

CAPÍTULO 6

LOS EXPERIMENTOS

CAPÍTULO 6

LOS EXPERIMENTOS

6.1 EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En la actualidad se realizan experimentos en todos los campos de la ciencia y tecnología, con el fin de analizar un proceso o sistema en particular. Es posible considerar a la experimentación como parte del método científico y una de las formas en que se aprende acerca de cómo funciona un proceso. “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 la causa de los cambios en la respuesta de salida”³.

6.1.1 REFERENCIA HISTÓRICA SOBRE EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Sir Ronald A. Fisher innovó el uso de métodos estadísticos en el diseño de experimentos. Además *Fisher* desarrolló y utilizó por primera vez, el análisis de variancia como herramienta primaria, para el análisis estadístico en el diseño experimental. *Fisher* trabajó como profesor en la Universidad de Londres y posteriormente, llegó a formar parte del cuerpo docente de la Universidad de Cambridge. *Fisher* fue el pionero del diseño de experimentos, sin embargo muchos científicos han contribuido de manera significativa al

³ Montgomery Douglas. Diseño y Análisis de Experimentos. Ed. Iberoamérica. Estados Unidos de América 1991. Pág. 1.

desarrollo del mismo, entre ellos pueden encontrarse a *F. Yates, G.E.P. Box, R.C. Bose, O. Kempthorne, y W.G. Cochran.*

Las primeras aplicaciones del diseño de experimentos se dieron en el área de agricultura y biología. En el área industrial se empezó a utilizar en la década de 1930, principalmente en las industrias textiles y de lana. Al término de la Segunda Guerra Mundial, el diseño de experimentos se introdujo en las industrias químicas y de transformación de Europa y Estados Unidos. La industria de los semiconductores y de componentes electrónicos se ha visto beneficiada durante muchos años, con el uso del diseño de experimentos.

6.1.2 OBJETIVOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Todo proceso o sistema puede ser visualizado como una combinación de métodos, máquinas, personas y otros recursos que transforman alguna entrada (materia prima) en una salida, con una o más respuestas observables y en algunos casos medibles.

Un experimento diseñado tiene por objetivos:

- Identificar las variables que tiene mayor influencia en la variable de respuesta.
- Determinar la mejor combinación de las variables controlables que influyen en la variable de respuesta, de modo que ésta se acerque al valor deseado.
- Determinar la mejor combinación de las variables controlables de modo que la variabilidad de la respuesta sea pequeña.

- Determinar la mejor combinación de las variables controlables, buscando minimizar los efectos de las variables no controlables .

El diseño de experimentos tiene un cometido importante para el desarrollo de procesos y la mejora de su rendimiento, el cual consiste en desarrollar un proceso robusto. También se puede utilizar en el desarrollo de nuevos productos. Al aplicar el diseño de experimentos en una fase de desarrollo de un proceso se busca:

- Mejorar el rendimiento del proceso.
- Reducir la variabilidad y apego a los requerimientos nominales.
- Reducir los tiempos de desarrollo.
- Reducir costos.

Una característica importante del diseño de experimentos es su carácter secuencial, debido a que se realizan conjeturas acerca de un proceso. Se llevan a cabo experimentos para generar datos a partir del proceso y con la información del experimento se generan nuevas conjeturas, que llevan a la realización de nuevos experimentos, y así sucesivamente.

6.1.3 METODOLOGÍA DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

La investigación en el campo de la ingeniería, ciencia e industria utiliza de manera extensa la experimentación. El uso de las técnicas estadísticas en la experimentación requiere de una idea clara de qué es lo que se va a estudiar, cómo se va a efectuar la recopilación de los

datos, y una idea cualitativa de cómo se van a analizar. A continuación se presentan los pasos a seguir para llevar a cabo un experimento:

1. Comprensión y planteamiento del problema. En la práctica no es sencillo darse cuenta de que existe un problema que requiere experimentación. Es importante identificar claramente el alcance de los objetivos. Además, un planteamiento claro contribuye a un mejor conocimiento del fenómeno y de la solución final del problema.
2. Elección de factores y niveles. Se debe de elegir los factores que variarán en el experimento y los niveles específicos de cada uno de ellos. Además debe de considerarse la forma en que se controlarán estos factores, para mantenerlos en los valores deseados. Es importante considerar todos los factores que pueden ser de interés, y no depender de la experiencia. Cuando el objetivo es el escrutinio de factores o la caracterización del proceso, se recomienda utilizar pocos niveles de los factores (dos niveles).
3. Selección de la variable de respuesta. Al realizar el experimento se debe de estar seguro de que la variable de respuesta o variable dependiente realmente ofrezca información útil acerca del proceso en estudio. La capacidad de medición también es un factor a considerar, si ésta es deficiente, sólo puede esperarse que el experimento detecte efectos muy grandes de los factores.
4. Elección del diseño experimental. Este cuarto paso se puede facilitar si los anteriores tres se han hecho de manera correcta. Al elegir el diseño se debe de seleccionar el orden adecuado para los ensayos, tomar en cuenta el tamaño de muestra (número de repeticiones) y determinar si hay implicado bloqueos u otras restricciones. También es importante considerar el objetivo del experimento al seleccionar el diseño. En algunos

casos, el interés es identificar qué factores producen respuestas diferentes y estimar la magnitud del cambio en la respuesta, mientras que en otros, se busca verificar la uniformidad de la respuesta en diferentes condiciones.

