metodología Taguchi es adecuada para aumentar la resistencia a la prueba de jalón del producto de la línea Prisma I.
- El nuevo diseño de la tapa disminuirá el defecto por Coplanaridad al aplicar una presión uniforme a lo largo de la fixtura.
- Las operaciones de colocación y retiro de la tapa sobre la fixtura, se simplificarán con el nuevo diseño de la tapa.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La importancia de la línea PRISMA, radica en que en ella se produce lotes de producto para Nokia, cliente de Dialight que representa el 40% de las ventas de la empresa y con el cual tiene un contrato anual de \$5'000,000.00 de dlls. De no estabilizar el proceso y seguir enviando producto que no cumpla con sus especificaciones, Nokia así como sus contratistas podrían rescindir su contrato, lo que representaría grandes pérdidas económicas para la empresa.

Los principales problemas que se presentan en PRISMA son:

- La falta de estabilidad en el proceso que hace que los factores varíen provocando que una parte considerable de la producción presente problemas de poca resistencia del producto a la prueba de jalón, que como anteriormente se mencionó, es una característica crítica de calidad. Esto causa pérdidas de tiempo que se traducen en tiempo extra para lograr cumplir con el pedido, excesivo retrabajo y desperdicio de material prima.
- Coplanaridad, representa el mayor defecto en la línea de Prisma I, numerosas inspecciones que no son 100% efectivas, ya que algunas unidades no conformes son embarcadas, generación de grandes cantidades de Scrap, demoras en la entrega del producto, así como retrasos en producción, lo cual provoca inconformidades de los clientes que demandan acciones correctivas a la brevedad.

La Tabla 2 muestra el estado en que se encuentra operando la empresa. Tomando como referencia el número de defectos por millón (23136), el nivel de sigma⁵ de la empresa es de 3.49 (Anexo 2) y el rendimiento (Yield) es de un 97.68 %.

	PRODUCCIÓN	DEFECTOS	PPM
Enero	1438669	51223	35604
Febrero	3155157	65522	20767
Marzo	2966640	77760	26211
Abril	1127926	63882	56637
Mayo	2825119	71183	25196
Junio	4404197	108171	24561
Julio	2014458	49320	24483
Agosto	3559935	583544	16392
Septiembre	2868918	46963	16370
Octubre	3143654	55551	17671
Noviembre	3107636	60306	19406
Diciembre			
FY'07 Cumm	30612309	708235	23136

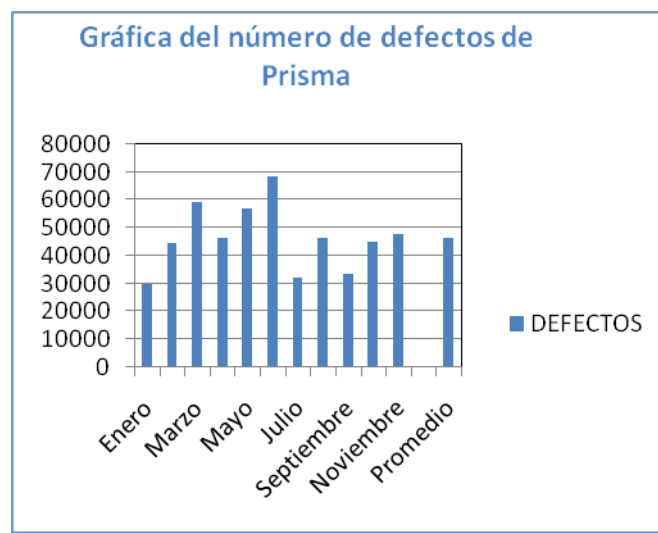
Tabla 2. Partes por millón de defectos en Dialight de México, 2007

La empresa cuenta con un 97.68% de que los productos caigan dentro de tolerancias o especificaciones, sin embargo el área más importante (PRISMA), genera una gran cantidad de defectos que no se ven reflejados en el nivel de sigma de la empresa, puesto que las demás áreas generan muy pocos defectos y compensan la cantidad de producción conforme.

PRISMA contribuye con el 72.13% de las piezas defectuosas que se generan en la empresa.

	PRODUCCIÓN	DEFECTOS
Enero	1438669	29834
Febrero	3155157	44765
Marzo	2966640	59082
Abril	1127926	46464
Mayo	2825119	57240
Junio	4404197	68627
Julio	2014458	32271
Agosto	3559935	46356
Septiembre	2868918	33681
Octubre	3143654	44953
Noviembre	3107636	47621
Diciembre		
FY'07 Cumm	30612309	510894

Tabla 3. Cantidad de defectos de PRISMA



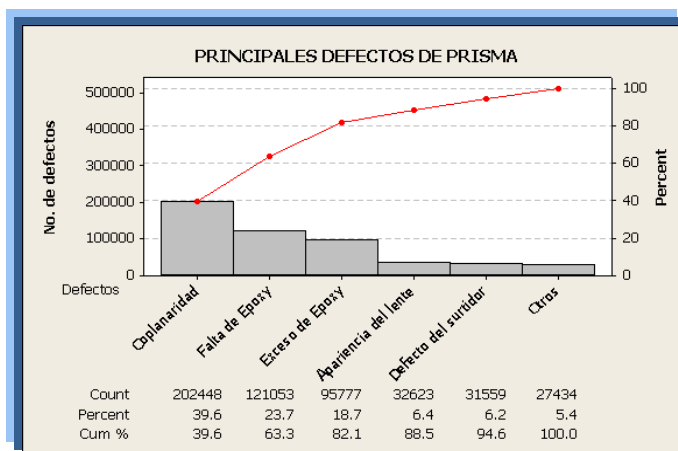
Gráfica 1. Número de defectos PRISMA, 2007

Coplanaridad es el defecto que se presenta con mayor frecuencia en PRISMA, contando con un total de 202448 piezas no conformes de enero a noviembre del 2007.

La **Tabla 4** y la **Gráfica 1**, muestran los principales defectos de PRISMA.

DEFECTO	No. DE DEFECTOS
Coplanaridad	202448
Exceso de Epoxy	95777
Defecto del surtidor	31559
Falta de Epoxy	121053
Apariencia del lente	32623
Otros	27434
Total de defectos	510894

Tabla 4. Clasificación de defectos de PRISMA



Gráfica 2. Principales defectos de PRISMA, 2007

1.3.1 APORTACIÓN PRÁCTICA

Para todo departamento de calidad satisfacer las necesidades de los clientes es el principal objetivo, por lo que se deberán evaluar todos los posibles factores que estén ocasionando la alta variación en la resistencia a la prueba de jalón del producto de la línea Prisma I y fijar niveles que permitan aumentar la media de la resistencia, así como encontrar el diseño adecuado de la tapa para la fixtura, la cual ejerza una presión uniforme y evite el defecto por coplanaridad.

1.3.2 IMPACTO SOCIAL

Mediante la aplicación de técnicas experimentales, como lo es el Método Taguchi, las empresas logran un alto nivel de competitividad, reducen sus costos y aseguran la calidad de sus productos, lo que trae como consecuencia mayor estabilidad económica para el país, así como la creación de más y mejores empleos.

1.3.3 CONTRIBUCIÓN DEL ESTUDIO

Además el estudio aportará una aplicación práctica de la Metodología Taguchi para la optimización de un proceso, lo que servirá como referencia a futuros trabajos que empleen el Diseño Experimental para la solución de problemas.

1.3.4 BENEFICIARIOS

El proyecto beneficiará principalmente a la empresa, quien obtendrá mayores utilidades al eliminar sus desperdicios y asegurar la calidad de los productos de la línea PRISMA I, lo que le permitirá permanecer en el mercado y seguir siendo una fuente de empleo para la población de Ensenada que se encuentra en constante crecimiento.

2.10 DIAGRAMA DE CONGRUENCIA

OPTIMIZACIÓN DE LA PRUEBA DE JALÓN UTILIZANDO LA METODOLOGÍA TAGUCHI Y ELIMINACIÓN DEL DEFECTO POR COPLANARIDAD EN LA LÍNEA PRISMA I

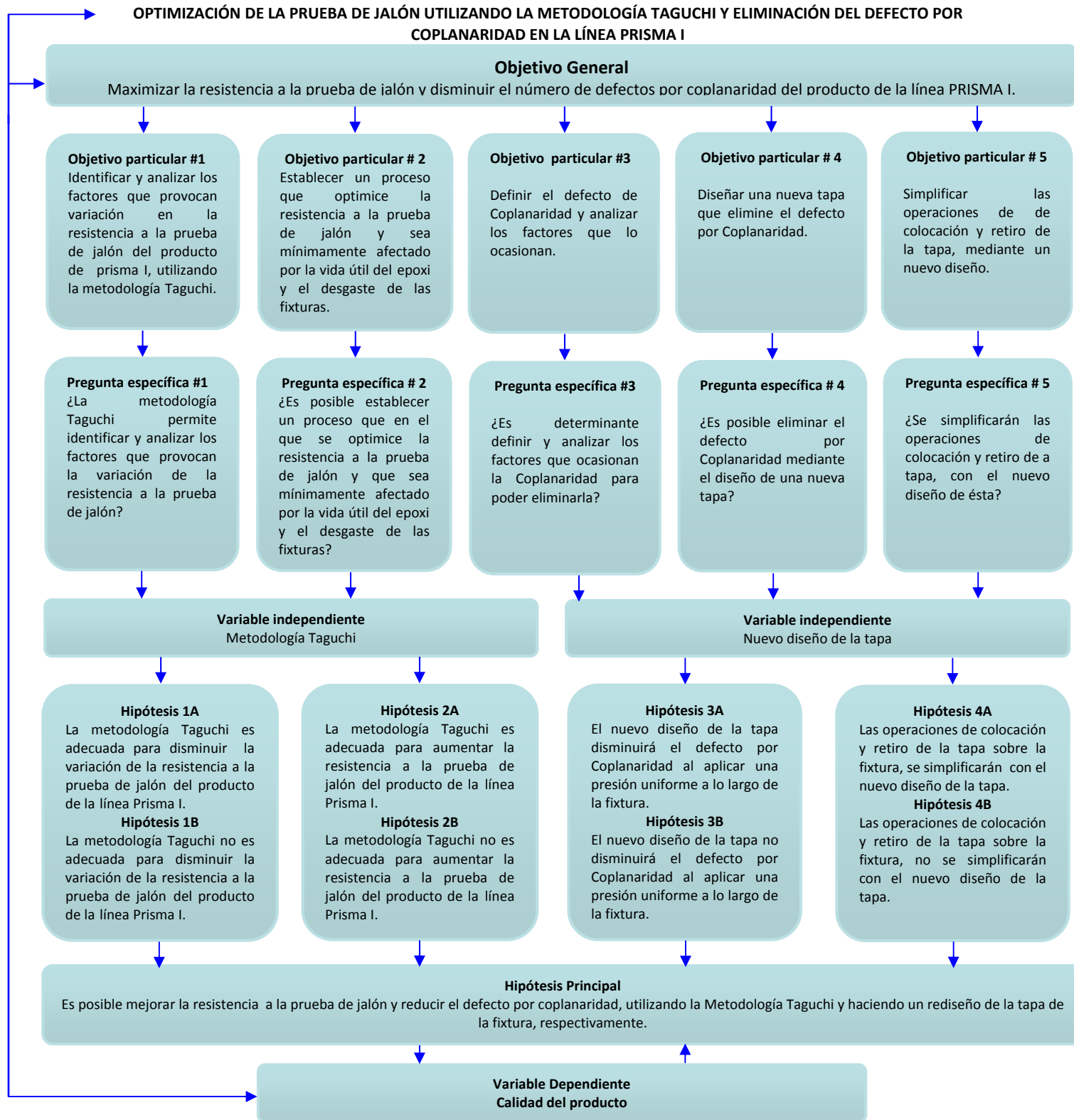


Tabla 5. Diagrama de congruencia

2.11 ÁMBITO ESPACIAL Y TEMPORAL

2.11.1 MARCO ESPACIAL

Línea Prisma I de la empresa Dialight de México, S.A. de C.V.

2.11.2 MARCO TEMPORAL

El periodo para el desarrollo de la investigación fue 2007 – 2008.

2.12 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Es de suma importancia definir el tipo de investigación necesaria para el desarrollo del proyecto. Por las características del problema planteado, se da un enfoque cuantitativo, ya que se utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico para establecer patrones de comportamiento; además la investigación se considera como: explorativa, descriptiva y experimental.

2.12.1 INVESTIGACIÓN EXPLORATIVA

Los estudios se consideran exploratorios cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha estudiado antes⁶. Este es el caso de la presente investigación, ya que como anteriormente se mencionó no existe un proceso similar y se han limitado a trabajar a “prueba y error” por desconocer el comportamiento de las variables del proceso.

2.12.2 INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA

En un estudio descriptivo se selecciona una serie de cuestiones y se mide o recolecta información en cada una de ellas, para así describir lo que se investiga⁴.

Particularmente, en esta investigación se describe el proceso de producción, así como los factores que lo afectan, con el objeto de conocerlos y poder fijar los niveles óptimos en el caso del aumento a la resistencia en la prueba de jalón; y de controlarlos para eliminar el defecto por coplanaridad del producto.

⁶ Definición obtenida del libro “Metodología de la investigación”, autor: Hernández Sampieri, Roberto. Tercera edición

2.12.3 INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

La investigación se considera experimental, ya que mediante una serie de cambios manipulados en las condiciones de operación del sistema o proceso se mide el efecto que causa en las propiedades del producto.

Se utiliza el diseño experimental, específicamente la metodología Taguchi, para fijar los niveles óptimos de operación del proceso.

2.13 RESULTADOS ESPERADOS

Como resultado de la tesis se busca, mediante la aplicación de la Metodología Taguchi, fijar los niveles óptimos de los factores que intervienen en el proceso de elaboración del producto 591 y 592, que se realiza en la línea Prisma I de la empresa Dialight de México, S.A. de C.V., para aumentar la media de la resistencia a la prueba de jalón, ya que esta es una característica crítica de calidad del producto.

Mediante el diseño de una nueva tapa, en la cual se ejerza presión uniforme sobre la fixtura, se pretende reducir al mínimo el número de defectos por Coplanaridad, defecto que representa la mayor causa de retornos por parte del cliente.



CAPÍTULO III



MARCO DE REFERENCIA

Dentro del capítulo se hace un análisis detallado de las técnicas que se utilizaron para el desarrollo del proyecto, así como de la importancia y las aplicaciones que se le ha dado a cada una de ellas. Además se analiza de manera detallada el epóxico, ya que es un factor determinante del proceso.

3.0 MARCO DE REFERENCIA

3.1 EL MÉTODO TAGUCHI

El *diseño robusto* tiene su origen en la ideas del ingeniero japonés Genichi Taguchi, quien desarrollo su propia filosofía y métodos de ingeniería de la calidad desde los años cincuenta. Fue a partir del éxito de los japoneses en industrias tan importantes como la automotriz y la electrónica que occidente comienza a fijarse en los métodos utilizados por ellos. De esta forma los métodos de Taguchi, y otros autores japoneses, se introducen a los Estados Unidos a partir de la década de los años ochenta.

El método Taguchi es una opción usada para experimentar en un proceso y determinar los factores significativos, así como los niveles óptimos en los que dichos factores deben fijarse. Esta herramienta puede usarse en sustitución o como complemento a las técnicas tradicionales de diseño de experimentos.

Los métodos Taguchi han probado éxito en muchas áreas de manufactura incluyendo, plásticos, el área automotriz, fabricación de metal y semiconductores, y hoy incluso en la industria de los servicios se está usando esta poderosa técnica para contrarrestar los problemas relacionados con el tiempo de entrega (Jiju, 2001).

Según Jiju (2001), el uso de los métodos Taguchi en el ambiente de los servicios aún no ha sido muy reportado. Es importante notar que los métodos Taguchi se pueden aplicar en la industria de los servicios en la medida en que sus salidas puedan ser identificadas y medidas con precisión. Las siguientes son aplicaciones potenciales de los métodos Taguchi en la industria de los servicios:

- Comparación de estrategias competitivas en el desarrollo de nuevos servicios;
- Minimizar el tiempo de respuesta a las quejas de los clientes;
- Minimizar los errores en las órdenes de servicios;
- Reducir el tiempo de entrega del servicio al cliente (bancos, clínicas, restaurantes, etc.);
- Reducir los errores de proceso en las transacciones bancarias;
- Reducir el tiempo de espera en la sala de emergencia en los hospitales.

3.1.1 LA FILOSOFÍA DE CALIDAD DE TAGUCHI

Taguchi establece que la *calidad de un producto* debe ser medida en términos de abatir al mínimo las pérdidas que ese producto le trae a la sociedad, desde que se inicia su fabricación hasta concluir su ciclo de vida, estas pérdidas sociales se traducen en pérdidas para la empresa en el mediano y largo plazo. Enfoque al cliente en vez de enfoque al fabricante. Taguchi retoma el contexto del control de calidad fuera de línea (*of line QC*) planeando que la inspección y el control del proceso no son suficientes para alcanzar una calidad competitiva; y que los niveles elevados de calidad sólo pueden lograrse, en términos económicos, en las fases de diseño.

El término calidad puede ser definido de diferentes maneras y diferentes significados para diferentes personas. Sin embargo, para lograr un estado competitivo mediante, es recomendable tener una definición de calidad que refleje las expectativas y necesidades del cliente.

La calidad se ha definido por muchos como: "cumplir con la especificaciones", "cero defectos", o como "satisfacer al cliente". Sin embargo, estas definiciones no ofrecen un método para obtener la calidad relacionándola con un costo. Taguchi propone una visión de la calidad, que relaciona a ésta con un costo, en la que incurre no tan sólo el fabricante a la hora de producir, sino también el cliente y la sociedad como un todo (Unal, 1991).

La idea fundamental en el enfoque de Taguchi es que cada vez que un producto de mala calidad se embarca, existe una pérdida impartida a la sociedad (Sarin, 1997).