5. Realización del experimento. Al realizar el experimento se debe asegurar que todo se haga conforme a lo planeado, debido a que cualquier error puede anular la validez del mismo.
6. Análisis de datos. Para que los resultados y conclusiones sean más que apreciativos, se deben emplear métodos estadísticos para el análisis de los datos. Algo importante a considerar es que, estos métodos no pueden probar definitivamente que un factor o varios tienen un efecto particular, sólo proporcionan directrices para la validez de los resultados.
7. Conclusiones y recomendaciones. Al final del experimento se deben generar conclusiones prácticas de los resultados y hacer recomendaciones. Es importante hacer un seguimiento y llevar a cabo pruebas de confirmación, con el fin de validar las conclusiones.

6.2 EL PRIMER EXPERIMENTO

En esta parte del proyecto se presenta el primer experimento que comprende: la elección de los factores y sus respectivos niveles, la elección del diseño de experimentos, la realización del experimento y el análisis de los datos.

6.2.1 ELECCIÓN DE LOS FACTORES Y NIVELES

Existen una gran cantidad de factores que intervienen en la fabricación de la tapa de la guanterera, por lo tanto analizar todos estos factores y todas las posibles combinaciones de los mismos puede resultar muy costoso.

En la actualidad lamentablemente, no existe una regla o metodología lo suficientemente poderosa y confiable, que permita identificar y jerarquizar objetivamente todos los factores con sus correspondientes niveles y que lleve a identificar el valor óptimo del parámetro de calidad estudiado.

La mejor guía con la que se cuenta, es la experiencia acerca del proceso y de las variables que en el mismo se manejan. Es por esto, que la principal fuente de información para seleccionar los factores controlables y no controlables que se analizan, así como sus respectivos niveles, fueron los expertos de la empresa (auditor de calidad, coordinación de producción, supervisor de producción y jefe de mantenimiento). Ellos definieron los factores a analizar, con base en su experiencia sobre el proceso. En la tabla 6.1 se muestran los factores analizados en este primer experimento.

Tabla 6.1: Factores y niveles a analizar en la producción de tapas de guantera para el Jetta A4 (primer experimento)			
FACTOR	NIVELES		
Temperatura placa superior	380°C	400°C	415°C
Temperatura placa inferior	380°C	400°C	415°C
Color	Negro	Gris	Beige
Turno	Primero	Segundo	

6.2.2 ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

El siguiente punto es la elección del diseño experimental. Para este experimento se elige un modelo completo, debido a que se cuenta con el tiempo y presupuesto necesario para realizar las 54 condiciones experimentales (ver apéndice 6). Además, el experimento tiene 5 réplicas. Este número está limitado por el material y tiempo disponible por parte de la empresa, el cual representa un total de 270 condiciones experimentales.

Al tener el modelo completo se tiene la ventaja de considerar todas las combinaciones de factores en sus diferentes niveles, lo cual ofrece una gran confianza al momento de analizar los datos y generar las conclusiones y recomendaciones. Mediante este modelo se pueden estimar los efectos principales e interacciones significativas. Además este modelo, al analizar todos los cambios que pueden generarse en la variable de respuesta, ante cambios en las variables de entrada, es congruente con el objetivo del experimento.

Por otro lado, a medida que el número de factores aumenta, la cantidad de ensayos necesarios para obtener una o más réplicas completas, puede sobrepasar los recursos disponibles para la experimentación como son tiempo, dinero, materia prima, energía, etc. Además, al trabajar con una gran cantidad de datos e información se pueden generar errores humanos en el manejo de lo mismos.

6.2.3 REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

La realización de este experimento tuvo una duración de aproximadamente 2 meses, durante ellos, se registraron todos los datos necesarios para poder completar el modelo. Al momento de realizarse el experimento sólo se encontró con una limitante, el factor color. La cantidad de producto que se fabrica, de cada color es variable. El color negro es el que más se produce y el beige el que menos, pues apenas representa el 10% de la producción total. Esto significó largos tiempos de espera para poder completar todas las condiciones que involucran al color beige.

Por otro lado, los demás factores que no son considerados en este experimento, se mantuvieron fijos en el valor que actualmente se utiliza para la producción de las tapa de las guanteras (ver tabla 5.1).

6.2.4 ANÁLISIS DE LOS DATOS

Antes de realizar el análisis numérico, es importante tener una idea del comportamiento de la variable de respuesta ante los distintos factores. Con el fin de observar esto, en las figuras 6.1 y 6.2 se gráfica el promedio de las diferentes condiciones experimentales. Todas las condiciones con sus respectivas 5 medidas se pueden observar en el apéndice 7.

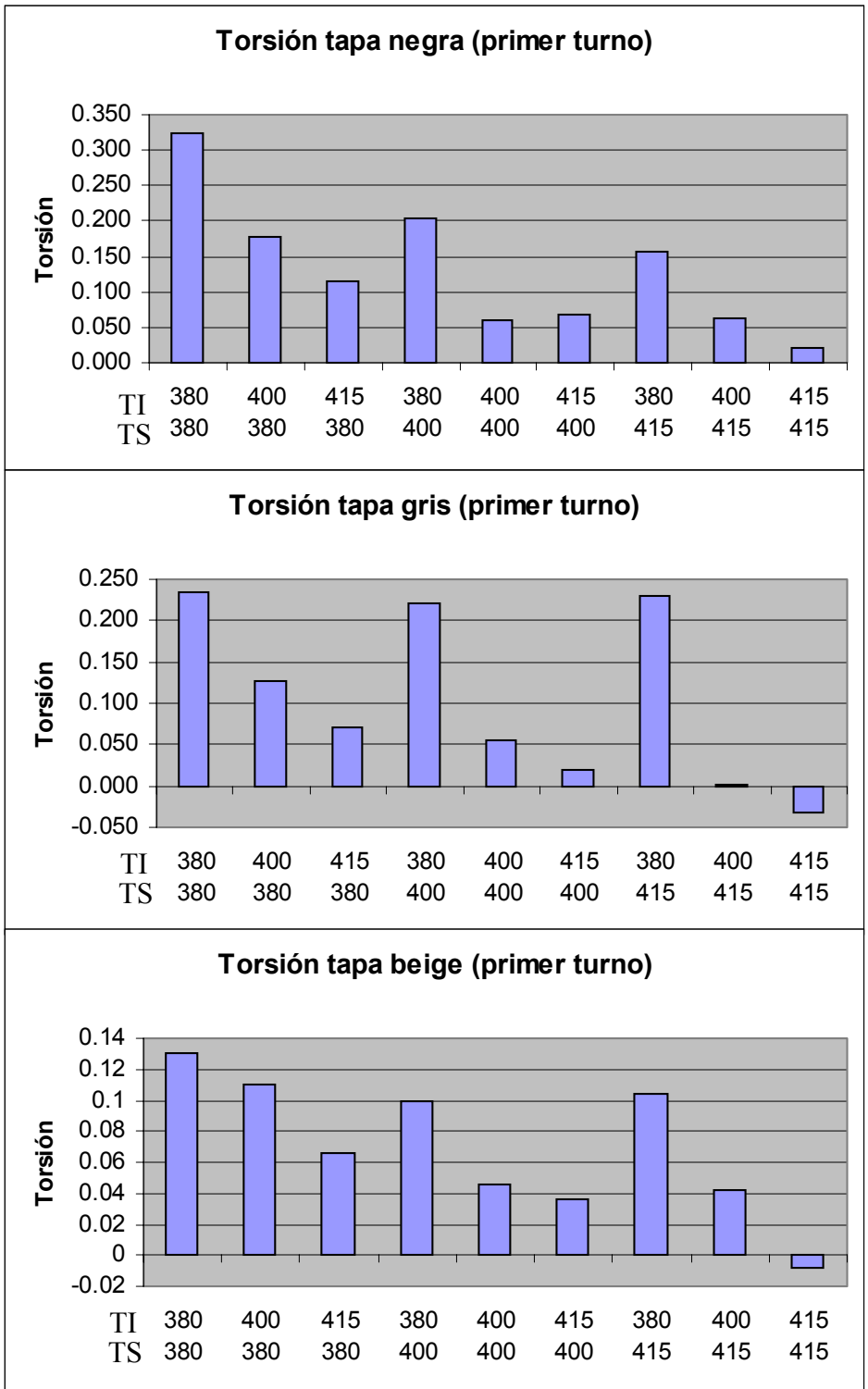


Figura 6.1. Promedio de cada condición experimental (primer turno).
 *TI. temperatura placa inferior
 *TS temperatura placa superior