Para Jiju (2001) y Escalante (2003), los siguientes siete puntos resumen brevemente la filosofía de Taguchi para asegurar la calidad de producto y servicios.

1. La calidad de un producto o servicio es la pérdida ocasionada a la sociedad desde el tiempo que el producto es embarcado (si es relacionada a un producto) o desde el tiempo que se presta el servicio a un cliente.

El significado de calidad cambia de acuerdo al contexto en que se use. De acuerdo con Taguchi, la calidad se mide como una desviación de las características funcionales de su valor objetivo. Entre más grande sea la desviación, más grande será la pérdida.

2. Los programas de mejora continua de la calidad de productos, procesos y servicios y de reducción de costos de una organización, son esenciales para sostener sus ventajas competitivas.
3. Un programa de mejoramiento continuo de calidad tiene que aspirar a reducir continuamente la variación de las características fundamentales alrededor de un valor objetivo especificado.

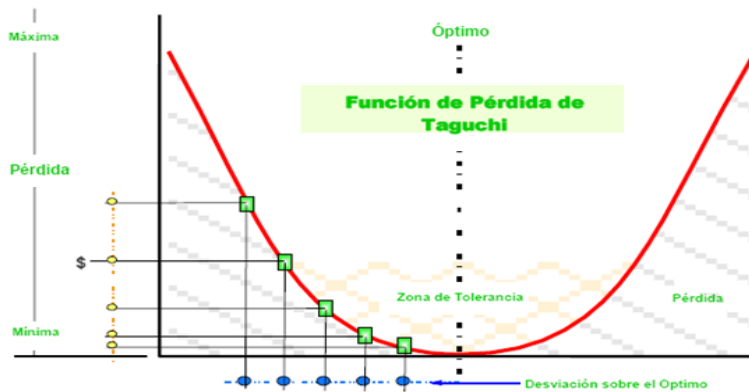


Figura 24: La función de pérdida de Taguchi

Taguchi define calidad como la pérdida que un producto causa a la sociedad, cuando las características de desempeño de dicho producto no están centradas en su objetivo. Lo anterior se expresa de manera gráfica en la Figura 24.

En muchas organizaciones la calidad es vista como cumplir con las especificaciones, esta visión debe ser tan sólo el primer paso, no la meta final. El objetivo de un programa de mejoramiento continuo de la calidad es reducir continuamente la variación de las características funcionales de un producto alrededor de un valor objetivo fijado. La inconsistencia de un producto debida a la excesiva variación, es señal de una pobre calidad.

4. La pérdida ocasionada por la calidad es aproximadamente proporcional al cuadrado de la desviación de las características funcionales de un producto de su valor objetivo.

Taguchi argumenta que la pérdida en términos financieros es proporcional al cuadrado de la desviación de las características fundamentales de su valor objetivo. La función de pérdida toma la siguiente forma cuadrática básica:

$$L(y) = K(y - m)^2$$

Donde:

L (y) es la pérdida en términos monetarios

m es el valor objetivo para una cierta característica de funcionamiento;

y es la característica individual de funcionamiento,

k es una constante o coeficiente de la función de pérdida, la cual depende de la importancia financiera de la característica del producto.

5. La calidad y el costo final de un producto manufacturado están determinados en gran medida por los diseños de ingeniería del producto y su proceso de manufactura.

La calidad se debe diseñar y construir en los productos en la fase de diseño, para así hacer que el funcionamiento del producto sea robusto en la fase de manufactura. La Figura 25, ilustra el concepto anterior, señalando donde deberá enfocarse el mayor esfuerzo que conduzca a un verdadero mejoramiento de la calidad.

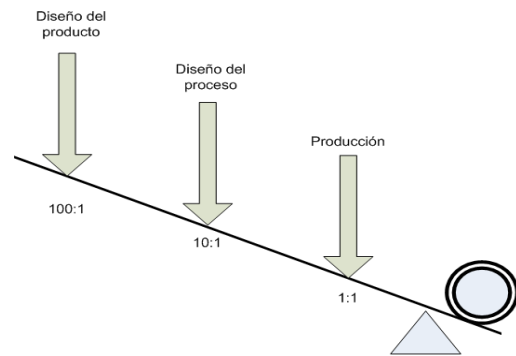


Figura 25: Palanca de la calidad (Escalante, 2003)

6. La variación en el funcionamiento de un producto o proceso se puede reducir empleando los efectos no lineales de los parámetros del producto o proceso sobre las características funcionales de un producto.

7. Los experimentos y diseños estadísticamente se pueden usar para identificar los valores de los parámetros que reducen a la variación en las características funcionales de los productos.

Para lograr reducir la variación de las características fundamentales del producto, se requiere identificar los parámetros clave que tienen un efecto significativo sobre el comportamiento de la media y la variación, mediante un experimento diseñado y planeado cuidadosamente.

3.2 CONCEPTOS UTILIZADOS EN INGENIERÍA DE CALIDAD

Wu y Wu (1996), menciona que la ingeniería de calidad (métodos Taguchi) es una tecnología para predecir y prevenir problemas de calidad desde las etapas tempranas del desarrollo y diseño del producto, incluyendo los problemas asociados con las funciones del producto, contaminación y otros costos derivados después de la fabricación y puesta en el mercado.

Hay dos fases en el área de ingeniería de calidad:

1. Fuera de línea: se encarga de la optimización del diseño de productos y de procesos.
2. En línea: calidad en el área de fabricación, se encarga del control y la corrección de procesos así como del mantenimiento preventivo.

Según Bhote (1991), los diferentes enfoques de diseño de experimentos (Cásico, Taguchi y Shainin) son particularmente importantes en dos áreas: durante la producción, para resolver los problemas crónicos de calidad y en la etapa de diseño de los productos y procesos, coincidiendo estas dos áreas con las de la ingeniería de calidad.

Bhote (1991), menciona que los objetivos que se buscan en estas dos áreas son los siguientes:

1. Identificar las causas importantes o variables, ya sea parámetros del producto, materiales o componentes de los proveedores, o factores ambientales o de los equipos de medición.
2. Determinar los efectos principales y el efecto de las interacciones de estas variables importantes.
3. Reducir la variación de las variables importantes a través de reducir las tolerancias, rediseño, mejora de los procesos de los proveedores, etc.
4. Ampliar las tolerancias en las variables que no son importantes para reducir los costos sustancialmente.

El diseño de un producto o proceso tiene un gran impacto en su ciclo de vida y sus costos de calidad. Taguchi enfatiza que la calidad debe buscarse desde la etapa de diseño, dado que la inspección y el control estadístico de control nunca podrán compensar un mal diseño (Unal, 1991; Bhote, 1991).

De la Vara (2004), menciona que la propuesta de Taguchi se ha dado en llamar *Diseño Robusto de Parámetros* e intenta diseñar un proceso o producto que sea robusto a las causas que originan el problema de calidad. En donde por robusto se entiende, según Montgomery (1991), que el producto o proceso funcione de manera consistente como se planeó y sea relativamente insensible a factores difíciles de controlar.

3.2 LAS TRES METAS DE TAGUCHI

El objetivo del método Taguchi es lograr productos y procesos robustos frente a las causas de variabilidad (ruidos) que hacen que las características funcionales de los productos se desvíen de su valor óptimo provocando costos de calidad (De la Vara, 2004).

La metodología Taguchi establece tres metas:

1. Diseños robustos (insensibles) ante el medio ambiente para productos y procesos;
2. Diseño y desarrollo de productos de modo que sean robustos a la variación de componentes;
3. Minimización de las variaciones respecto a su valor objetivo.

Las tres metas de la filosofía de Taguchi se expresan en tres etapas en el desarrollo del producto:

1. *Diseño del sistema*. Se utilizan principios científicos y de ingeniería para determinar la configuración básica;
2. *Diseño de parámetros*. Se determinan los valores específicos para los parámetros del sistema, minimizando la variabilidad aportada por las variables de ruido;
3. *Diseño de tolerancias*. Se determinan las mejores tolerancias para los parámetros.

3.4 FUENTES DE VARIACIÓN

Se conoce como fuente de variación a aquellos factores que producen un efecto sobre la variable de respuesta que se desea investigar. Pérez (2001), menciona que la variación es normal, es un fenómeno que ocurre en todo proceso de un sistema, existe variación de pieza a pieza, aunque se haya fabricado de “idéntica manera”. A las diferencias, a veces imperceptibles, o marcadas, se llama variación. Esta variación puede tener varias atribuciones ya que se puede inducir variación o puede ser provocada por diferentes factores de la naturaleza o por causa indeterminada.

3.4.1 FACTORES DE CONTROL (VARIABLES INDEPENDIENTES)

Estos factores se pueden manipular en la condición de un experimento. Estos se determinan, así como sus diferentes dosificaciones o niveles a evaluar.

3.4.2 FACTORES INDICATIVOS

Son utilizados para evaluar el desempeño de un producto bajo diferentes condiciones de operación. Por ejemplo, la operabilidad en la conducción de autos puede ser evaluada a niveles de baja, mediana y alta velocidad. Los niveles del factor indicativo tienen un significado técnico; pero no se desea seleccionar un nivel sobre otro. Se requiere el uso de factores indicativos para evaluar el desempeño del producto a los diferentes niveles a los cuales será sometido cotidianamente por el usuario normal.

3.4.3 FACTORES DE RUIDO (VARIABLES NO CONTROLABLES)

Los factores de ruido son aquellos que no son controlables durante el experimento, o que su control se realiza tan sólo de forma experimental, ya que el costo de manipulación es demasiado elevado. Siempre existirán factores de ruido no controlables en un experimento. Existen tres fuentes de ruido:

- **Ruido externo:** *Condiciones del entorno tales como la temperatura, la humedad, etc.*
- **Ruido interno:** Deterioro en general como desgaste, la fatiga, la oxidación, etc.
- **Ruido entre productos:** imperfecciones de fabricación, variabilidad de pieza a pieza.

3.4.4 FACTORES DE SEÑAL

Es el factor que se utiliza para cambiar la salida. Son requeridos cuando, por medio de un mecanismo de control se intenta regular la intensidad de salida del sistema lo más cercanamente a un objetivo predeterminado. Por ejemplo, la cantidad de tinte, el ángulo de giro de un volante de conducción de un automóvil, el cambio en el centro de gravedad de un esquiador, etc.

3.4.5 EFECTO DE INTERACCIÓN DE FACTORES

Los factores de control producen variación explicada por estos mismos pero también se pueden presentar que dos o más de estos interfieran generando efectos de variación debida a la interacción de ello.

3.5 DISEÑO DE PARÁMETROS

El diseño de parámetros también se denomina diseño robusto y consiste en seleccionar los parámetros importantes de un producto o proceso. Involucra encontrar los niveles óptimos de los factores controlables en el diseño de un producto, de tal forma que el diseño final sea robusto en la presencia de factores incontrolables. Los factores controlables son los parámetros de diseño que necesitan ser optimizados. Los factores de ruido también puede influenciar el funcionamiento de un producto, que no se encuentre bajo el control del diseñador (Sarin, 1997).

Para planear y diseñar experimentos industriales Taguchi emplea arreglos ortogonales (AO), que como su nombre lo indica tienen la propiedad de ortogonalidad⁷, misma que también poseen los diseños factoriales clásicos.

Un AO es una matriz de números arreglados en filas y columnas. Cada fila representa los niveles de los factores seleccionados en un experimento y cada columna representa un factor especificado cuyo efecto sobre la característica de calidad o del proceso puede ser estudiado. Los AO tienen propiedad balanceada, dado que el nivel de cada factor ocurre el mismo número de veces para cada nivel de todos los demás factores considerados en el experimento (Jiju, 2001).

Los métodos Taguchi utilizan los AO de la teoría de diseño de experimentos para estudiar un gran número de variables con un pequeño número de experimentos. Además las conclusiones obtenidas con un pequeño número de combinaciones estudiadas, son válidas para la totalidad de las combinaciones para los diversos niveles de los factores de control (Unal y Dean, 1991).

Los AO no son únicos de Taguchi. Estos fueron diseñados con anterioridad, sin embargo, Taguchi simplificó su uso al proveer AO Estándares tabulados (Anexo 1), con sus correspondientes gráficas lineales para resolver proyectos específicos (Unal y Dean, 1991).

La mayoría de los AO están asociados a una o varias gráficas lineales que indican la ubicación de las variables y sus interacciones dentro del arreglo seleccionado. Algunas gráficas lineales pueden modificarse usando la tabla de asignación correspondiente al AO al que pertenecen dichas gráficas lineales (Escalante, 2003).

⁷ Una matriz de diseño es ortogonal si sus columnas son LI, lo cual se tiene si la multiplicación de dos columnas cualesquiera es cero.

Escalante (2003) considera que para hacer una selección de AO es necesario:

1. Escoger el AO considerando que la columna de un arreglo con dos niveles pueda alojar a una variable con dos niveles, o una interacción formada por variables de dos niveles.
2. Dibujar la gráfica requerida;
3. Buscar una gráfica lineal que se adapte a la gráfica requerida y asignar variables al arreglo.

Los factores de control se asignan a las columnas de una matriz ortogonal (arreglo interno), mientras que la señal y los factores de ruido se asignan a otra matriz ortogonal (arreglo externo). Para todas las combinaciones entre las matrices interna y externa se realiza un experimento o simulación (Wu, y Wu, 1997), bajo las distintas condiciones de ruido y niveles del factor señal y se determina si la relación SR de los resultados (Wu y Wu, 1997).

3.5.1 PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN EL DISEÑO DE PARÁMETROS

Unal y Dean (1991) muestran el siguiente esquema del procedimiento seguido en el enfoque de Taguchi para el diseño de parámetros.

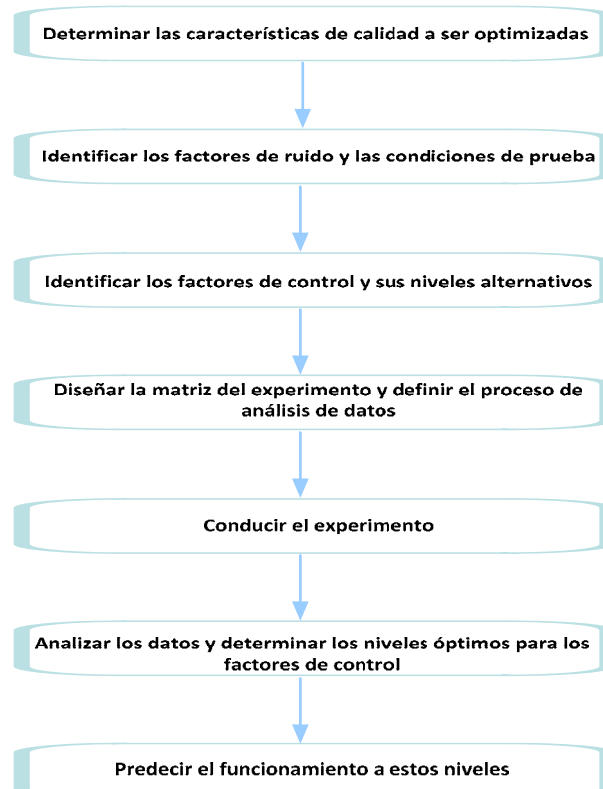


Figura 26: Esquema de método Taguchi

I. DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD A OPTIMIZAR

El primer paso en el método Taguchi es determinar la característica de calidad a optimizar. La cual, es un parámetro cuya variación tiene un efecto crítico en la calidad del producto. Es la salida o la variable de respuesta que se observará.

II. IDENTIFICAR LOS FACTORES DE RUIDO Y LAS CONDICIONES DE PRUEBA

Se identifican los factores de ruido que puedan tener un impacto negativo en la función y calidad de un sistema. Éstos incluyen variaciones en las condiciones ambientales de operación, deterioro de componentes con el uso y variación entre productos con el mismo diseño y entradas.

III. IDENTIFICAR LOS PARÁMETROS DE CONTROL Y SUS NIVELES ALTERNATIVOS

Se identifican los parámetros de control que se piensa que tienen un efecto significativo sobre las características de calidad. Los parámetros de control son los que se pueden fijar y mantener. Los niveles para cada parámetro de prueba se escogen en este punto. El número de niveles, con valores de prueba asociados para cada parámetro de prueba definen la región experimental.

IV. DISEÑAR MATRIZ DE EXPERIMENTO Y DEFINIR EL PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE DATOS

Se diseña la matriz del experimento y define el procedimiento de análisis de datos. Seleccionando el AO apropiado para los factores de control y de ruido que cubran las necesidades del estudio. La diversidad del ruido se estudia al cruzar el AO de los factores de control con los de ruido.

V. CONDUCIR EL EXPERIMENTO

El siguiente paso es conducir el experimento y almacenar los resultados. El método Taguchi puede ser usado en cualquier situación en donde exista un proceso controlable.

VI. ANALIZAR LOS DATOS Y DETERMINAR LOS NIVELES ÓPTIMOS

Posteriormente se determinan los niveles óptimos de los parámetros, utilizando el método Taguchi, mediante una medida estadística del funcionamiento llamada razón señal a ruido (S/R).

VII. PREDECIR EL FUNCIONAMIENTO DE LOS NIVELES

Al usar el método Taguchi para el diseño de parámetros, los niveles óptimos resultantes, no necesariamente corresponden a una fila de la matriz del experimento. Por lo que es necesaria una corrida de confirmación usando los niveles óptimos que resultaron de la predicción.

3.6 LA RAZÓN SEÑAL A RUIDO

La razón señal-ruido (S/R) es un índice que históricamente ha sido utilizado en la industria de la comunicación para evaluar dichos sistemas (Wu y Wu, 1997). En ingeniería de calidad, el concepto de razón S/R ha sido adoptado por el Dr. Taguchi para evaluar la calidad de un producto o proceso.