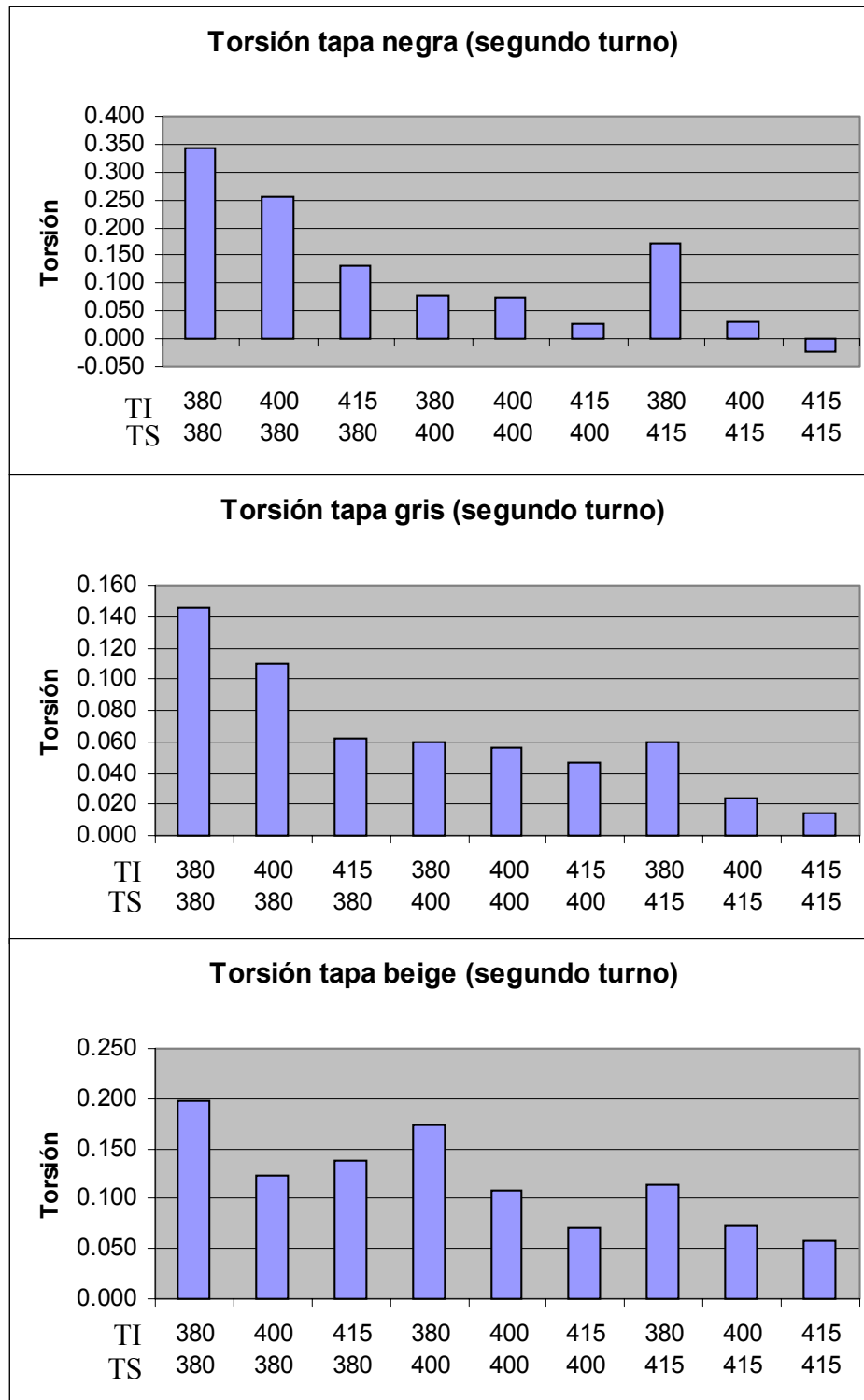


Figura 6.2. Promedio de cada condición experimental (segundo turno).

*TI. temperatura placa inferior

*TS temperatura placa superior

Para este primer experimento se plantean las siguientes hipótesis:

Ho: No hay efecto en la torsión debido a la temperatura de la placa superior.

Ho: No hay efecto en la torsión debido a la temperatura de la placa inferior.

Ho: No hay efecto en la torsión debido al color del material.

Ho: No hay efecto en la torsión debido al turno en el que se trabaja.

Contra:

Ha: Si hay efecto en la torsión.

Para probar esto se utiliza un valor α de 0.10.

En la tabla 6.2 se muestra la tabla de ANOVA para este experimento obtenida a mediante el paquete estadístico MINITAB. En la figura 6.3 se muestran las gráficas de los efectos principales, y en la figura 6.4 se observa la gráfica de las interacciones dobles.

Tabla 6.2: Analysis of Variance for Y, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
TempX₁	2	0.470581	0.470581	0.235290	157.40	0.000
TempX₂	2	0.685370	0.685370	0.342685	229.24	0.000
Color	2	0.089932	0.089932	0.044966	30.08	0.000
Turno	1	0.000063	0.000063	0.000063	0.04	0.838
TempX₁*TempX₂	4	0.018804	0.018804	0.004701	3.14	0.015
TempX₁*Color	4	0.108841	0.108841	0.027210	18.20	0.000
TempX₁*Turno	2	0.010990	0.010990	0.005495	3.68	0.027
TempX₂*Color	4	0.051946	0.051946	0.012986	8.69	0.000
TempX₂*Turno	2	0.052027	0.052027	0.026014	17.40	0.000
Color*Turno	2	0.088447	0.088447	0.044224	29.58	0.000
Error	244	0.364744	0.364744	0.001495		
Total	269	1.941744				

Gráfica de los Efectos Principales

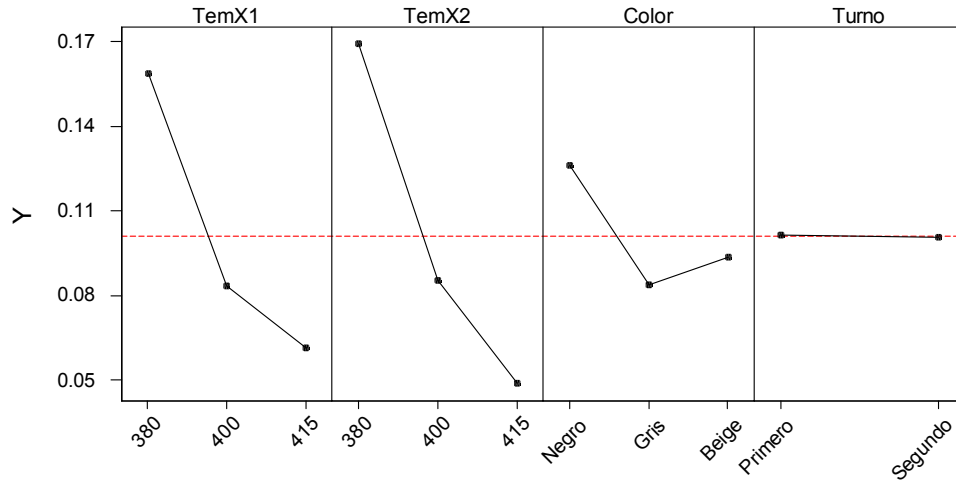


Figura 6.3. Gráficas de efectos principales.

Gráfica de las Interacciones Dobles

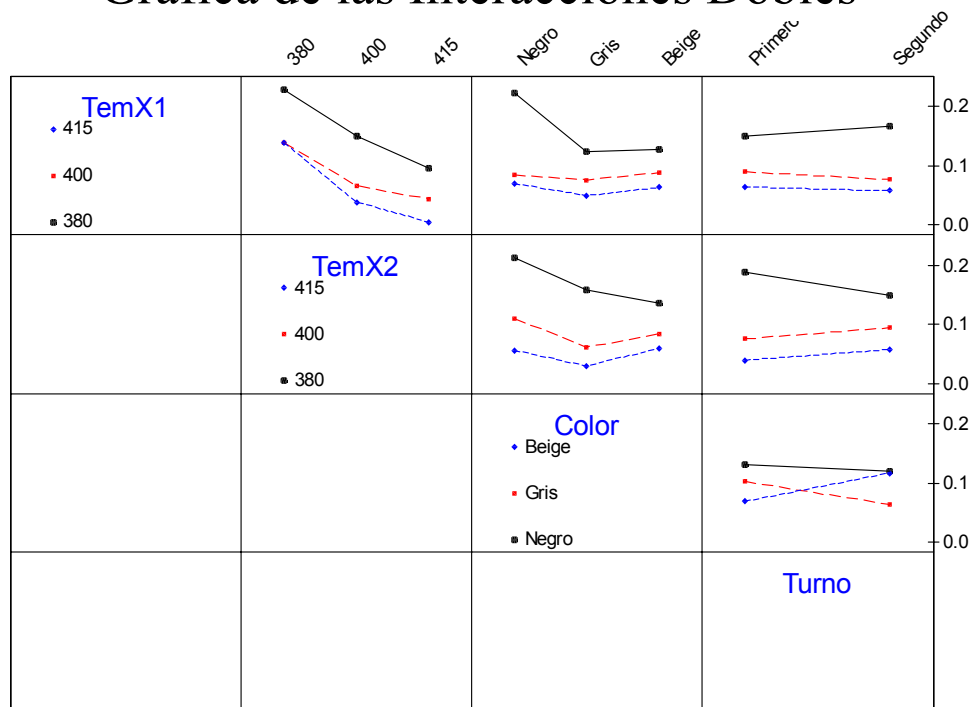


Figura 6.4. Gráfica de las interacciones dobles.