Conceptualmente, la razón S/R es la relación entre la señal y el ruido en términos de potencia. La razón S/R indica la razón entre la señal intencionada (la parte útil) y el ruido (la parte nociva para la señal), para medir la calidad cuando un producto está funcionando (Wu, y Wu, 1997).

Escalante (2003), menciona que la S/R es una transformación usada por Taguchi para incorporar el efecto de la variación y no sólo el efecto de la media de un experimento. Estas razones de S/R se deducen de la función cuadrática de pérdida (Montgomery, 1991).

Una idea sugerida por varios expertos en calidad es estudiar la media y variabilidad en forma separada (Jiju, 2001). Más según Wu y Wu (1997), si el estudio siguiera este paradigma, la mejor condición para minimizar la variabilidad, pudiera ser la más alejada a la media del valor requerido.

Los niveles de los factores de control que produzcan la mayor razón S/R deberán seleccionarse, ya que esto implica un mejor funcionamiento del producto o proceso (Jiju, 2001; Escalante 2003).

3.6.1 TIPOS DE RAZÓN SEÑAL A RUIDO

Hay varios tipos de razones S/R dependiendo de la manera de clasificarlos. Las ecuaciones a utilizar difieren para los distintos propósitos y casos, Wu y Wu (1997) reconocen los siguientes:

1. Clasificación según el tipo de datos

- 1) Variables continuas
- 2) Atributos clasificados

Las variables continuas incluyen datos tales como: dimensión, temperatura, etc., los atributos clasificados no se miden en escala continua y, se agrupan en clases de números de defectos, tasas de defectos, etc. La tasa de defectos parece una variable continua pero la naturaleza del número de defectos utilizados para su cálculo no lo es, ya que un defecto puede expresarse como 1 y un no defecto como 0.

En ingeniería de calidad es esencial evitar el uso de atributos clasificados. Estas son las razones:

- Los atributos clasificados proporcionan menos información
- Ineficiencia
- Interacciones: el mayor problema es la alta probabilidad de que aparezcan interacciones.

3. Clasificación según el propósito

Esta clasificación se refiere a los tipos dinámicos o no dinámicos. En un sistema de medida, hay una señal de entrada, el verdadero valor de la muestra a medir y una respuesta de salida, el resultado de la medida. Por lo tanto es de tipo dinámico.

Las razones S/R del tipo no dinámico se aplican a características de calidad donde no se considera la relación entrada /salida: lo mayor es lo mejor, lo menor es lo mejor y ventana operativa.

Algunos autores (Montgomery, 1991; Unal y Dean, 1991; Escalante, 2003) aunque reconocen la existencia de varias razones S/R, solo hacen referencia a tres de ellas: lo menor es lo mejor, lo mayor es lo mejor y lo nominal es lo mejor, por considerarlas estándar.

3.6.2 BENEFICIOS DEL USO DE LAS RAZONES SEÑAL A RUIDO

Como se ha mencionado con anterioridad Taguchi emplea las razones S/R para evaluar las diferentes condiciones de prueba analizadas en un experimento, seleccionándose aquella que arroje la mayor S/R por considerarse ésta la mejor solución a las necesidades del problema investigado. Los autores Wu y Wu (1997) identifican los siguientes motivos que justifican el uso de las razones S/R en ingeniería de calidad, para ellos los beneficios son:

- **La razón S/R es inversamente proporcional a la función de pérdida.**

La razón S/R es la relación entre los cuadrados de la sensibilidad y la variabilidad. Por lo tanto, su inversa es la varianza por unidad de entrada, siendo así posible su evaluación monetaria. En función de pérdida, la pérdida es proporcional a la varianza.

Simplificación del diseño directo del producto

En los años cincuenta, el concepto robustez se conducía a través de la investigación de las interacciones entre los factores de control y los de ruido. Cuando la interacción existe, hay posibilidad de que la robustez sea mejorada. De las tablas de respuesta y los gráficos factoriales se pueden seleccionar los niveles de los factores de control que minimicen la variación causada por los factores de ruido. Tal método de estudio fue denominado diseño directo del producto.

Simplificación del diseño robusto

En el diseño tradicional de productos y procesos, los ingenieros tienden a diseñar con el primer objetivo de conseguir un valor establecido. Sin embargo, este enfoque es muy ineficiente debido a que para seleccionar los niveles óptimos de los factores de control cuando existen varios factores de ruido, éstos se escogen considerando un factor de ruido a la vez, lo que pudiera llevar a diferentes niveles de factores de control para cada factor de ruido analizado.

Por el contrario, usar la razón S/R permite maximizar la robustez por la selección de los niveles de control que dan una mayor señal a ruido. El siguiente paso es ajustar la media al valor nominal. De esta manera, la eficacia de la investigación puede mejorarse.

Reducción del ciclo de desarrollo del producto

Una razón señal a ruido dinámica se define basándose en la función ideal de un producto o proceso. Cuando la sensibilidad (numerador de la relación S/R) crece, la función del producto mejora, contribuyendo a la robustez.

En contraste, el hecho de que la interacción entre los factores de control y de ruido permitan encontrar una condición robusta, la interacción entre factores de control muestra inconsistencia en las conclusiones: ésta podría ser diferente cuando las condiciones de otros factores cambian.

Se ha comprobado que el uso de las razones S/R basadas en la función ideal y asimismo relacionada con la transformación de energía nos permiten evitar las interacciones entre factores de control. Las conclusiones en estudios de laboratorio pueden ser reproducidas en la fabricación a gran escala y en el mercado cuando el cliente utiliza el producto.

🌐 Investigación para familias de productos (desarrollo de tecnología)

Un producto individual tiene su propio valor objetivo. Tradicionalmente, se realiza la investigación cada vez que se planifica un nuevo producto. Pero para una familia de productos con la misma función dentro de cierto rango de salida, podría ser antieconómico realizar investigaciones redundantes para los productos individuales cada vez. En cambio, podríamos establecer una razón S/R apropiada basada en la función ideal de un grupo de productos y maximizarla; el diseño de un cierto producto con un determinado valor objetivo de salida podría ser fácil de obtener ajustando la señal de entrada. Este enfoque se denomina desarrollo de tecnología robusta.

3.7 MALENTENDIDO EN TORNO A LOS MÉTODOS TAGUCHI

Según Wu y Wu (1996), existen malentendidos en torno a los métodos Taguchi en los países occidentales y entre ellos se mencionan los siguientes:

- 🌐 El método Taguchi es un diseño experimental
- 🌐 El método Taguchi es usar matrices ortogonales
- 🌐 En el método Taguchi las interacciones no se consideran importantes.

3.8 INGENIERÍA DE CALIDAD Y EL DISEÑO EXPERIMENTAL

El doctor Taguchi ha desarrollado su propio enfoque de diseño experimental, el cual es ciertamente único en comparación con las aplicaciones tradicionales.

Un aspecto importante en el diseño experimental tradicional es que el significado de un efecto factorial es analizado estadísticamente con respecto al error aleatorio, definido como el error de varianza. En ingeniería de calidad, el error incluye todas las fuentes de variación. Cada fuente es mucho mayor que el error aleatorio. En el diseño de parámetros, los factores de ruido son intencionalmente introducidos y exagerados con el fin de introducir error en el experimento.

Las pruebas de significancia en el diseño experimental se basan en la asunción de dos hipótesis:

- 🌐 Error en la distribución normal;
- 🌐 Hay igualdad de variabilidad entre errores.

En ingeniería de calidad, no se espera que la distribución de los factores de ruido siga una norma. Y lo más importante, no hay casos de igual variabilidad en ingeniería de calidad. Lo que se quiere conseguir es descubrir si hay magnitud de las diferencias entre la magnitud de los errores de dos niveles de un factor de control. Si hay una diferencia significativa en magnitud, podemos seleccionar el nivel del factor de control con el menor error, determinando así la condición más robusta. En otras palabras, si hay igual variabilidad el empeño del diseño de parámetros de minimizar el error se torna imposible. El paradigma de la hipótesis de igual variabilidad no puede coexistir con el diseño de parámetros.

3.8.1 INTERACCIONES Y MATRICES ORTOGONALES

Otro malentendido sobre Taguchi, es el hecho de no prestar importancia en las interacciones, lo cual es erróneo. Para explicar esto, se debe entender que hay dos tipos de interacciones:

- Interacción entre un factor de control y un factor de ruido
- Interacción entre factores de control

Tal distinción no existe entre el diseño experimental tradicional. Desde el punto de vista de la ingeniería de calidad el primer tipo es beneficioso y el segundo es perjudicial.

Al descubrir y poner de manifiesto la interacción entre un factor de control y factor de ruido, se tiene la oportunidad de encontrar una condición robusta.

El objetivo de la ingeniería de calidad es predecir los problemas que puedan ocurrir en el mercado y orientar la investigación y el diseño del producto antes de la producción. Esto es diseñar un producto basándose en las conclusiones del laboratorio.

Con el propósito de inspeccionar la existencia de interacciones durante la etapa de la investigación en el laboratorio se utilizan las matrices ortogonales. La Tabla 6 es un ejemplo de una matriz ortogonal, la denominada L_{12} . En dicha tabla, los factores de control A, B, C,...,K, son asignados a las columnas 1,2,3,...,11 respectivamente. Puede verse que para cada par de columnas, las cuatro combinaciones distintas de niveles, (11), (12), (21) y (22) se dan el mismo número de veces. Cuando esto ocurre, se dice que la matriz es ortogonal, indicando que pueden hacerse comparaciones adecuadas entre factores.

n°	Factores de control											Factores de ruido			Ŷ	N
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	M1	M2	M3		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11					
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	00	00	00		
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	00	00	00		
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2					
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2					
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1					
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1					
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1					
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2					
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1					
10	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2					
11	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2					
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	00	00	00		

Tabla 6. Matriz Ortogonal $L_{12} (2^{11})$

Para comparar el efecto del factor A, calculemos la media de los resultados en los que A estuvo en el nivel 1 (A_1), es decir, la media de los experimentos n° 1 a n° 6; así la media de los resultados en los que A estuvo en el nivel 2 (A_2), es decir, la media de los experimentos n° 7 a n° 12.

En los seis experimentos correspondientes a A_1 los niveles de todos los demás factores cambian, igualmente para A_2 . La comparación de los factores A_1 y A_2 se efectúa mientras cambian las condiciones de los demás factores. No obstante, si la diferencia entre los factores A_1 y A_2 significativamente grande con respecto a las diferencias de otros factores, se sugiere que una conclusión tal como A_2 es mejor que A_1 es probablemente consistente.

Para asegurarse, la condición óptima seleccionada de la experimentación con la matriz ortogonal debe verificarse realizando un experimento confirmatorio. Éste es un requisito necesario cuando se utilizan matrices ortogonales en ingeniería de calidad. Cuando se utilizan todas las columnas de una matriz ortogonal para albergar factores y ninguna para asignar interacciones y las conclusiones obtenidas se verifican en el experimento confirmatorio, se dice que es robusta.

En el diseño de experimentos se realizan dos pasos en la optimización: se mejora la robustez de un producto maximizando la razón SR, y posteriormente, la media se ajusta al valor objetivo.

3.9 RESINA EPOXI

Una resina Epoxi o poliepóxido termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor. Los adhesivos epóxicos se caracterizan por poseer excelente resistencia a los agentes químicos, al calor y a la humedad, además de gran resistencia a rotura y cizalla. Si el secado de un adhesivo epóxico se realiza con calor, será más resistente que si se seca a temperatura ambiente.

Las resinas epoxi se hallan entre los compuestos más importantes dentro del grupo de los materiales polimérico. El gran interés de las resinas epoxi se debe a la variedad extremadamente amplia de reacciones químicas en las que puede tomar parte, y a la gran cantidad de materiales que pueden ser utilizados como agentes de curado, lo que da lugar a diferentes propiedades en el polímero final. El proceso de curado de una resina epoxi afecta directamente a las propiedades finales del polímero, razón por la cual surge la necesidad de desarrollar métodos analíticos capaces de monitorear las reacciones que ocurren durante el curado (Garrido, 2006).

Propiedades de las resinas Epoxi:

- Buena resistencia mecánica y química
- Resistencia al ataque de fluidos corrosivos
- Resistencia a temperatura elevadas y a la humedad
- Excelentes propiedades adhesivas y poca contracción al curar

3.9.1 PD955MY: POLÍMERO TERMOESTABLE SMT

PEGAMENTO PARA DISTRIBUCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

3.9.1.1 DESCRIPCIÓN

PD955MY es un componente simple termoestable, el pegamento de polímero solvente libre se desarrolla sobre todo para el montaje superficial de componentes SMT en PCBS. Este adhesivo es adaptado para la distribución de alta velocidad. Tiene la capacidad de bajar a pequeñas alturas.

3.9.1.2 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES

- Muy amplia ventana de procesamiento, sin tendencia a “deshebrarse”
- Diseñado para distribución de alta velocidad y capacidad para bajar en pequeñas alturas
- Excelente adherencia con componentes estándar y difíciles de pegar
- Baja absorción de humedad y tiempo de curado muy corto
- Calidad consistente de horneada a horneada

3.9.1.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Color: amarillo **Densidad:** 1.2 g/cc **Homogeneidad:** Resistencia de aislamiento alta superficial

Adhesión: >25 N/mm² después del curado convencional en un horno durante 5 min/125°C.

Viscosidad: (Curva ascendente)	Rango de esquilación	Viscosidad
	[s ⁻¹]	[Pa-s]
	30	10-40

3.9.1.4 PROCESAMIENTO

El adhesivo es conveniente para distribución manual o en máquina.

3.9.1.5 CURADO

Las condiciones de curado estándar son: 125°C por 3 minutos. Las temperaturas de curados máximas no deben ser mayores a 200°C. El mínimo tiempo de curado se muestra en la tabla:

°C	100	125	150	180
Minutos	8	3	1.5	1

3.9.1.6 LIMPIEZA

Debido al residuo de termoplasticidad del adhesivo curado, los componentes defectuosos son reemplazados al (con aire) arriba de 100 °C el adhesivo curado y retirar el componente cuidadosamente. Después de haber removido el componente con aire caliente, se remueve el adhesivo restante con una herramienta afilada.

3.9.1.7 EMPACADO

El adhesivo se empaqueta en jeringuillas especiales, llenadas sin ninguna burbuja de aire.

3.9.1.8 ALMACENAMIENTO

El almacenamiento máximo recomendado son seis meses, refrigerado a un rango de temperatura de 5 a 12 °C. El almacenamiento a temperaturas mayores de 30 °C no es recomendado.

3.10 DIAGRAMA DE PARETO

Se dice que más del 80% de la problemática en una organización es común, es decir, se debe a situaciones que se encuentran permanentes sobre el proceso. Sin embargo, existen unas cuantas causas vitales que contribuyen en gran medida a la problemática global de un proceso o una empresa (De la Vara Salazar, 2004). Ésto es la premisa del diagrama de Pareto, el cual es un gráfico de barras cuyo campo de análisis o aplicación son los datos categóricos, y tiene como objetivo ayudar a localizar el o los problemas vitales, así como sus causas más importantes.

La idea es que cuando se quiere mejorar un proceso, no se trabaje en todos los problemas a la vez, sino que, con base en los datos enfoquen los esfuerzos donde puedan tener mayor impacto.

La variabilidad y utilidad del diagrama se respalda en el Principio de Pareto, conocido como Ley 80-20 o “Pocos Vitales, muchos triviales”, el cual reconoce que pocos elementos (20%) generan la mayor parte del efecto (80%), y el resto genera muy poco efecto total. El nombre del principio es en honor del economista italiano Wilfredo Pareto (1843-1923), él reconoció que pocas personas poseían gran parte de los bienes, y afirmaba: pocos tienen muchos, y muchos tienen poco.

Algunos ejemplos de tales minorías vitales serían:

- La minoría de clientes que representen la mayoría de las ventas.
- La minoría de rechazos que representa la mayoría de quejas de la clientela.
- La minoría de vendedores que esta vinculada a la mayoría de partes rechazadas.
- La minoría de productos que representan la mayoría de las ganancias obtenidas.

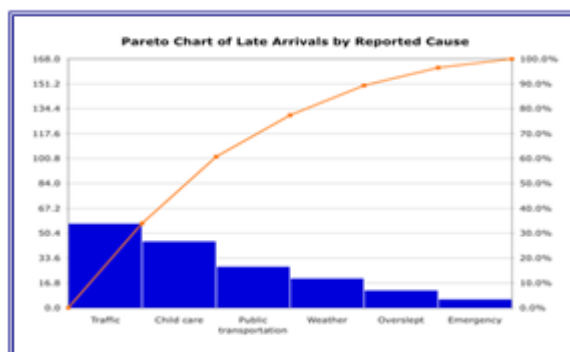


Figura 27. Ejemplo de un diagrama de Pareto



CAPÍTULO IV



MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se encuentra una descripción de los materiales necesarios en el proceso de producción, y los métodos utilizados para la realización del proyecto. Una parte importante del capítulo aborda los factores que afectan al proceso, así como los niveles a los que serán probados, para determinar la combinación óptima de factores que aumenten la resistencia a la prueba de jalón.

Para el defecto por coplanaridad, se muestra como se encontró en que posición de la fixtura era más recurrente, así como la propuesta de una nueva tapa que minimice tal defecto.

4.0 MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación es explorativa, descriptiva y experimental, algunos de los instrumentos utilizados fueron: la investigación documental; ésta es necesaria en todo trabajo de tesis, por lo que la presente tesis no es la excepción. Se revisaron diversos libros relacionados con el área, revistas; así como un análisis de la documentación y procesos de la empresa.

4.1 MATERIALES

El proceso de producción se describió anteriormente, por lo que en este capítulo se describen los materiales utilizados para:

4.1.1 MATERIALES UTILIZADOS EN EL PROCESO

El **Housing, Led y lente**, es surtido por la misma empresa Dialight de su planta en Roxboro. Dialight es cliente de Dialight, el producto es de su diseño y uso exclusivo.