Al ver los resultados que ofrece la tabla ANOVA y tras observar las gráficas de los efectos principales, se puede concluir que los factores que influyen directamente en la torsión de las tapas son: la temperatura de la placa superior, la temperatura de la placa inferior y el color de la tapa. Además, las interacciones que pueden influir en la torsión de las tapas son: temperatura placa superior-color, temperatura placa inferior-color, temperatura placa inferior-turno y color-turno.

Por otro lado, la tabla de ANOVA, también presenta el valor P, definido como el mínimo valor de rechazo. El valor P se utiliza para saber si un factor tiene efecto en la variable de respuesta. Si el valor α es mayor o igual que el valor P de un factor, se considera que dicho factor puede influir en la variable de respuesta.

Tomando en cuenta lo anterior, los factores que presentan un valor P menor que α (0.10) son: la temperatura de la placa superior (P=0.000), la temperatura de la placa inferior (P=0.000) y el color (P=0.000). Las interacciones que tienen un valor P menor que α (0.10) son: temperatura placa superior-temperatura placa inferior (P=0.015), temperatura placa superior-color (P=0.000), temperatura placa superior-turno (P=0.027), temperatura placa inferior-color (P=0.000), temperatura placa inferior-turno (P=0.000) y color-turno (P=0.000).

6.3 EL SEGUNDO EXPERIMENTO

En esta parte del proyecto se presenta el segundo experimento. Este abarca la elección de los factores y sus respectivos niveles, la elección del diseño de experimentos, la realización del experimento y el análisis de los datos.

Es importante mencionar que para este segundo experimento, no se cuenta con toda la información necesaria para tener todas las combinaciones de factores, en sus diferentes niveles, debido al costo y tiempo que esto tomaría. Con base en esto se toma la decisión de utilizar el enfoque *Taguchi* para poder analizar este segundo experimento.

6.3.1 FILOSOFÍA TAGUCHI

El *Dr. Taguchi* (ver apéndice 8 para su biografía) combina métodos de ingeniería y estadística para obtener mejoras en los costos y la calidad de los productos, mediante la optimización del diseño del producto y de los procesos de producción.

En el diseño estadístico de experimentos, el *Dr. Taguchi* ha establecido los siguientes conceptos: la función pérdida de la sociedad y la razón señal a ruido, las cuales dan una respuesta al problema de cómo mejorar el producto con el menor costo posible. Además, él propone una visión amplia y diferente de la calidad; la relación de ésta con los costos y la pérdida monetaria, no únicamente para el fabricante, sino también para el consumidor.

Cuando un producto de mala calidad es vendido en el mercado, el fabricante paga el costo de la garantía, pero después de que el periodo de garantía termina, el consumidor debe pagar por las reparaciones al producto. Además, existen otros costos difíciles de detectar como: devoluciones, consumidores insatisfechos, tiempo y dinero gastado por los consumidores, y daños al patrimonio del consumidor. Con base en lo anterior, se puede concluir que un producto de mala calidad provocará pérdidas a la sociedad.

En términos del productor, la pérdida a la sociedad se entiende como la desviación de las características funcionales del objetivo. Los factores que causan que una característica funcional se desvíe de un valor objetivo, se llaman factores de ruido. Existen tres tipos de ruido: el ruido externo, el ruido interno y el ruido variacional. El ruido externo está relacionado con variables de tipo ambiental o condiciones de uso. El ruido interno son los cambios que sufre el producto en sus constantes internas a lo largo del tiempo y el ruido variacional son las diferencias entre unidades de producto manufacturadas bajo las mismas condiciones.

El método del *Dr. Taguchi* utilizado en el diseño de experimentos, se basa en los arreglos ortogonales, los cuales permiten una búsqueda, a través de una gran cantidad de opciones, para encontrar el diseño más adecuado con la mejor razón señal-ruido.

6.3.2 ELECCIÓN DE LOS FACTORES Y NIVELES

Para este segundo experimento se consideran los factores del primer experimento que influyen directamente, en la torsión de las tapas (temperatura de la placa superior,

temperatura de la placa inferior y color), además de la incorporación de un nuevo factor que es la presión, con la cual se une la puerta con al contrapuerta de la tapa. En la tabla 6.3 se muestran los factores que se analizan en este segundo experimento y los niveles que son estudiados.

Tabla 6.3: Factores y niveles a analizar en la producción de tapas de guantera para el Jetta A4 (segundo experimento)			
FACTOR	NIVELES		
Temperatura placa superior	380°C	400°C	415°C
Temperatura placa inferior	380°C	400°C	415°C
Presión unir tapas	3.5 bar	4 bar	4.5 bar
Color	Negro	Gris	Beige

Es importante notar que los niveles superior e inferior del factor presión para unir tapas, toman valores mas cerrados que su límite inferior y superior de especificación, debido a que la experiencia muestra que producir sobre los límites de especificación de este factor, repercute en la calidad del producto, presentándose deformaciones y una baja resistencia al impacto.

6.3.3 ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

El siguiente punto es elegir el diseño experimental. El primer paso es la elección del arreglo ortogonal adecuado, que para este caso es el $L_{27}3^{13}$, el cual se puede observar en el apéndice 9. Tras la selección del arreglo ortogonal correcto, se generan las condiciones con las cuales se va a experimentar. Estas se pueden observar en el apéndice 10. Además, el experimento tiene 5 réplicas, este número es limitado por el material y tiempo disponible por parte de la empresa.

La técnica *Taguchi* presenta la ventaja de que simplifica algunos conceptos estadísticos clásicos e introduce una forma directa de examinar una gran cantidad de factores en forma simultánea y económica, superando en este aspecto, a los métodos clásicos del diseño de experimentos cuya principal desventaja, a pesar del rigor matemático, es el tiempo y costo que se requiere para aplicarlos.

Por otro lado, una de las desventajas de la técnica *Taguchi* es que no considera todas las combinaciones de factores en sus diferentes niveles. Esto ocasiona que el análisis de las interacciones entre los factores del proceso no sea del todo exacto y pueda llevar a una situación en que el experimentador no obtenga la respuesta correcta.

6.3.4 REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

La realización de este experimento tuvo una duración de aproximadamente 1 mes, durante el cual se registró todos los datos necesarios para poder completar el modelo. Si se compara este experimento con el primero, podemos observar que la cantidad de tiempo que se utilizó se redujo en un 50%, además el material utilizado para realizar este experimento disminuyó también en un 50%. Al momento de realizar el experimento se presentó las misma limitante que en el primer experimento con el factor color, lo que ocasionó largos tiempos de espera para completar todas las condiciones experimentales que implica el color beige.

Además, igual que en el primer experimento, los demás factores no considerados en este experimento, se mantuvieron con el valor que actualmente se utiliza para la producción de la tapa de las guanteras (ver tabla 5.1).

6.3.5 ANÁLISIS DE LOS DATOS

Antes de realizar el análisis matemático, se presenta la figura 6.5 donde se muestra el promedio de las diferentes condiciones experimentales, en el orden que se presentan en el apéndice 11.



Figura 6.5. Observaciones del segundo experimento.

Para este primer experimento se plantean las siguientes hipótesis:

Ho: No hay efecto en la torsión debido a la temperatura de la placa superior.

Ho: No hay efecto en la torsión debido a la temperatura de la paca inferior.

Ho: No hay efecto en la torsión debido al color del material.

Ho: No hay efecto en la torsión debido a la presión para unir las tapas.

Contra:

Ha: Si hay efecto en la torsión.

Para probar esto se utiliza un valor α de 0.10.

En la tabla 6.4 se muestra la tabla de ANOVA para este experimento. En la figura 6.6 se muestran las gráficas de los efectos principales y en la figura 6.7 se observa la gráfica de las interacciones dobles.

Tabla 6.4: Analysis of Variance for Y					
Source	DF	SS	MS	F	Pr > F
Presión	1	0.227004	0.227004	222.1043	0.0001
TempX₁	1	0.253871	0.253871	248.3911	0.0001
TempX₂	1	0.18225	0.18225	178.316	0.0001
Color	2	0.00701	0.003505	3.429522	0.035482
Presión*TempX ₁	1	1.667E-6	1.667E-6	0.001631	0.967853
Presión*TempX ₂	1	0.000375	0.000375	0.366905	0.545794
Color*Presión	2	0.012896	0.006448	6.308596	0.002454
Model	9	0.683408	0.075934	74.29512	0.0001
Error	125	0.127758	0.001022		
Total	134	0.811166			

Gráfica de los Efectos Principales

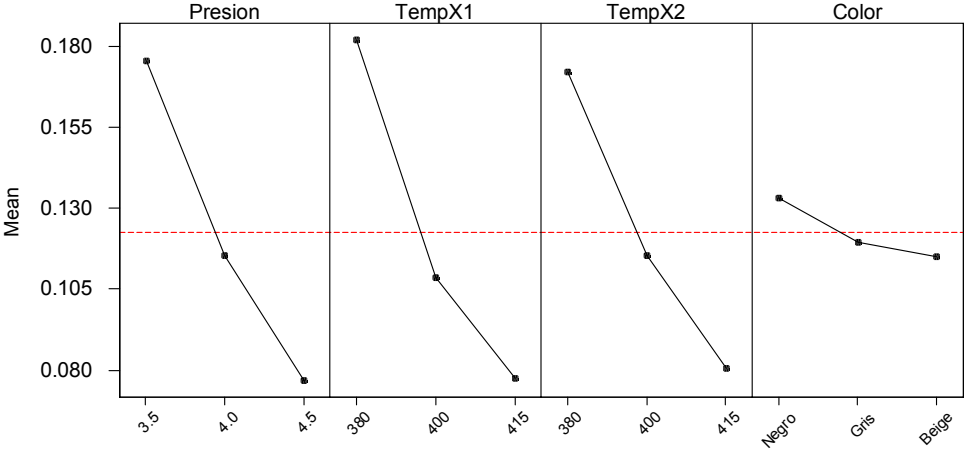


Figura 6.6. Gráfica de los efectos principales.