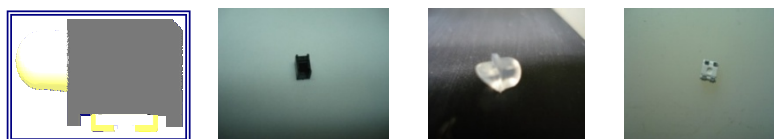


Figura 28. Componentes del producto PRISMA



Figura 29. Pegamento epóxico PD955MY

La materia prima que adquieren de un proveedor externo a Dialight es el **pegamento epóxico PD955MY** es un componente simple termoestable, descrito anteriormente.

Fixturas, contienen los componentes del producto, estas fixturas son diseñadas y elaboradas, exclusivamente para la empresa, con las especificaciones del producto, por un proveedor local, son de acero inoxidable y tienen una vida útil promedio de seis meses en óptimas condiciones.

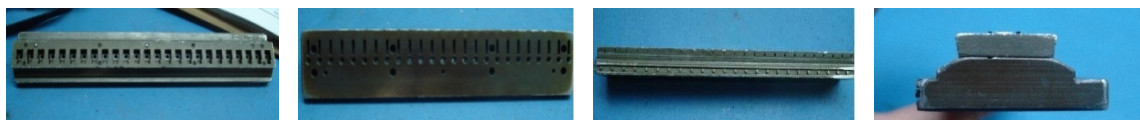


Figura 30. Diferentes ángulos de la fixtura utilizada en la línea PRISMA

En esta misma fase del proceso, se utilizó una pluma de aire para colocar el LED sobre el lente, el que de igual forma se construyó para el proceso.

Gage en el cual se coloca el **Shower Head** que aplicará el epóxico entre el espacio libre entre el lente y el Housing.



Figura 31. Shower Head



Figura 32. Tapa de fixtura

Tapa de fixtura, esta tapa es adquirida de un proveedor local, mismo que elabora las fixturas y es también de acero inoxidable,

con una vida útil promedio de seis meses, cuenta con cuatro tornillos ajustables que permitan una vez colocada la tapa, ejercer presión sobre el producto, mediante una lámina de acero de 20 mm de espesor, esto para evitar el defecto por coplanaridad.

Horno marca Sikarma, modelo Falcon Ext, mediante un proceso de escalera, durante un tiempo de curado aproximadamente de 3 minutos, a una velocidad de 32 rpm, la temperatura del horno es programable.



Figura 33. Horno Sikarma

4.1.2 EQUIPO UTILIZADO PARA LAS PRUEBAS



Figura 34. Cámara para medir Coplanaridad

Cámara para prueba de Coplanaridad, funciona tomando una serie de fotografías instantáneas del producto y las compara con los parámetros que tienen establecidos como “aceptable”, diseñada especialmente para este proceso, la máquina detiene el proceso hasta que la pieza defectuosa sea retirada.

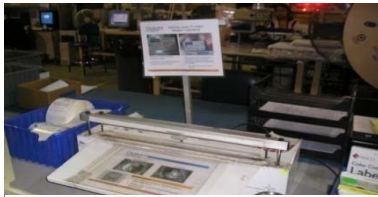


Figura 35. Empacado al vacío

Una vez que el producto ha cumplido con las especificaciones, el producto es empacado al vacío mediante una máquina marca Accu Seal 35, de operación manual, posteriormente es trasladado al almacén de producto terminado.

Para la prueba de resistencia, también llamada **prueba de jalón** se lleva a cabo en una máquina marca AMETEK Mansfield & Green División, modelo ACCUFORCE III.



Figura 36. Máquina AMETEK

4.2 MÉTODOS

En este capítulo se describe, como se seleccionaron los factores de control y de ruido, así como el método para realizar las pruebas de jalón, además de la planeación y desarrollo del experimento. También se identifican y analizan las condiciones en que causan el defecto por coplanaridad. Por ser la Resistencia a la prueba de jalón y Coplanaridad los problemas más grandes de PRISMA I.

4.2.1 DESARROLLO DEL EXPERIMENTO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PRUEBA DE JALÓN

El experimento se explicará siguiendo los pasos para el diseño de parámetros (Unal y Dean, 1991)

4.2.1.1 DETERMINAR LA CARACTERÍSTICA DE CALIDAD QUE DEBE SER OPTIMIZADA

Por tener un efecto crítico en la calidad del producto se determinó que la característica considerada para el estudio es la resistencia a la prueba de jalón. Es de suma importancia, ya que el producto debe resistir por lo menos 5 libras para evitar el desprendimiento del Housing lo cual provoca la caída de éste, de las tarjetas PCB durante el proceso del cliente.

Aun cuando el producto cumple con la especificación, los factores se encuentran oscilantes durante el proceso, ocasionan que constantemente se pierda el control provocando producto no conforme, lo que se traduce en considerables pérdidas, de ahí la importancia de identificar y fijar los factores significativos para tener un proceso óptimo y bajo control.

4.2.1.2 IDENTIFICAR LOS FACTORES DE RUIDO Y LAS CONDICIONES DE PRUEBA

Los factores de ruido son variables que no se pueden controlar durante la operación normal del proceso, por razones prácticas y/o antieconómicas (De la Vara, 2004).

Para el estudio se consideraron los siguientes factores de ruido:

Vida del epoxi

Como vida del epoxi se entiende el tiempo máximo para ser utilizado el en proceso, debido a que este producto debe encontrarse refrigerado en un rango de temperatura de 5 °C a 12 °C, una vez que es sacado del refrigerador la resina empieza a subir su temperatura hasta llegar a temperatura ambiente, lo que provoca que aumente considerablemente su viscosidad y esto trae como consecuencia que las jeringas inyectoras se tapen y no inyecten correctamente el pegamento, lo que ocasiona que el producto no cumpla con la resistencia de mínima especificada. El tiempo máximo recomendado por el proveedor, expuesto a temperatura ambiente, para tener un epoxi de buena calidad es de cuatro horas. Por lo que durante esas cuatro horas la resina sufrirá pequeños cambios en su temperatura, lo que traerá como consecuencia pequeñas variaciones entre productos durante ese lapso de tiempo, sin embargo sería muy difícil y antieconómico tratar de controlarlo, por lo que se deberá trabajar con ese epóxico hasta que termine su vida útil.

Para fines de la experimentación se controló la vida del epóxico, y se probó a dos niveles, el primero es recién salido del refrigerador y el segundo, cuando tiene dos horas en operación.

Desgaste de la fixturas

Es un proceso natural, por las características del material (acero), resultaría antieconómico el tratar de controlarlo e incluso de medirlo, puesto que se encuentran en uso durante 22 horas diarias, incluso 24 horas cuando la producción está retrasada.

La fixtura es un factor importante ya que las tolerancias son dadas en milésimas, por lo que se deberá fijar un proceso que sea mínimamente afectado por el desgaste de la fixtura durante su vida útil. El experimento se corrió en dos fixturas con tapa, seleccionadas al azar, procurando que una estuviera nueva y la otra con nivel considerado de desgaste.

Diferencia entre cavidades

Otro factor de ruido considerado en el experimento es la diferencia que existe entre las cavidades de una misma fixtura. Se integra al experimento, por considerar que pudiera afectar los resultados en la resistencia a la prueba de jalón, ya que se ha observado que la profundidad de la cavidad es directamente proporcional al nivel de inyección del epoxi, puesto que el gage está calibrado para bajar la misma distancia e inyectar el epoxi en la misma posición, por lo que si la cavidad es más profunda de lo requerido, no alcanzará a depositarlo hasta el fondo, mientras que si la cavidad es menos profunda que el requerimiento, una porción del epóxico quedará fuera de la cavidad. Después de sortear las posiciones de las cavidades, se determinó que para fines del experimento se utilizarán las cavidades 3 y 12.

Es necesario incluir los tres factores anteriores como factores de ruido, ya que de alguna manera pueden influir en resistencia del producto a la prueba de jalón y no sería viable encontrar a que niveles son óptimos, puesto que controlarlos durante el proceso normal sería impráctico y antieconómico, por lo que es mejor encontrar la condición de operación del proceso que sea mínimamente afectada por la vida del epoxi, desgaste de las fixturas y diferencia entre cavidades.

4.2.1.3 IDENTIFICAR LOS FACTORES DE CONTROL Y SUS NIVELES

Los factores controlables son variables de proceso que se pueden fijar en un punto o en un nivel de operación (De la Vara, 2004), los considerados en el experimento son:

-  Cantidad de epoxi
-  Presión de aplicación
-  Ajuste de altura
-  Ventiladores
-  Escalera

Se eligieron estos factores, por ser los que se encuentran involucrados en el proceso de producción, además de ser los que con base en la experiencia, de operadores y supervisores controlan a prueba y error, para cumplir con la especificación mínima de resistencia establecida por la empresa.

1. **Cantidad de epoxi.** Se probó a cuatro niveles, 100, 75, 50 y 25 % de aplicación. Se eligió de esta manera por que había interés en conocer si con menos del 100% de aplicación el producto alcanzaría la resistencia necesaria.

Para variar el porcentaje de aplicación fue necesario modificar las agujas del Shower Head, ya que este viene provisto de cuatro agujas de cada lado, por lo que para el 100% de aplicación se utilizó un Shower Head con las ocho agujas, y conforme era necesario se tapaban agujas de acuerdo al porcentaje requerido, es decir, para el 75% de aplicación se tapó una aguja de cada lado, para el 50% de aplicación se taparon dos aguas por lado y para el 25% de aplicación fue necesario tapar 3 de cada lado del shower Head.

2. **Presión de aplicación.** Este factor se evaluó a dos niveles, el primer nivel es el que normalmente trabajan, en el rango de 30–40 psi, y el segundo nivel 50–60 psi, ya que anteriormente se han probado con buenos resultados.
3. **Ajuste de altura.** El gage que sostiene al Shower Head, puede ajustarse a dos niveles de altura, preestablecidos mediante unos dados. Para finalidad del experimento, el primer nivel es gage alto (con el que trabajan normalmente) y el segundo nivel es gage bajo, en este nivel las agujas del Shower Head quedan más pegadas a la fixtura.
4. **Ventiladores.** Los ventiladores prendidos en la línea de trabajo se consideran como un factor que afecta la resistencia a la prueba de jalón del producto, se argumenta que el aire emitido, enfría el horno y lo que provoca que las piezas no curen correctamente, sin embargo, por las características del trabajo, es necesario para hacer más confortable la jornada a los operadores cercanos al horno. Por lo que se probará este factor a dos niveles: prendidos y apagados.
5. **Escalera.** Por escalera se entiende las temperaturas a que se encuentra las cinco fases por las que pasa el producto dentro del horno. El curado del epoxi se lleva a cabo mediante éste proceso, en el cual la fixtura con el producto y el epoxi crudo, avanza dentro del horno, mediante una banda, hasta llegar a una temperatura mínima, en donde el epoxi ya ha curado.

Para efectos del experimento, el primer nivel se compone de las siguientes temperaturas: 306 °C, 300 °C, 294 °C, 170 °C y 70 °C, este nivel es con el que se trabaja normalmente, sin embargo, se considera que temperaturas más altas darían mejor resultado, por lo que eligió un segundo nivel, en el cual se sube la temperatura 15 °C en cada fase, por lo que queda conformado con las siguientes temperaturas: 321 °C, 315 °C, 309 °C, 185 °C y 85 °C, cabe mencionar que no se aumentó más la temperatura porque, según la experiencia, se podría quemar el epóxico.

El segundo nivel de la escalera fue en general el que registró mayor resistencia en pruebas realizadas con anterioridad, cuando se estaba trabajando con actitud de mejora continua, variando los factores de manera independiente, estas pruebas se llevaron a cabo antes de iniciar con el proyecto actual, por lo que se decidió aprovechar su trabajo como punto de partida, para la aplicación del método Taguchi en la optimización a la prueba de jalón del producto PRISMA.

El experimento final quedó conformado con cinco variables de control, cada una probada a dos niveles, con excepción de la cantidad de epoxi que, como ya se mencionó, se probó a cuatro niveles, y teniendo como factores de ruido la vida del epoxi, el desgaste de las fixturas y la diferencia entre cavidades.

4.2.1.4 DISEÑAR LA MATRIZ DEL EXPERIMENTO Y DEFINIR EL PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE DATOS

Como se mencionó en el punto anterior los factores y niveles considerados en el estudio fueron:

Factores de control	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
A) Cantidad de epoxi	100%	75%	50%	25%
B) Presión de aplicación	30-40 psi	50-60 psi	-----	-----
C) Ajuste de altura	dado alto	dado bajo	-----	-----
D) Ventiladores	prendido	apagado	-----	-----
E) Temperatura	Nivel 1: 321 °C, 315 °C, 309 °C, 185 °C y 85 °C Nivel 2: 306 °C, 300 °C, 294 °C, 170 °C y 70 °C			

Factores de ruido	Nivel 1	Nivel 2
1) Vida del epoxi	Recién salido del refrigerador	2 horas en operación
2) Desgaste de las fixturas	Fixtura nueva	Fixtura desgastada
3) Diferencia entre cavidades	Cavidad 3	Cavidad 12

Para albergar estos factores fue necesaria la utilización de dos Arreglos Ortogonales (AO), un L_8 para el arreglo interno y un L_4 para el arreglo externo.

El AO L_8 consta de ocho ensayos, siete columnas y cada columna a dos niveles, por lo que es necesario modificarlo para poder probar el factor “Cantidad de epoxi” a cuatro niveles.

Número de corridas	Número de columnas						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tabla 7. Arreglo Ortogonal L_8

El arreglo ortogonal L_8 tiene ocho corridas experimentales, con él se pueden estudiar de dos a siete factores en dos niveles cada uno (Tabla 7). Si se estudian siete factores equivale a un diseño factorial fraccionado 2_{III}^{7-4} , si sólo son dos factores es un factorial completo 2^2 con dos réplicas.

Los renglones del arreglo (del 1 al 8), son las combinaciones de los niveles de cada factor de control, las columnas marcadas del 1 al 7 corresponden a los factores considerados en el análisis, así como los números 1 y 2 dentro de la matriz indican los niveles a los que se prueba cada factor.

Se realizó una modificación al arreglo anterior para poder satisfacer los requerimientos del experimento, ya que el factor “llenado del epoxi” se probó a cuatro niveles (A_1 , A_2 , A_3 , A_4) y el AO L_8 originalmente está diseñado para albergar factores a dos niveles.

La modificación se basa en lo que menciona por Montgomery (2001), el número de grados de libertad en una suma de cuadrados es igual al número de términos independientes de dicha suma, es decir, $n-1$, por lo que el L_8 soporta siete factores a dos niveles cada uno, cuenta con siete grados de libertad, uno para cada una de las columnas.

Para el experimento, fue necesario fusionar tres columnas (columnas 1, 2 y 3), ya que cada una soporta un grado de libertad, y de esta manera se obtienen los grados de libertad requeridos, cabe mencionar que se eligieron las primeras tres por ser columnas relacionadas según la matriz triangular para el arreglo L_8 .

Para albergar los factores restantes no fue necesaria ninguna modificación ya que cada uno es probado a dos niveles. En el AO resultante quedó conformado de la siguiente manera:

Columna	Factor						
A	Cantidad de epoxi	Número de corridas	Núm. de columnas				
			A	B	C	D	E
B	Presión de aplicación	1	1	1	1	1	1
		2	1	2	2	2	2
C	Ajuste de altura	3	2	1	1	2	2
		4	2	2	2	1	1
D	Ventiladores	5	3	1	2	1	2
		6	3	2	1	2	1
E	Temperatura	7	4	1	2	2	1
		8	4	2	1	1	2

Tabla 8. Arreglo Ortogonal resultante

Para los factores de ruido fue necesario el AO L_4 , la cual requiere tres grados de libertad, lo que hace posible estudiar tres factores a dos niveles. El arreglo conformado fue el siguiente:

	Número de corridas	Núm. de columnas		
		1	2	3
1) Vida del epoxi	1	1	1	1
2) Desgaste de las fixturas	2	1	2	2
3) Diferencia entre cavidades	3	2	1	2
	4	2	2	1

Tabla 9. Arreglo ortogonal L_4

A continuación (Tabla 10) se muestra la matriz de diseño, resultado de la combinación de la matriz interna L^8 (modificada) y la matriz externa L_4 .

						Arreglo interno 3 2 1				Arreglo externo			
Factor													
Corrida	A	B	C	D	E								
1	1	1	1	1	1								
2	1	2	2	2	2		Y_{ij}						
3	2	1	1	2	2								
4	2	2	2	1	1								
5	3	1	2	1	2								
6	3	2	1	2	1								
7	4	1	2	2	1								
8	4	2	1	1	2								

Tabla 10. Matriz de diseño

La simbología Y_{ij} representa a los valores resultantes al correr el experimento, en cada uno de los cruces entre los niveles de los factores de control y niveles de los factores de ruido, descritos con anterioridad.

4.2.1.5 CONDUCIR EL EXPERIMENTO

Se empezó a correr el experimento teniendo la precaución de cuidar cada uno de los detalles que pudieran afectar el resultado de los experimentos, se realizaron las corridas de acuerdo al orden del arreglo resultante.

Primero se realizaron las corridas que correspondían a la cantidad de epoxi al 100%, posteriormente las de llenado al 75%, 50% y 25%, respectivamente, no fue posible aleatorizar el orden de las corridas, puesto que el llenado de epoxi se realiza mediante un Shower Head, el cual se tuvo que ir modificando para la prueba, es decir, se le fueron tapado las agujas de acuerdo al nivel de llenado requerido, y debido a que este dispositivo es algo costoso por lo que se tiene en cantidades muy limitadas y puesto era necesario destruirlo para correr el experimento, se optó por hacerlo de esta manera.

Una vez realizadas todas las corridas, se aleatorizó completamente el orden en que se realizaron las pruebas de jalón a las piezas, utilizando el mismo equipo de medición y realizadas por el mismo operador, todo lo anterior con la idea de evitar cualquier sesgo.

A continuación (Tabla 11), se muestran los resultados obtenidos para la resistencia a la prueba de jalón del producto de PRISMA I.

						Arreglo interno Arreglo externo			
Factor									
Corrida	A	B	C	D	E				
1	1	1	1	1	1	14.88	6.14	6.63	15.26
2	1	2	2	2	2	13.98	21.05	23.70	17.66
3	2	1	1	2	2	14.56	9.90	4.39	5.97
4	2	2	2	1	1	18.44	14.80	18.59	10.77
5	3	1	2	1	2	16.40	13.12	18.16	10.07
6	3	2	1	2	1	14.40	9.05	14.0	16.63
7	4	1	2	2	1	0.52	0.56	1.20	1.73
8	4	2	1	1	2	5.08	0.93	2.74	0.30

Tabla 11. Datos recopilados para la resistencia a la prueba de jalón

4.2.2 METODOLOGÍA PARA LA ELIMINACIÓN DEL DEFECTO POR COPLANARIDAD

La solución al defecto por coplanaridad se explicará siguiendo los pasos de la metodología DMAMC.

4.2.2.1 DEFINIR EL PROYECTO

El proyecto consiste en la eliminación de uno de los principales defectos que se presentan en la línea PRISMA I, el es defecto por coplanaridad, como se muestra en la Figura 37. **Producto con coplanaridad** Figura 38. **Punto crítico de calidad por coplanaridad**, el cual surge a partir de la introducción del nuevo lente de prisma de Silicón para la elaboración del producto, y debido a que tiende a dilatarse durante el proceso de curado, lo cual provoca que la altura del Led este fuera de la especificación.

Como ya se mencionó PRISMA contribuye con el 74.64% de la Partes Por Millón de defectos de la empresa, con un total de 17234 defectos, presentados de enero a noviembre del 2001. Por lo que el nivel de sigma en la línea es de 3.62

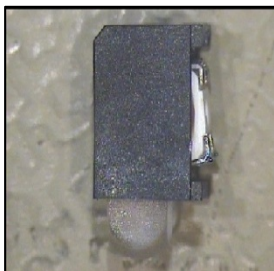


Figura 37. Producto con coplanaridad**Figura 38.** Punto crítico de calidad por coplanaridad

En el siguiente reporte se observa claramente como la línea Prisma representa la mayor cantidad de Partes Por Millón (PPM), siendo el defecto por coplanaridad el más elevado, presentándose por esta causa hasta el mes de noviembre un total de 202,448 defectos.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Acumulado
Producción	1438669	3155157	2966640	1127926	2825119	4404197	2014458	3559935	2868918	3143654	3107636	30612309
Defectos	51223	65522	77760	63882	71183	108171	49320	58354	46963	55551	60306	708235
PPM	35604	20767	26211	56637	25196	24561	24483	16392	16370	17671	19406	23136
Leds doblados o torcidos	13997	13953	3865	4035	3062	10708	4121	2058	1217	2069	413	59498
Ajuste da la maquinaria	2333	2003	2112	2595	1048	4544	2294	1338	4207	1235	4716	28425
Prueba eléctrica	392	1006	1426	1907	2031	3716	1238	1819	1429	775	1747	17486
Polaridad invertida	473	830	1138	1211	1120	2857	1482	1183	1578	1782	1358	15012
Daños cosméticos o físicas	780	779	514	587	1833	2532	1432	775	542	477	1439	11690
Otros	1465	503	343	4295	1589	11008	5729	2898	2693	2997	2712	36232
Total de defectos	19440	19074	9398	14630	10683	35365	16296	10071	11666	9335	12385	168343
PPM	13512	6045	3168	12971	3781	8030	8090	2829	4066	2969	3985	5499
Coplanaridad	9919	18019	19963	15635	27392	30928	14675	15395	11844	16989	21689	202448
Exceso de Epoxy	4187	7303	11900	7291	5045	12258	8825	10136	9222	11198	8412	95777
Defecto del surtidor	4669	4925	8158	4925	3893	4802	0	0	0	58	129	31559
Falta de Epoxy	5701	9460	7690	9914	10747	11041	7223	18352	11185	14652	15088	121053
Apariencia del lente	2741	3410	6537	4575	7286	5280	628	138	595	746	687	32623
Otros	2617	1648	4834	4124	2877	4318	920	2335	835	1310	1616	27434
Total de defectos	29834	44765	59082	46464	57240	68627	32271	46356	33681	44953	47621	510894
PPM	20737	14188	19915	41194	20261	15582	16020	13022	11740	14300	15324	16689
Defecto del surtidor	506	446	6712	652	997	2898	191	57	169	163	51	12842
Material discrepant	0	0	1116	6	59	36	0	0	4	0	0	1221
Mala impresion	790	209	445	1143	1315	175	387	313	793	617	119	6306
Daños cosméticos o físicas	35	128	268	20	85	183	33	230	30	74	4	1090
Otros	606	387	512	793	384	520	56	555	444	250	47	4554
Total de defectos	1937	1170	9053	2614	2840	3812	667	1155	1440	1104	221	26013
PPM	1346	371	3052	2318	1005	866	331	324	502	351	71	850
Defecto del surtidor	11	194	62	58	46	77	12	33	11	10	18	532
Ajuste de la maquinaria	1	5	59	0	57	129	8	22	1	7	13	302
Daños cosméticos o físicas	0	0	38	0	0	0	0	620	0	0	0	658
Material discrepant	0	0	32	90	317	70	64	0	0	108	7	688
Otros	0	314	36	26	0	91	2	97	164	34	41	805
Total de defectos	12	513	227	174	420	367	86	772	176	159	79	2985
PPM	8	163	77	154	149	83	43	217	61	51	25	98

Tabla 12. Partes por Millón (PPM) de defectos de la empresa Dialight de México, S.A. de C.V.

4.2.2.2 MEDIR LA SITUACIÓN ACTUAL

Para medir la situación actual del defecto por coplanaridad, lo primero que se hizo fue analizar el nivel de defectos que se tienen por esta causa.

Como se pudo apreciar en el reporte anterior el mayor número de PPM de defectos los presenta PRISMA, por lo que realizó un Pareto para determinar el porcentaje de estos que se deben a la coplanaridad, defecto que a simple vista se aprecia como el más alto.

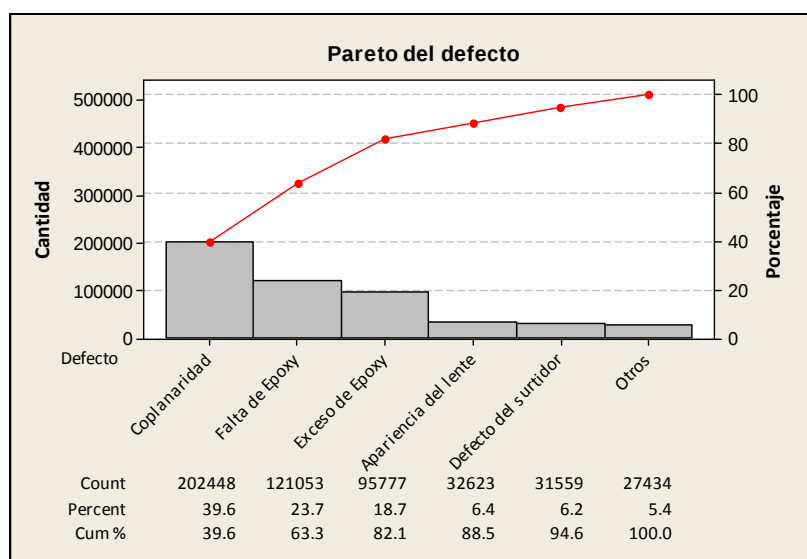


Figura 39. Coplanaridad representa el defecto más alto de PRISMA

4.2.2.3 ANALIZAR LAS CAUSAS RAÍZ

Una vez que tuvo el diagnóstico real por el defecto de coplanaridad, se observó que los defectos presentaban una tendencia, por lo que fue importante realizar un Pareto (Figura 40), para determinar las cavidades de la fixtura en las que se concentra el mayor número de defectos por coplanaridad.

La prueba consistió en un muestreo, en el cual se llevaron a cabo una serie de observaciones aleatorias de 120 fixturas (cada fixtura tiene un total de 25 cavidades), para analizar las cavidades en donde se presenta con mayor frecuencia el defecto por Coplanaridad. De un total de 3000 muestras se presentaron 250 defectos.

En la Tabla 13, se muestra el resultado de la prueba en relación a la posición de la cavidad.

Cavidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
No. de defectos	16	17	25	7	4	4	6	4	5	12	9	2	1	2	0	1	1	1	4	8	10	12	30	20	49

Tabla 13. Total de defectos por cavidad

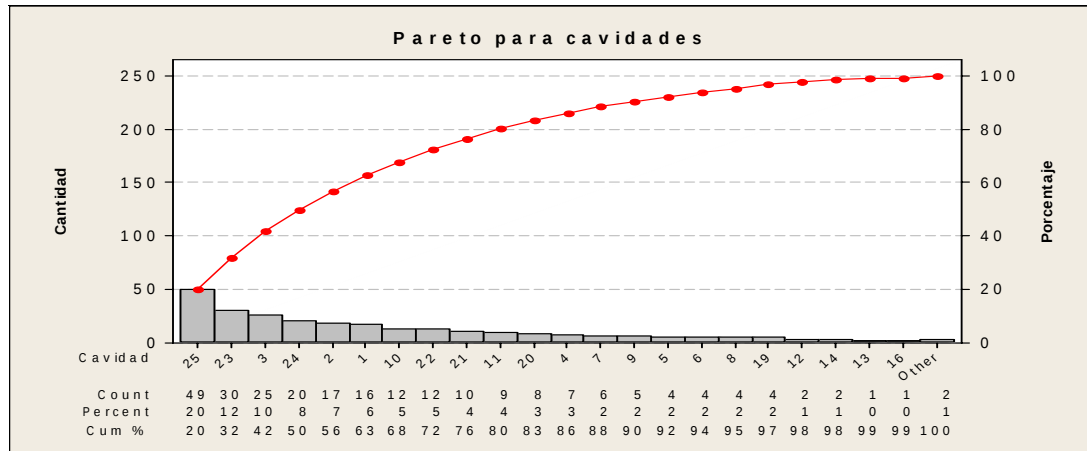


Figura 40. Pareto para determinar las cavidades con mayor número de defectos

Una vez terminada la prueba, se observa que en los extremos de la fixtura se presenta el mayor número de defectos por coplanaridad, por lo que se analizan con detalle tanto la fixtura como la tapa, encontrándose que la placa de la tapa no ejerce la misma presión a lo largo de la fixtura, esto debido a que la placa es presionada con una serie de tornillos para que baje, una vez que fue colocada sobre la fixtura, dichos tornillos no bajan al mismo nivel, además de que cada operador los presiona de manera diferente.

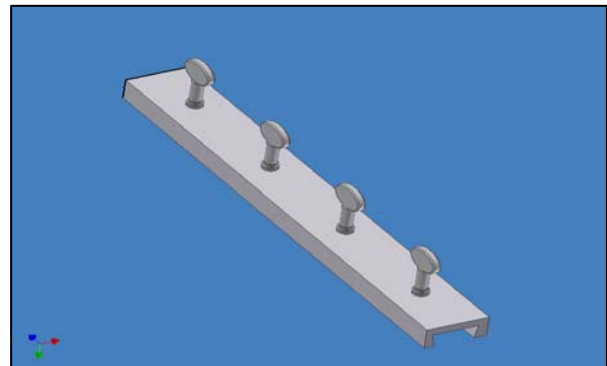


Figura 41. Diseño actual de la tapa de la fixtura

En la Figura 42, se muestra como es que los tornillos presionan a la placa la que a su vez ejerce presión sobre la fixtura, así como el ángulo que se forma en los extremos.



Figura 42. Curvatura de la lámina

4.2.2.4 MEJORAR LAS VARIABLES CRÍTICAS DE CALIDAD (VCC)

Se diseña una nueva tapa, en donde se eliminan los tornillos, la presión ejercida sobre ésta se realiza por medio de siete resortes, los que se encuentran distribuidos a lo largo de la tapa con muy poca separación entre ellos; además con esto se elimina la operación de atornillado, la cual representaba una causa enorme de variación, como ya se mencionó anteriormente, debido a que no todas las personas ejercen la misma presión al estar enroscándolos, además de que la separación entre estos era mayor lo que hacía que en el espacio que hay entre tornillos, así como en los extremos, tuviera menor presión originando coplanaridad por la expansión del lente.

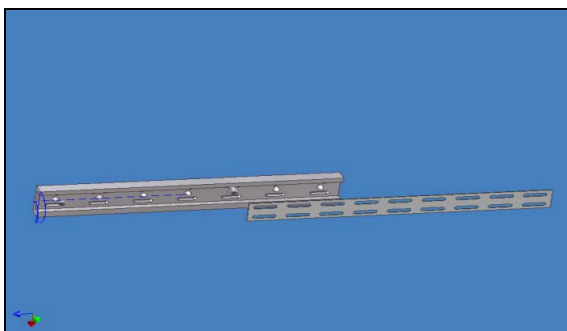


Figura 43. Componente del nuevo diseño de la tapa

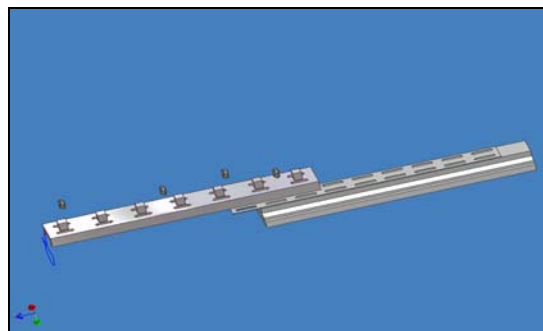


Figura 44. Presión uniforme de la tapa sobre la fixtura

El diseño propuesto esta construido del mismo material (acero inoxidable), mismo grosor de la placa (20 mm), además de estar provisto de una serie de orificios por la parte exterior lo que permite que llegue más calor a los productos que se encuentran en la fixtura, por lo que el curado de las piezas en el horno no representa problema alguno, otro punto importante a considerar es que las variables que intervienen en el proceso afectan de la misma manera en ambas tapas, por lo que el producto no se ve afectado con la nueva tapa.

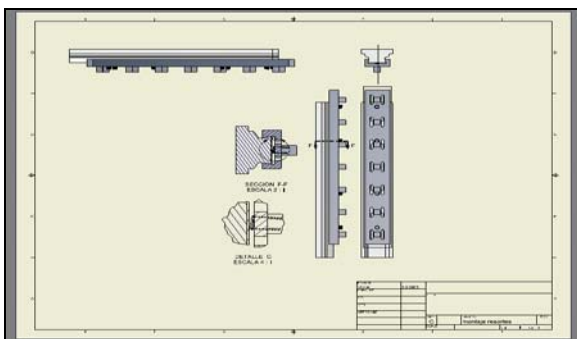


Figura 45. Planos de la nueva tapa

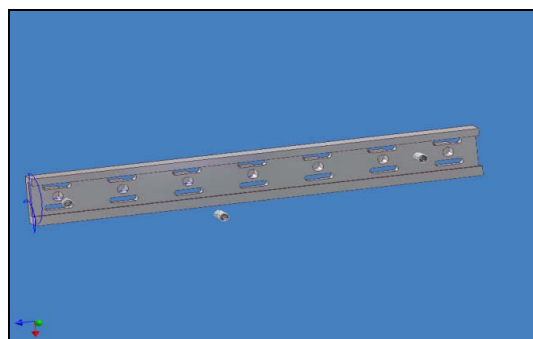


Figura 46. Orificios de la tapa

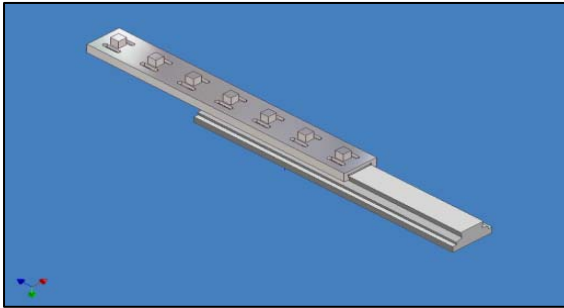


Figura 47. Orificios de la tapa

La Figura 48, muestra el nuevo diseño de la tapa, éste cuenta con siete resortes contenidos dentro de las cavidades de la tapa, ejerciendo así una presión más uniforme sobre la fixtura, eliminando el error de coplanaridad, además de simplificar las operaciones de colocación y retiro de ésta la durante el proceso.



Figura 48. Diseño propuesto

Posteriormente se realiza una comparación de proporciones para determinar se existe diferencia significativa entre la proporción de producto defectuoso utilizando la tapa actual y la tapa propuesta.

4.2.2.5 CONTROLAR PARA MANTENER LA MEJORA

Para llevar un control sobre el producto y determinar como se comporta el proceso con respecto al defecto por coplanaridad, se lleva a cabo la misma prueba (cámara de coplanaridad), puesto que ya se encuentra con la maquinaria necesaria para realizarla. Sin embargo, ya no será necesario tener un operador exclusivo para retirar las piezas defectuosas, por lo que, en caso de que se dé el defecto, este podrá ser retirado por el mismo operador que empaca el producto.

Se propone dar mantenimiento preventivo cada semana a las tapas y fixturas minimizar el daño causado por el desgaste normal del material de la tapa y fixtura.



CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo muestra el análisis de resultados obtenidos mediante la metodología DMAMC para optimizar la resistencia a la prueba de jalón, así como los obtenidos mediante el desarrollo de la metodología DMAMC para disminuir el defecto por coplanaridad, así como las correspondientes pruebas de validación y proyección de resultados.