Gráfica de las Interacciones Dobles

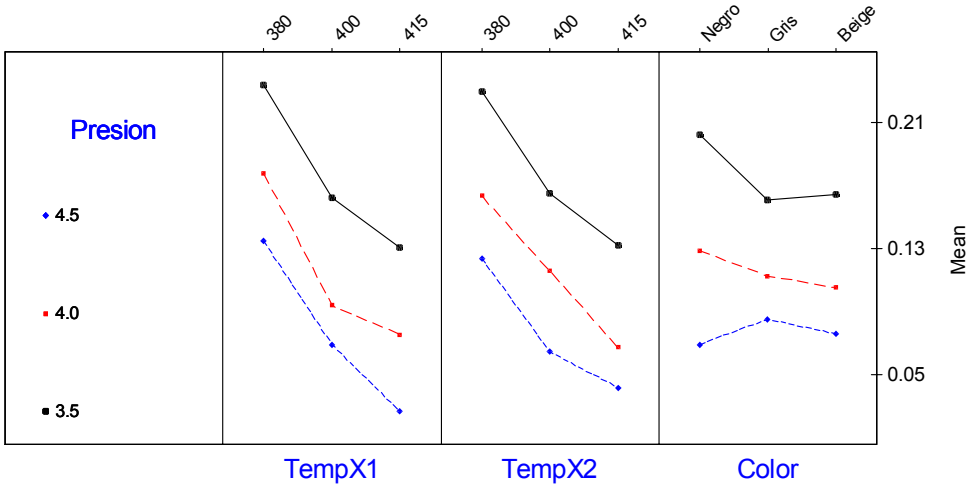


Figura 6.7. Gráfica de las interacciones dobles.

Tras observar los resultados que ofrece la tabla ANOVA y una vez observadas las gráficas de los efectos principales, se puede concluir que los factores que influyen directamente en la torsión de las tapas son: la temperatura de la placa superior, la temperatura de la placa inferior, la presión para unir las tapas. Además, la interacción de los factores que puede influir en la variable de respuesta es color-presión.

Comparando el valor P, que se presenta en la tabla ANOVA, con el valor α (0.10) los factores que tienen un efecto sobre la variable de respuesta son: la temperatura de la placa superior (P=0.0001), la temperatura de la placa inferior (P=0.0001), la presión para unir las tapas (P=0.0001) y el color de las tapas (P=0.035). La interacción que tienen un valor P menor que α (0.10) es: color-presión (P=0.002).

6.4 ÍNDICE SEÑAL A RUIDO

Para optimizar la media y la variancia simultáneamente, se requiere definir un índice que evalúe el grado en que, al mismo tiempo se minimice la variancia y se ajuste la media al valor objetivo. Este índice *Taguchi* lo llamó índice señal a ruido (SR o SN).

El índice SR a calcular en un proyecto de experimentación, depende de la naturaleza del valor objetivo de la característica de calidad, para variables continuas existen tres casos: nominal es mejor, menor es mejor y mayor es mejor. En este caso lo que se busca es reducir la torsión, por lo tanto se utiliza el caso menor es mejor. El índice SR para este caso es:

$$SR = -10 \text{Log}_{10} [\sum Y_i^2 / n]$$

En la tabla 6.5 se muestran los índices señal a ruido menor es mejor, para los diferentes niveles de cada factor y en la tabla 6.6 se observan los valores que toma la variable de respuesta, al ser minimizada en los diferentes niveles de cada factor.

Tabla 6.5: Índice señal a ruido menor es mejor.				
Level	Presión unir	Temperatura (X1)	Temperatura (X2)	Color
1	15.4697	15.3321	16.0791	20.5853
2	19.5364	20.3557	20.2486	21.1769
3	25.8251	25.1434	24.5035	19.0691

Tabla 6.6: Valores de la variable de respuesta al ser minimizada				
Level	Presión unir	Temperatura (X1)	Temperatura (X2)	Color
1	0.175556	0.182000	0.172222	0.133333
2	0.115556	0.108444	0.115333	0.119556
3	0.076889	0.077556	0.080444	0.115111

Tomando en cuenta el índice señal a ruido menor es mejor, se puede observar que el valor más pequeño de la torsión para las tapas, se encuentra en el nivel más alto de todos los factores controlables, lo que significa que se fija el valor de la temperatura de la placa superior en 415°C, la temperatura de la placa inferior en 415°C y la presión para unir las tapas en 4.5bar. El valor de la torsión tomará los valores más bajos.