5.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 AUMENTO A LA RESISTENCIA DE LA PRUEBA DE JALÓN

5.1.1 ANALIZAR LOS DATOS Y DETERMINAR LOS NIVELES ÓPTIMOS

El siguiente paso del experimento consiste en analizar los datos obtenidos en las corridas, y contenidos en la matriz de diseño, formada por la combinación de la matriz interna L_8 (modificada) y la matriz externa L_4 .

Es necesario evaluar la variación de los datos, para poder determinar que factores y en que niveles deberán ser fijados, para conformar el modelo de optimización. La variación es evaluada respecto a la media de los datos y al estadístico **señal a ruido**, el cual mide el desempeño de la robustez en cada combinación de los factores de control (De la vara, 2004).

El estudio tiene como objetivo maximizar la resistencia a la prueba de jalón del producto de la línea PRISMA I, por lo que la variable de respuesta (característica de calidad), es del tipo “Lo mayor es lo mejor”, y le corresponde la siguiente transformación de señal a ruido:

$$n dB = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$$

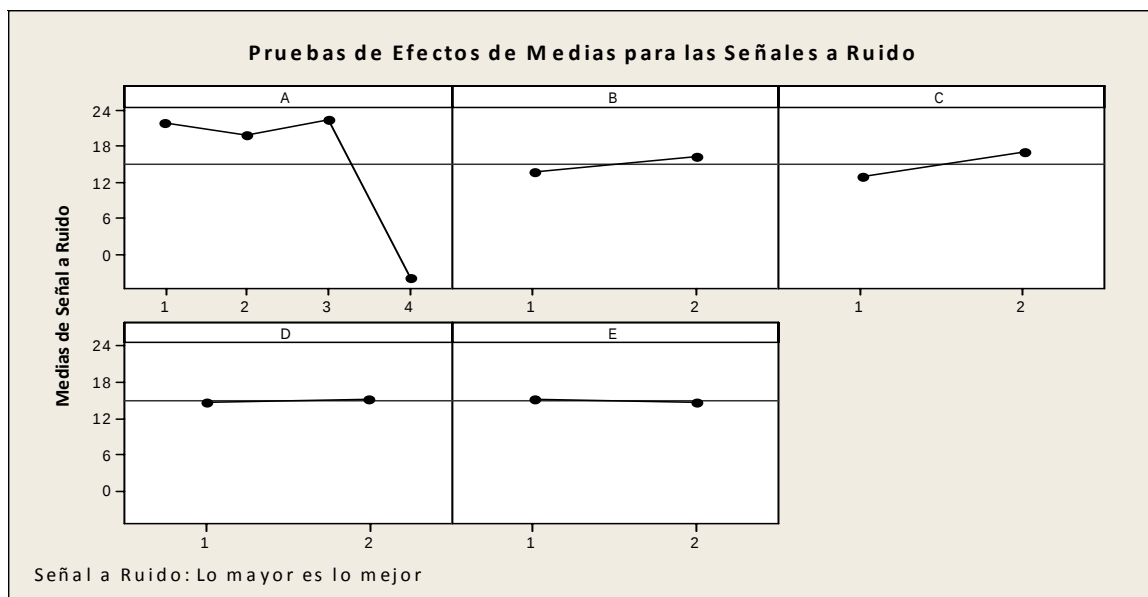
La matriz interna quedó conformada por los siguientes factores de control: **A.** Cantidad de Epoxi, **B.** Presión de aplicación, **C.** Altura del Shower, **D.** Escalera y **E.** Ventiladores.

Como factores de ruido, contenidos en la matriz externa, se tiene: **1.** Vida del epoxi, **2.** Desgaste de las fixtura y **3.** Diferencia entre cavidades.

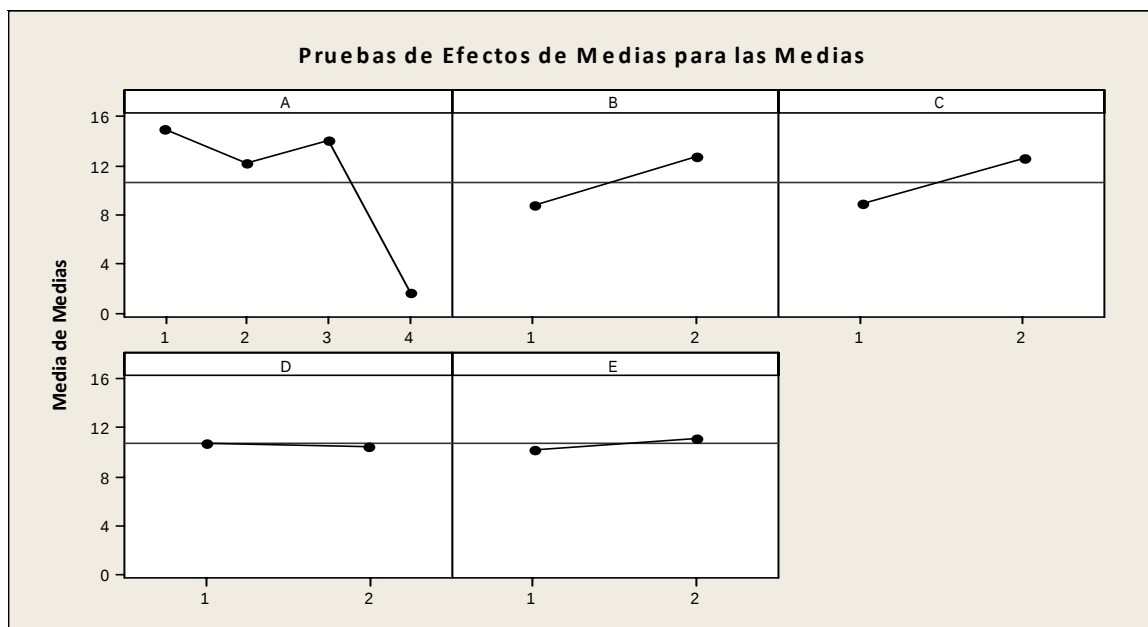
Tanto factores de ruido como de control se probaron a dos niveles, con excepción de la cantidad de epoxi que se probó a cuatro niveles: 100%, 75%, 50% y 25% de aplicación.

Por medio del cálculo del efecto de los factores en cada uno de sus niveles, se tiene como deducción preliminar que la mejor combinación de los factores de control es: $A_3 B_2 C_2 D_2 E_1$ para la razón señal a ruido y $A_1 B_2 C_2 D_1 E_2$ para los promedios.

Las gráficas 3 y 4, ayudan a visualizar la combinación óptima de los factores de control.



Gráfica 3. Resultados para la resistencia a la prueba de Jalón utilizando las S/R.



Gráfica 4. Resultados para la resistencia a la prueba de Jalón utilizando las medias.

Una vez que se tienen los efectos de cada factor en cada uno de sus niveles, es necesario separar la variación debido a sus fuentes, ya sea factores (efectos principales), ruido, variación no explicada, etc.

Por fuente de variación se conoce a aquellos factores que producen un efecto sobre la variable que se desea investigar (Pérez Muñiz, 2001), para lo cual se realiza un Análisis de varianza de los efectos de los factores sobre la señal a ruido y sobre los promedios.

5.1.3 ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS ARROJADOS EN EL EXPERIMENTO

5.1.3.1 ANOVA PARA LOS DATOS TRASFORMADOS

Análisis de varianza de los datos transformados a Razón Señal a Ruido “*Los mayor es lo mejor*”.

FACTORES	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	SUMA DE CUADRADOS PUROS	F	P
A	3	957.69	319.23	957.69	-----	-----
B	1	15.50	15.50	15.50	-----	-----
C	1	33.06	33.06	33.06	-----	-----
D	1	0.15	0.15	0.15	-----	-----
E	1	0.33	0.33	0.33	-----	-----
ERROR	0	-----	-----	-----		-----
TOTAL	7	1006.73				

Tabla 17. Análisis de varianza para los datos de la S/R de los factores principales

** El denominador de la prueba F es cero.

Análisis de varianza de los datos transformados agrupando las sumas de cuadrados de los factores D y E a la suma de cuadrados del Error.

FACTORES	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	SUMA DE CUADRADOS PUROS	F	P	% P
A	3	957.69	319.23	956.97	1329.05	0.001	95.06
B	1	15.50	15.50	15.26	64.52	0.015	1.51
C	1	33.06	33.06	32.82	137.65	0.007	3.26
ERROR	2	0.48	0.24	1.68	-----	-----	0.17
TOTAL	7	1006.73					

Tabla 18. Análisis de varianza para los datos de la S/R, agrupando la SC de los factores D y E a la SC del Error

F tabulada		
FACTORES	Nivel de confianza	
	99%	95%
A	99.17	19.6
B	98.5	18.51
C	98.5	18.51

Contribución de los factores a la variación total:

SC = 99.95% SCP = 99.83%

S = 0.490095

5.1.3.2 ANOVA PARA LOS DATOS SIN TRANSFORMAR

Análisis de varianza para los datos sin transformar (normales).

FACTORES	GRADOS DE LIBRETADE	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	SUMA DE CUADRADOS PUROS	F	P	% P
A	3	903.16	301.05	863.71	22.89	0.000	59.15
B	1	122.58	122.58	109.43	9.32	0.005	7.49
C	1	112.09	112.09	98.94	8.52	0.008	6.77
D	1	0.28	0.28	-----	0.02	0.885	- 0.45
E	1	6.49	6.49	-----	0.49	0.849	- 0.88
ERROR	24	315.61	13.15	407.66	-----	-----	27.92
TOTAL	31	1460.21					

Tabla 19. Análisis de varianza para los datos normales

F tabulada		
FACTORES	Nivel de confianza	
	99%	95%
A	4.72	3.01
B	7.82	4.26
C	7.82	4.26
*D	7.82	4.26
*E	7.82	4.26

Contribución de los factores a la variación total:

$$SC = 78.39\% \quad SCP = 72.08\%$$

$$S = 3.62636$$

* No existe diferencia estadística significativa entre los valores medios de los niveles de los factores D y E.

Análisis de varianza para los datos sin transformar agrupando las sumas de cuadrados de los factores D y E a la suma de cuadrados del Error aleatorio.

FACTORES	GRADOS DE LIBRETADE	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	SUMA DE CUADRADOS PUROS	F	P	% P
A	3	903.16	301.05	865.96	24.28	0.000	59.30
B	1	122.58	122.58	110.18	9.89	0.004	7.55
C	1	112.09	112.09	99.69	9.04	0.006	6.83
ERROR	26	322.38	12.40	384.38	-----	-----	26.32
TOTAL	31	1460.21					

Tabla 20. Análisis de varianza para los datos normales, agrupando la SC de los factores D y E a la SC del Error

F tabulada		
FACTORES	Nivel de confianza	
	99%	95%
A	4.64	2.98
B	7.72	4.23
C	7.72	4.23

Contribución de los factores a la variación total:

$$SC = 77.92\% \quad SCP = 73.68\%$$

$$S = 3.52128$$

Mediante el análisis de varianza para la razón señal a ruido y los datos sin transformar se observa que, al comparar la **F tabulada** con los valores de la columna **F** el valor calculado es mayor para los primeros tres factores, lo cual confirma que existe diferencia estadística significativa entre los valores medios de los niveles de los factores: Cantidad de epóxico (A), presión de aplicación (B) y altura del dado (C), por lo que se les considera como la fuente de variación que influye sobre a variable de respuesta. Los factores D y E (ventiladores y temperatura) no son significativos por lo que se deben trabajar como normalmente se hace o como resulte más económico para la empresa.

Al demostrar estadísticamente, con niveles de confianza del 95 y 99%, que los factores D y E no presentan efectos significativos, éstos son agrupados al error aleatorio y se realiza un análisis de varianza (Tabla 20), en el cual se observa que el factor A “Cantidad de epoxi”, contribuye en un 59.30 % a la variación total.

Debido a la gran contribución que presenta el factor A en la variación, es importante fijarlo al nivel de óptimo de operación, para lo cual se revisa la Tabla 16: **respuestas de medias para la resistencia a la prueba de jalón**, de la cual se observan que el epóxico se puede trabajar hasta con un 50% de aplicación, sin embargo se recomienda fijarlo al primer nivel (100%), por ser el que presenta la media de resistencia más alta, además de lo complicado e impráctico que resulta modificar el Shower Head para disminuir la cantidad de epóxico a depositar en las piezas.

La presión de aplicación (B) contribuye en un 7.55% a la variación y debe ser fijada en el segundo nivel: rango de 50 – 60 psi; colocar el dado sobre el que se encuentra el dispensador (Shower Head) del epóxico en la altura más baja, contribuyen a mejorar la respuesta de la resistencia a la prueba de jalón del producto, por representar el 6.83% de la variación.

En conclusión, la combinación de factores para obtener la mejor respuesta en la resistencia a la prueba de jalón, es la siguiente:

A₁) Cantidad de Epoxi: 100% B₂) Presión: 50 – 60 psi C₂) Ajuste de Altura: baja

5.1.4 PREDECIR EL FUNCIONAMIENTO CON LOS NIVELES ÓPTIMOS

Para la elaboración del pronóstico del valor esperado de respuesta, se consideran únicamente los efectos principales que afectan a la variable de salida, es decir, el set up propuesto del proceso:

$$A_1 \ B_2 \ C_2.$$

Ecuación de predicción para la resistencia a la prueba de jalón, utilizando el arreglo resultante:

$$\hat{Y} = \bar{y} + (\bar{A}_1 - \bar{y}) + (\bar{B}_2 - \bar{y}) + (\bar{C}_2 - \bar{y})$$

en donde :

$\hat{Y}$ = valor esperado de respuesta

$\bar{y}$ = media general del experimento

$\bar{A}_1$ = componente medio del llenado de epóxico al 100%

$\bar{B}_2$ = componente medio de la presión de aplicación en el rango de 50 – 60 psi

$\bar{C}_2$ = componente medio de la altura del gage en dado bajo

$$\hat{Y} = 10.676 + (14.91 - 10.676) + (12.633 - 10.676) + (12.547 - 10.676)$$

$\hat{Y} = 18.741$ libras estimadas de resistencia a la prueba de jalón del producto⁸, utilizando el modelo optimizado.

Resultados arrojados por MINITAB 14

Para la predicción del valor óptimo

S/R	Media	Desv. estándar
25.1649	18.7413	4.20404

Tabla 21. Predicción del valor óptimo

Factores y niveles de predicción

Factor	Nivel
A	1
B	2
C	2

Tabla 22. Factores y niveles de predicción

⁸ Los valores medios de cada componente (factor), así como la media general del experimento se tomaron de la **tabla 16: Respuesta para la resistencia a la prueba de jalón (Media)**, del presente documento, capítulo 5, página 78.

5.1. 5 INTERVALO DE CONFIANZA PARA EL PRONÓSTICO

El intervalo de confianza de la predicción se realizó considerando un nivel de confianza del 95%, y utilizando los datos concentrados en la tabla 20.

Para el cálculo de intervalos de confianza para la predicción, se tiene la siguiente expresión:

$$IC = \pm \sqrt{[(F)(C)(G)]/T}$$

donde:

F = Valor tabulado para: $\alpha = 0.05$, $n = 1$, $V = GL$ para el error

C = Cuadrado medio del error

G = GL de la estimación ($\sum$ de los GL de los componentes del pronóstico, incluyendo 1 correspondiente a la media general)

T = Número total de lecturas experimentales

$$IC = \pm \sqrt{[(4.23)(12.40)(6)]/(32)}$$

$$IC = \pm 3.136$$

(95%) Intervalo de confianza de la resistencia a la prueba de jalón

$$\mu = 18.741 \pm 3.136$$

Media	Desviación estándar	Intervalo de Confianza (95%)
18.7410	4.2040	(15.7336, 21.7484)

Tabla 23. Intervalo de confianza para la predicción

Una vez determinado el intervalo de confianza de la predicción, se realiza la prueba de validación, la cual consistió en realizar una prueba T-pareada, en la que se compararon las medias de la resistencia a la prueba de jalón, de los productos elaborados utilizando el set up actual (prueba y error) y los productos elaborados utilizando el set up propuesto (Modelo de optimización).

Si el resultados de la prueba de validación quedan contenido dentro del intervalo de confianza del pronóstico del modelo: **LI = 15.733**, **$\mu = 18.741$** , **LS = 21.748**, o **excede** de éste en la media de la resistencia, entonces el modelo se considera adecuado y puede ser llevado al sistema de producción real.

5.1.5 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para validar el modelo propuesto se realizó una corrida confirmatoria. La prueba consistió en tomar cuatro fixtura (con 25 piezas cada una) con cada uno de los set up (actual y propuesto). Por lo que se tuvieron un total de 100 muestras con cada uno de los set up y se realizó una comparación T-pareada para comprobar que la media de la resistencia a la prueba de jalón del set up propuesto, es mejor estadísticamente con un nivel de confianza del 95%.

Cabe señalar que se buscó que las condiciones afectaran de manera similar en cada uno de los set up, por lo que las pruebas de jalón se hicieron bloqueando las fixturas, esto con el fin de que ningún set up se viera beneficiado al tocarle las mejores fixturas, dentro de los bloques se aleatorizaron las mediciones evitando así, introducir ruido al experimento.

Una vez obtenidas las mediciones (Anexo 3), se introdujeron al software MINITAB 14, el cual presentó la siguiente información:

Set up	N	Media	Desv. Estándar
Propuesto	100	15.8458	3.4291
Actual	100	10.8764	3.3808

Tabla 24. Resultado de la prueba T-pareada para los set up

Como se aprecia en el resultado anterior la media de la resistencia a la prueba de jalón queda comprendida en el intervalo de confianza de la predicción, lo que se confirma que el modelo resulta adecuado.

Resultados arrojados por MINITAB 14

Prueba T-pareada

Diferencia= Media (Set up propuesto) – Media (Set up actual)

Diferencia estimada: 4.96940

(95%) Intervalo de confianza para la diferencia: (5.57638, 4.36242)

P-value = 0.000

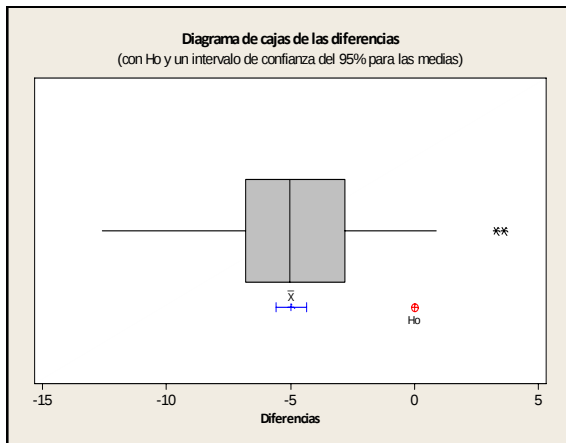
Hipótesis estadística para la diferencia de medias:

$$H_0 : \mu_d = 0 \quad \text{Se rechaza}$$

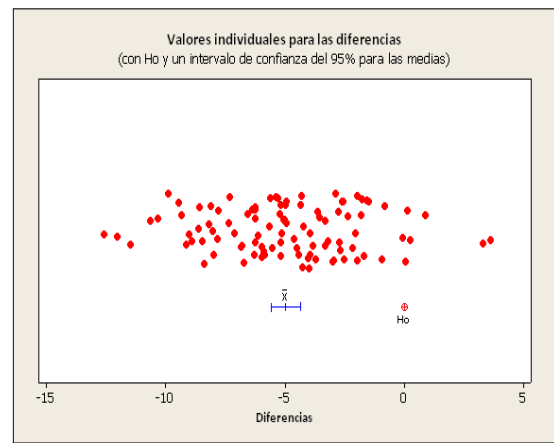
$$H_1 : \mu_d \neq 0$$

Estadísticamente, no existe evidencia a favor de la hipótesis nula, por lo que se concluye que la diferencia de medias es diferente de cero (Rechazando H_0). La resistencia promedio a la prueba de jalón cambia dependiendo el set up que se este utilizando en el proceso.

Los resultados anteriores se muestran de manera gráfica a continuación:

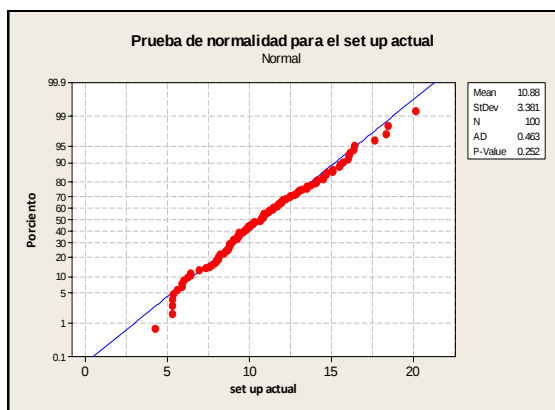


Gráfica 5. Diagrama de cajas para la diferencia de Medias

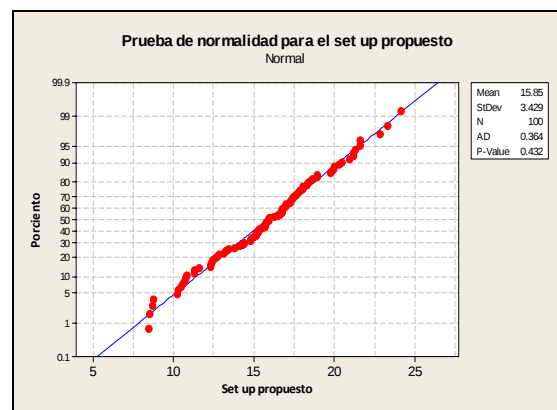


Gráfica 6. Diagrama de valores individuales

En las Gráfica 5 y 6, se aprecia en donde los valores individuales y la caja de las diferencias de medias, se encuentran movidos del valor nominal cero, dejando ver que el set up propuesto supera considerablemente al actual, en la media de la resistencia a la prueba de jalón del producto, sin embargo el ancho de la caja evidencia que la variación no logro reducirse.



Gráfica 7. Prueba de normalidad Set up actual



Gráfica 8. Prueba de normalidad Set up propuesto

Las pruebas de normalidad muestran que los datos recabados se apegan a la distribución normal.

5.2 DISMINUCIÓN DEL DEFECTO POR COPLANARIDAD

Para probar el nuevo diseño de la tapa se llevó a cabo una prueba de comparación de dos proporciones de defectos por coplanaridad.

Dicha prueba consistió en tomar una muestra, utilizando el prototipo de la nueva tapa para la fixtura, del producto de 40 fixturas, es decir, 1000 piezas. Del total de la muestra sólo 12 de ellas presentaron el defecto por Coplanaridad, lo cual representa una proporción del 1.2% de defecto.

Esta proporción se compara con la primera muestra que se tomó, utilizando la tapa normal (la que tiene tornillos), en donde de un total de 3000 piezas, 250 presentaron coplanaridad, teniendo como resultado una proporción de 8.33% de piezas no conformes.

5.2.1 PRUEBA DE COMPARACIÓN DE DOS PROPORCIONES

Para conocer si las proporciones de defectos de ambas tapas eran iguales, se aplicó una prueba de comparación para dos proporciones, utilizando el software MINITAB 14, en donde:

Prueba 1: corresponde a los datos de la prueba realizada con la tapa que utiliza tornillos

Prueba 2: corresponde a los datos de la prueba realizada con el diseño propuesto de la tapa

X: representa la cantidad de productos defectuosos de cada una de las muestras

N: representa el tamaño de muestra para cada prueba

Resultados arrojados por MINITAB 14

Prueba e Intervalos de Confianza para dos proporciones

Prueba	X	N	Prueba P
1	250	3000	0.083333
2	12	1000	0.012000

Tabla 25. Resultados de la prueba de comparación de dos proporciones

Diferencia = $p(1) - p(2)$

Estimación para diferencias: 0.0713333

95% IC para diferencia: (0.0593601, 0.0833066)

Prueba para diferencias= 0 (vs not = 0): Z = 11.68 P-Value = 0.000

Para la prueba anterior, se plantearon las siguientes hipótesis estadísticas:

$$H_0 : p(1) = p(2)$$

$$H_1 : p(1) \neq p(2)$$

Se rechaza la hipótesis nula

Por lo que se concluye que estadísticamente con un nivel de confianza del 95%, las proporciones de defectos son diferentes.

5.2.1 NIVEL DE SIGMA

Tomando como referencia las proporciones de producto con coplanaridad, de tipo de tapa, se realizó una proyección del nivel de sigma en el que se encuentra operando PRISMA.

● PARA LA PRIMERA TAPA (TORNILLOS)

Se tiene un total de producto defectuoso de 250 piezas de una muestra de 3000, por lo que se proyecta que de cada 1'000,000 de piezas producidas se tendrán 83,333 defectos, lo cual indica que la línea prisma, antes de la nueva tapa, se encontraba operando a un nivel de sigma de 2.8830 con un rendimiento (Yield) de 91.66%.

● NUEVO DISEÑO DE TAPA

Con el diseño nuevo de la tapa fue necesario hacer también la proyección del nivel de sigma de PRISMA, con respecto al defecto por coplanaridad. De la muestra de 1000 piezas se obtuvieron 12 defectos, por lo que se infiere que de 1'000,000 de piezas producidas se tendrán 12,000 piezas con defecto. A esta cantidad de defecto le corresponde un nivel de sigma de 3.7639, por lo que el rendimiento (Yield) de la línea será 98.8%.

Este diseño dará como resultado una disminución del 85% de los defectos originados por coplanaridad; cabe mencionar que la nueva tapa ya se encuentra operando en la línea, y que su introducción se realiza por etapas, es decir, no se cambiaron todas al mismo tiempo por cuestiones de maquinado.

5.2.2 BENEFICIOS ADICIONALES

Además de la gran reducción del desperdicio de producto originado por coplanaridad, la tapa tiene como beneficio adicional la simplificación de dos de las operaciones del proceso, retiro y colocación de tapa, ya que el nuevo diseño no requiere de tornillos. Estas operaciones son altamente repetitivas y de ciclos cortos, por lo que le puede causar daños físicos al operador.

Basándose en el estudio *“A biomechanical and psychophysical examination of fastener initiations in automotive assembly”*, International Journal of Industrial Ergonomics 36 (2006) 837–845. Se considera la operación definida como inicio de sujetador manual (FI) es un procedimiento altamente repetitivo y de ciclo cortos, dentro de la industrial automotriz, el inicio de sujetador manual (FI) requiere el uso de la mano como herramienta para colocar y ajustar el sujetador con por lo menos un par de vueltas.

Existen diversas razones por la que no se utilizan herramientas para esas tareas, como localización de la parte, tamaño del sujetador, precisión, tamaño del tornillo, torque, además de que los fabricantes de automóviles prefieren que estas operaciones sean realizadas por los trabajadores, utilizando manos y dedos para “Asegurar la calidad”, pues consideran que son actividades sencillas que no requieren el uso de herramientas costosas que pronto se conviertan en chatarra.

Los FI son procedimientos comunes y fácilmente identificables por ser un trabajo realizado con las extremidades, en donde el movimiento es producido por los músculos de los dedos, mano, muñeca y antebrazo, algunos ejemplos de FI son colocar tuerca, aflojar o apretar tornillos, etc.

La tarea puede ser realizada utilizando posturas incómodas y ocurrir cientos de veces por turno, extrapolada a miles de repeticiones por semana de trabajo. Por lo cual, ha sido identificada como potencial causa de lesiones. Con el fin de reducir el riesgo asociados con tareas de fijación, es necesario que exista una mejor comprensión de los niveles de exposición aceptables.

Como ya se ha mencionado, para reducir el defecto por coplanaridad, fue necesaria la introducción de una tapa para la fixtura, por el diseño se agregaron dos operaciones extras al proceso de producción, la primera consiste en colocar la tapa a la fixtura y posteriormente girar con los dedos cuatro tornillos, con un promedio de 4 vueltas cada uno, aplicando presión ligera. La

siguiente consiste en retirar la tapa de la fixtura, aflojando los cuatro tornillos, mediante un promedio de 4 giros de los dedos, además de tener la característica de que la tapa debe retirarse cuando aun se encuentra caliente, puesto que acaba de salir del horno de curado.

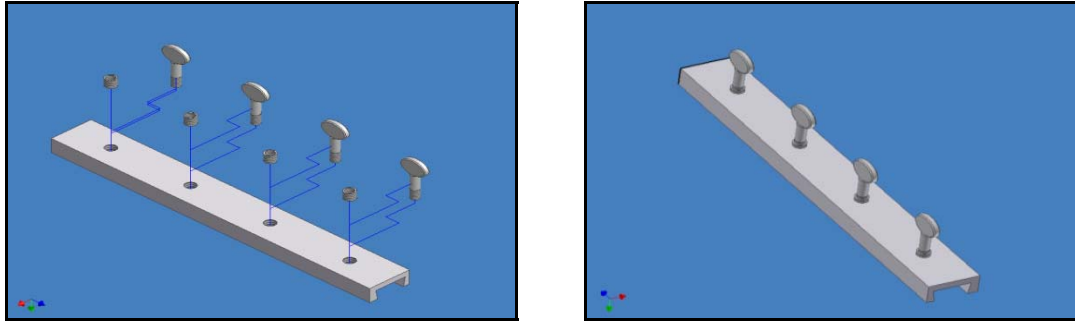


Figura 49. Tapa con tornillos para fixtura

Éstas operaciones se llevan a cabo por diferentes personas, que colocan y retiran en promedio 120 tapas de fixtura por hora, lo que da un aproximado de 1920 giros de dedos por hora por cada operador, lo que se traduce en un [índice de frecuencia de 32 giros por minuto. Por las características de trabajo las operaciones de colocación y retiro de la tapa, se consideran FI.

La investigación científica en las capacidades humanas, desarrolla normas para el establecimiento de Valores Límites de tolerancias (TLV), los cuales ayudan a limitar el riesgo potencial de lesiones y se encuentran basados en la determinación de la frecuencia máxima aceptable (MAFS) en éste tipo de operaciones.

El estudio referenciado se realizó en Ford Motor Company arrojando el siguiente resultado:

Al determinar el número promedio de esfuerzos por FI, se constató que el índice de frecuencia (IF) aceptable aprobado los giros recomendados por minuto oscilan entre 5.8 ± 1.47 (giro de muñeca, grandes sujetadores) a 7.67 ± 1.48 (giros de dedos, componentes pequeños), para reducir la rotación por esfuerzo y evitar trastornos musculoesqueléticos.

La colocación y el retiro de la tapa de fixtura exceden los índices de frecuencia aceptables recomendados, lo que incrementa el riesgo de lesiones, accidentes y rotación en la línea.

Con el nuevo diseño de la tapa, además de reducir el número de defectos por coplanaridad, se eliminaron los tornillos, como consecuencia de esto, se simplificaron las operaciones de colocación y retiro de la tapa, ya que sólo es necesario deslizar la tapa la sobre la fixtura, y la lámina que limita la expansión del lente de silicón para evitar la coplanaridad, será presionada mediante unos resortes adaptados a la tapa, de tal manera que los tornillos ya no son necesarios.

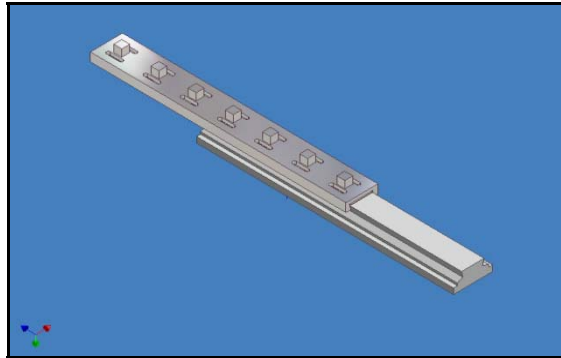


Figura 50. Nuevo diseño de tapa de fixtura

Con esto se evita producto defectuoso por deformación en la lámina provocada por los tornillos y se previenen posibles lesiones derivadas de giros frecuentes de dedos y muñeca. Como consecuencia de la simplificación del trabajo, solo se requerirá de una persona que realice ambas operaciones.



Figura 51. Prototipo de la tapa propuesta



CAPÍTULO VI



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones del trabajo de investigación y se sugieren algunas recomendaciones, tomando como base los datos recabados en el desarrollo de la experimentación.

Se dejan algunas líneas de investigación, para que se pueda seguir trabajando con el proceso y se logre mejorar aún más

6.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES PARA LA RESISTENCIA A LA PRUEBA DE JALÓN

Una parte importante del estudio se centró en la optimización a la resistencia de la prueba de jalón del producto de PRISMA I, por ser una característica crítica de calidad para Nokia, cliente de Dialight que representa el 40% de las ventas de la empresa y con el que se tienen un contrato anual de \$5'000,000.00 de dólares.

La metodología Taguchi permitió seleccionar la mejor combinación de los niveles de los factores de control con el objeto de aumentar la característica de calidad antes mencionada que corresponde a la transformación de señal a ruido de Taguchi “Lo mayor es lo mejor”. La respuesta obtenida es mínimamente afectada por los siguientes factores de ruido: vida del epoxi, desgaste de las fixtura y diferencia entre cavidades.

Los factores de control que resultaron significativos son:

- Factor A “Cantidad de epoxi”, contribuye en un 59.30 % a la variación total, se recomienda fijarlo al primer nivel (100% de aplicación).
- Factor B “La presión de aplicación”, contribuye en un 7.55% a la variación y es recomendable fijarla en el segundo nivel: rango de 50 – 60 psi.
- Factor C “Dado en la altura más baja”, contribuyen a mejorar la respuesta de la resistencia a la prueba de jalón del producto, por representar el 6.83% de la variación.

Los factores D y E (ventiladores y temperatura) no son estadísticamente significativos en la contribución a la variación total, lo cual que permite relajar las tolerancias al trabajarlos como normalmente se hace o como resulte más económico para la empresa.

Los niveles de cada factor se eligieron por presentar el promedio más alto de resistencia a la prueba de jalón, en el análisis de medias. De tal manera que, la combinación óptima de factores y niveles para aumentar la resistencia a la prueba de jalón, es el siguiente:

A₁) Cantidad de Epoxi: 100% B₂) Presión: 50 – 60 psi C₂) Ajuste de Altura: baja

Utilizando el modelo optimizado, se predijo y la respuesta a 18.741 libras estimadas de resistencia a la prueba de jalón del producto y el intervalo de confianza del 95%, quedó integrado de la siguiente manera: $\mu = 18.741 \pm 3.136$.

Mediante una prueba T- pareada, se validó el modelo de optimización propuesto, arrojando como resultado una resistencia media de 15.8458 libras, mismo que se encuentra contenido dentro del intervalo de confianza de la predicción, además el cálculo del coeficiente de determinación ajustada dio como resultado que el modelo obtenido explica el 73.68% de la variabilidad de los datos, ambas pruebas confirman que el modelo resulta adecuado y puede ser llevado al sistema de producción real.

Los resultados estadísticos, muestran que mediante la adopción en la línea del modelo propuesto, la resistencia a la prueba de jalón aumentó en un 45.68 %, según la corrida de validación. Con esto se prueba la segunda hipótesis específica de la investigación, afirmando que la metodología Taguchi es adecuada para aumentar la resistencia a la prueba de jalón del producto de la línea Prisma I.

Es importante mencionar que en el diseño experimental llevado a cabo no se logró reducir la desviación estándar de las muestra, lo cual indica se mantienen constante las variaciones entre los datos. Dando respuesta a la primera hipótesis específica planteada, se considera que el modelo obtenido mediante la metodología Taguchi no disminuyó la variación de la resistencia a la prueba de jalón del producto de la línea Prisma I.

Por otra parte, mediante la aplicación de Taguchi en PRISMA, se lograron los siguientes objetivos: Identificar y analizar los factores que provocan variación en la resistencia a la prueba de jalón, establecer un proceso que optimice la resistencia a la prueba de jalón.

Mediante el conocimiento y la estabilización de los factores significativos del proceso se previenen problemas derivados de la falta de control, como son las pérdidas de tiempo que se traducen en turnos extras para lograr cumplir con el pedido, excesivo retrabajo y desperdicio de material prima, además de conservar el contrato con Nokia al garantizarle productos que satisfagan sus necesidades, lo cual evita grandes pérdidas económicas a la empresa.

Finalmente, se demostró que el empleo de la metodología Taguchi, es efectiva como estrategia de trabajo y que a diferencia de su metodología actualmente utilizada en la empresa a prueba y error, se obtienen resultados válidos en reducidas corridas experimentales y en corto tiempo, estas condiciones tienen un impacto significativo en los costos de los ensayos experimentales.

6.2 CONCLUSIONES PARA LA DISMINUCIÓN DEL DEFECTO POR COPLANARIDAD

La línea PRISMA contribuye con el 72.13% de las piezas defectuosas que se generan en la empresa, siendo Coplanaridad el defecto que se presenta con mayor frecuencia y que causa mayor cantidad de quejas y retornos por parte del cliente.

Para una encontrar la solución adecuada el defecto fue analizado y reducido mediante la metodología de seis sigma DMAMC, encontrando el factor que lo provoca; siendo éste la tapa de la fixtura, por lo cual se propone un nuevo diseño de la tapa, en el que por medio de resortes se aplica presión uniforme a lo largo de la fixtura, eliminando así el uso de tornillos y reduciendo considerablemente el defecto por coplanaridad.

Para tener una idea más clara de la aportación en cuanto a niveles de calidad, se realizaron proyecciones del nivel de sigma de la línea, basados en el número de defectos por coplanaridad; el primer estudio se realizó utilizando la tapa con tornillos, obteniendo como resultado que la línea operaba en un nivel de sigma de 2.8830, lo que representa un rendimiento de 91.66%.

Con la incursión de la nueva tapa a la línea, se realiza la correspondiente proyección en nivel de calidad, arrojando como resultado un nivel de sigma de 3.7639, por lo que el rendimiento (Yield) de la línea aumenta a 98.8%.

La implementación en línea del nuevo diseño de la tapa representa una reducción del 85% en productos defectuosos debido a coplanaridad, lo que confirma la hipótesis específica 4: el defecto por Coplanaridad se disminuirá con el nuevo diseño de la tapa, al aplicar presión uniforme a lo largo de la fixtura.

Este diseño tiene como ventaja adicional, que el operador no requiere giros de dedos al colocar o retirar la tapa, por lo que se considera que esto reducirá la rotación por esfuerzo y se evitarán los trastornos musculoesqueléticos en dedos y muñeca. Ya que el mecanismo de la tapa actual requiere un índice de frecuencia de 32 giros por minuto, lo que excede a los IF aceptables recomendados en giros por minuto, que oscilan de 5.8 ± 1.47 (giro de muñeca, grandes sujetadores) a 7.67 ± 1.48 (giros de dedos, componentes pequeños).

La metodología DMAMC aplicada en la disminución del defecto por coplanaridad alcanzó los siguientes objetivos: definir la causa que lo ocasiona, diseñar una tapa para fixtura que reduzca el defecto y, simplifique su colocación y retiro.

Mediante Taguchi y DMAMC la investigación alcanza su objetivo general, el cual consistía en maximizar la resistencia a la prueba de jalón y disminuir el número de defectos por coplanaridad del producto de la línea PRISMA I.

Estas metodologías son necesarias en las empresas para lograr un alto nivel de competitividad, reducir costos y aseguran la calidad de sus productos, lo que trae como consecuencia mayor estabilidad económica para el país, así como la creación de más y mejores empleos.

6.3 RECOMENDACIONES

Finalmente, se recomienda a la empresa establecer controles para evitar que los factores que afectan a la resistencia se muevan de sus niveles, dichos controles pueden ser ajuste del dado cada que se cambia la jeringa con el epoxi, revisión y registro diario de la presión con que se aplica el epóxico y purgar el dispensador de epóxico cada vez que se cambie de jeringa para asegura que ninguna de la agujas de shower Head se haya tapado por lo viscoso del pegamento y la cantidad dispensada sea al 100%.

Es recomendable dar a las tapas mantenimiento una vez por semana, por mantenimiento se entiende, lubricación a los resortes y limpieza de los residuos de epoxi que puedan quedar acumulados, además de cambiar los resortes a los tres meses, así como renovar las tapas cada año, esto por recomendación del maquinista que las elabora.

La composición química del epóxico fue un factor que se dejó fuera del diseño de este experimento por no resultar factible estudiarlo en este momento, por lo que se deja una línea abierta para seguir trabajando en la optimización de la resistencia a la prueba de jalón, ya que durante la se percató que la composición química del epóxico no es constante, presenta diferencia de una jeringa a otra en las dimensiones de sus partículas, aun cuando provienen del mismo lote de pedido, factor que si es posible estudiar y controlar podría aumentar la media de la resistencia a la prueba de jalón dl producto.

7.0 BIBLIOGRAFÍA

Bhote, K. (1991). *World class quality using desing of experiments to make it happen*.

Chuaqui Paula, W. d. (2007). *Taguchi method to optimize the Quality of functional desserts for elderly and technical prefeasibility study*. Temuco, Chile: Universidad de La Frontera.

De la Vara Salazar, R. &. (2004). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Mexico, D.F.: Mc. Graw Hill.

Escalante, E. J. (2003). *Seis Sigma: Metodología y Técnicas*. México: Limusa.

González Pedro, F. J. (2004). *Optimización de sistemas vesiculares mediante método Taguchi*. Sevilla, España: VIII Congreso de Ingeniería de Organización.

Henderson, G. R. (2006). *Six Sigma: Quality Improvement with MINITAB*. England: John Wiley & Sons, Ltd.

Hernández Sampieri, R. (2003). *Metodología de la Invesigación*. México, D.F.: Mc Graw Hill.

Jiju, A. (2001). *Understanding & implementing quality: Frameworks, Techniques and Cases*. Capítulo 4.

Medina Pedro, C. E. (2007). Cauca, Aplicación del modelo de experimentación Taguchi en un ingenio azucarero del Valle del Cauca. *Scientia et Technica*, 5.

Mercado, L. A. (2005). *Resinas epoxi sililadas retardantes a la llama. Síntesis, caracterización y propiedades*. Departamento de Química Analítica y Química orgánica.

Montgomery, D. (1991). *Diseño y Análisis de Experimentos*. Grupo editorial Iberoamerica.

Montgomery, D. (2001). *Introduction to Statistical Quality Control*. Estados Unidos: John Wiley & Sonic Inc.

Montgomery, D. (2005). *Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería*. México: Limusa Wiley.

Montgomery, R. M. (1995). *Response Superface Methodology, Wiley series In Probability and Mathematical Statistics*. New York: John Wiley Sons.

Myers, G. V. (1990). Combining Taguchi and Response Superace Philosophies: A Dual Response Approach. *Quality Technology*, volumen 22.

Pérez Muñiz, J. M. (2001). *Diseño Experimental: Método Taguchi*. México: Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.

Sarin, S. (1997). *Teaching Taguchi's approach to parameter desing*. Quality Progress: Volumen 30.

Unal, R. y. (1991). Taguchi's approach to parameter to desing optimization for quality an cost: an overview". *Annual conferencia of the International Society of Parametric Analysts* .

Ureña Milber, E. C. (2006). *Determinación de la máxima retención de ácido ascórbico en la conserva de aguaymanto (Physalis peruviana) en almíbar aplicando el método Taguchi*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.

Villarroel Mario, C. R. (2007). *Desarrollo dde una formulación optimizada de mermelada de damasco de bajo contenido calórico utilizando la metodología Taguchi*. Temacu, Chile: Universidad de La Frontera.

Villarroel Mario, R. C. (2007, marzo 01). Optimización de una formulación de queques con características funcionales a partir de almidones resistentes, Sphagnum magellanicum y harina desgrasada de avellana (Gevuina avellana Mol). *Ediciones* , p. 10.

Wu, Y. &. (1996). *Diseño Robusto utilizando los Métodos Taguchi*. Ediciones Díaz de Santos.

8.0 ANEXOS

ANEXO 1

ARREGLOS ORTOGONALES MÁS FRECUENTES

Arreglo L_4 (fracción 2^{3-1})			
Número de corridas	Núm. de columnas		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1
2 factores: columnas 1 y 2			
3 factores: las tres columnas			

Arreglo L_9 (fracción 3^{4-2})				
Número de corridas	Número de columnas			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1
2 factores: columnas 1,2				
3 factores: columnas 1,2,3				
4 factores: columnas 1,2,3,4				

Arreglo L_8 (fracción 2^{7-4})							
Número de corridas	Número de columnas						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
2 factores: columnas 1,2							
3 factores: columnas 1,2,3							
4 factores: columnas 1,2,3,4							
5 factores: columnas 1,2,3,4,5							
6 factores: columnas 1,2,3,4,5,6							
7 factores: columnas 1,2,3,4,5,6,7							

Arreglo L_9 ($2 \times 3^{7-5}$)								
Número de corridas	Número de columnas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	3	3	2	3
8	1	3	2	3	1	1	3	1
9	1	3	3	1	2	2	1	2
10	2	1	1	3	2	2	2	1
11	2	1	2	1	3	3	3	2
12	2	1	3	2	1	1	1	3
13	2	2	1	3	1	1	3	2
14	2	2	2	1	2	2	1	3
15	2	2	3	2	3	3	2	1
16	2	3	1	2	3	3	1	2
17	2	3	2	3	1	1	2	3
18	2	3	3	1	2	2	3	1
1 factor con dos niveles se asigna a la columna 1.								
Los factores con tres niveles se asignan a las columnas restantes 2,3,4,5,6,7,8								

Arreglo L_{12} (Plackett - Burman para $k = 11$)											
Número de corridas	Número de columnas										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1
Se asignan los k factores a las primeras k columnas ($4 \leq k \leq 11$)											

Arreglos Ortogonales más frecuentes (Continuación)

Arreglo $L_{16}(2^{15-11})$															
Número de corridas	Número de columnas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1
4 factores: columnas 1,2,4,8 5 factores: columnas 1,2,4,8,15 6 factores: columnas 1,2,4,8,15,14 7 factores: columnas 1,2,4,8,15,14,13 8 factores: columnas 1,2,4,8,15,14,13,11 9 factores: columnas 1,2,4,8,15,14,13,11,7 10 factores: columnas 1,2,4,8,15,14,13,11,7,12 11 factores: columnas 1,2,4,8,15,14,13,11,7,12,10 12 factores: columnas 1,2,4,8,15,14,13,11,7,12,10,9 13 factores: columnas 1,2,4,8,15,14,13,11,7,12,10,9,6 14 factores: columnas 1,2,4,8,15,14,13,11,7,12,10,9,6,5 15 factores: columnas 1,2,4,8,15,14,13,11,7,12,10,9,6,5,3															

ANEXO 2

NIVELES DE CALIDAD DE SIGMA Y NO CONFORMIDADES POR MILLÓN DE OPORTUNIDADES

SQL	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
1.50	501350	497317	493286	489256	485229	481205	477185	473167	469154	465144
1.60	461140	457140	453146	449157	445175	441199	437229	433267	429313	425366
1.70	421427	417498	413577	409665	405763	401871	397989	394118	390258	386409
1.80	382572	378747	374934	371134	367347	363573	359813	356067	352335	348618
1.90	344915	341228	337556	333900	330259	326636	323028	319438	315864	312308
2.00	308770	305250	301748	298264	294799	291352	287925	284517	281129	277761
2.10	274412	271084	267776	264489	261223	257977	254753	251550	248369	245209
2.20	242071	238956	235862	232791	229742	226716	223712	220732	217774	214839
2.30	211928	209040	206175	203333	200516	197722	194951	192205	189482	186783
2.40	184108	181457	178831	176228	173650	1711095	168565	166059	163578	161120
2.50	158687	156278	153893	151533	149197	146885	144597	142333	140094	137878
2.60	135687	133519	131376	129256	127161	125089	123040	121016	119015	117037
2.70	115083	113152	111245	109360	107499	105660	103845	102052	100282	98534
2.80	96809	95106	93425	91767	90130	88515	86921	85350	83799	82270
2.90	80762	79275	77809	76363	74938	73534	72149	70785	69440	68116
3.00	66811	65525	64259	63011	61783	60573	59382	58210	57056	55920
3.10	54801	53701	52618	51553	50504	49473	48459	47461	46480	45515
3.20	44567	43634	42717	41816	40931	40060	39205	38364	37539	36728
3.30	35931	35149	34380	33626	32885	32157	31443	30742	30055	29379
3.40	28717	28067	27429	26804	26190	25588	24998	24420	23852	23296
3.50	22750	22216	21692	21179	20675	20182	19699	19226	18763	18309
3.60	17865	17429	17003	16586	16178	15778	15386	15004	14629	14262
3.70	13904	13556	13209	12874	12546	12225	11911	11604	11304	11011
3.80	10724	10444	10170	9903	9642	9387	9138	8894	8656	8424
3.90	8198	7976	7760	7549	7344	7143	6947	6756	6569	6387
4.00	6210	6037	5868	5703	5543	5386	5234	5085	4940	4799
4.10	4661	4527	4396	4269	4145	4025	3907	3793	3681	3573
4.20	3467	3364	3264	3167	3072	2980	2890	2803	2718	2635
4.30	2555	2477	2401	2327	2256	2186	2118	2052	1988	1926
4.40	1866	1807	1750	1695	1641	1689	1538	1489	1441	1395
4.50	1350	1306	1264	1223	1183	1144	1107	1070	1035	1001
4.60	968	935	904	874	845	816	789	762	736	711
4.70	687	664	641	619	598	577	557	538	519	501
4.80	483	466	450	434	419	404	390	376	362	349
4.90	337	325	313	302	291	280	270	260	251	242
5.00	233	224	216	208	200	193	185	178	172	165
5.10	159	153	147	142	136	131	126	121	117	112
5.20	108	104	100	96	92	88	85	82	78	75
5.30	72	69	67	64	62	59	57	54	52	50
5.40	48	46	44	42	41	39	37	36	34	33
5.50	32	30	29	28	27	26	25	24	23	22
5.60	20.7	19.8	19.0	18.1	17.4	16.6	15.9	15.2	14.6	14.0
5.70	13.4	12.8	1.2	11.7	11.2	10.7	10.2	9.8	9.4	8.9
5.80	8.5	8.2	7.8	7.5	7.1	6.8	6.5	6.2	5.9	5.7
5.90	5.4	5.2	4.9	4.7	4.5	4.3	4.1	3.9	3.7	3.6
6.00	3.4	3.2	3.1	3.0	2.8	2.7	2.6	2.4	2.3	2.2

Six sigma Quality Improvement with MINITAB G. Robin Henderson

©2006 John Wiley & sons, Ltd

ANEXO 3

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE VALIDACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA PRUEBA DE JALÓN

COMPARACIÓN PAREADA

SET UP 1						
Cavidad	Fixtura 1	Fixtura 2	Fixtura 3	Fixtura 4		
1	1	15.72	2	7.72	2	18.47
2	1	10.25	2	5.87	1	14.46
3	2	9.36	1	12.21	1	16.03
4	1	10.82	1	5.59	2	9.69
5	1	8.77	1	5.85	2	12.98
6	2	10.82	1	6.42	2	15.50
7	1	8.77	1	5.97	1	15.08
8	1	9.24	1	4.24	1	16.41
9	1	7.99	2	5.27	2	11.19
10	1	6.42	2	5.36	1	9.38
11	1	8.66	2	5.29	1	8.43
12	2	8.07	2	6.23	1	11.94
13	2	8.87	2	8.77	2	8.99
14	2	7.53	2	5.27	1	9.24
15	2	11.96	2	7.93	2	8.57
16	1	8.20	2	9.85	1	10.04
17	2	8.07	1	6.93	1	11.47
18	1	11.25	2	11.48	1	20.12
19	1	10.32	1	9.94	1	12.02
20	2	14.69	2	9.01	1	11.40
21	2	13.19	1	10.79	1	11.95
22	1	9.35	1	8.15	2	14.50
23	2	16.32	1	9.64	1	9.94
24	1	13.03	2	14.06	1	12.87
25	2	8.64	2	10.89	1	18.30

SET UP 2						
Cavidad	Fixtura 1	Fixtura 2	Fixtura 3	Fixtura 4		
1	2	15.65	1	10.69	1	21.25
2	2	18.36	1	12.70	2	21.60
3	1	15.74	2	10.82	2	18.57
4	2	10.58	2	8.78	1	15.67
5	2	12.50	2	8.46	1	16.96
6	1	15.24	2	8.54	1	19.72
7	2	15.02	2	11.28	2	24.11
8	2	11.27	2	10.23	2	17.24
9	2	15.34	1	10.46	1	14.81
10	2	12.65	1	11.60	2	12.36
11	2	13.30	1	8.72	2	20.47
12	1	12.42	1	14.08	2	15.89
13	1	18.03	1	15.48	1	17.18
14	1	15.90	1	16.74	2	14.90
15	1	15.97	1	13.10	1	18.91
16	2	13.80	1	14.34	2	18.04
17	1	16.96	2	14.25	2	13.45
18	2	17.55	1	17.62	2	16.49
19	2	16.88	2	16.73	2	17.88
20	1	18.63	1	14.39	2	16.59
21	1	12.30	2	12.28	2	15.26
22	2	15.26	2	16.74	1	16.28
23	1	17.24	2	14.77	2	13.25
24	2	16.60	1	15.65	2	15.74
25	1	10.32	1	10.74	2	20.26

