

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**

Campus Monterrey

**DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS DE INGENIERIA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.**

**“APLICACION DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN EL ANALISIS
DEL NIVEL DE VIBRACION EN MOTORES ELECTRICOS”**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO ACADEMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE
CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD**

POR:

Luis Jorge Moreno López

Monterrey, N. L .

DICIEMBRE DE 2004

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

**DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS DE INGENIERIA**

**APLICACION DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN EL ANALISIS
DEL NIVEL DE VIBRACION EN MOTORES ELECTRICOS**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO ACADEMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE
CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD**

POR:

Luis Jorge Moreno López

Monterrey, N. L .

DICIEMBRE DE 2004

Capítulo 1 Introducción.

El objetivo de éste capítulo es definir la problemática a tratar y el planteamiento de los objetivos del presente trabajo. Se describe el proceso de ensamble de motores eléctricos y se dan a conocer las estrategias a seguir para resolver la problemática.

1.1 Descripción general de la planta

Empresa líder mundial en la fabricación de productos utilizados para distribuir, proteger, controlar la energía y equipos eléctricos, ofreciendo una amplia gama de soluciones en productos y servicios para aplicaciones comerciales industriales, residenciales y de compañías suministradoras.

Sus principales productos y servicios incluyen reguladores de voltaje, interruptores, desconectadores, transformadores, tableros de distribución, controladores de motores, variadores de velocidad, medidores, relevadores, control y procesamiento de sistemas automáticos, un amplio rango de motores eléctricos CA y CD, ingeniería técnica y soluciones para el manejo de la energía eléctrica.

Presencia en México

Este grupo emplea a más de 10,000 personas en México, cuenta con una amplia red comercial a nivel nacional y con 13 plantas manufactureras. Sus oficinas centrales se localizan en Monterrey, Nuevo León, al tiempo que su equipo de ventas está estratégicamente dividido en tres regiones: Norte, Centro-Sur y Occidente.

Cuenta con una amplia experiencia en México. A lo largo de su trayectoria, ha apoyado a industrias productoras de cemento, papel, acero, productos petroquímicos, hules, plásticos, y de automóviles y partes automotrices.

Clientes Clave

Kimberly Clark, Cemex, Cruz Azul, Apasco, General Motors, Chrysler, APM, Basf, PEMEX, Telefónica Móviles, entre otros.

División Motores

Filial manufacturera de motores eléctricos ubicada al poniente de Monterrey N.L. en el municipio de Villa García, cuenta con un área de 374,000 ft² asignadas al proceso de manufactura y 51,000 ft² asignadas a oficinas. Da empleo a 250 personas entre personal sindicalizado y de confianza. Los productos que se manufacturan son exportados a los Estados Unidos de norte América y de ahí distribuidos a todo el mundo.

Productos.

La gran variedad de motores incluye desde los muy pequeños hasta los grandes aparatos de 12,000 HP. Sus amplios avances en el campo de la investigación han llevado a la empresa a ofrecer en México novedosos productos.

- Motores Industriales de Corriente Directa con capacidad de 175 a 3,000 HP, de 4 y 6 polos, estos motores pueden ser usados como generadores, controladores de velocidad, sets en minería y como elevadores.
- Motores Grandes de Corriente Directa con capacidad de 200 a 12,000 HP horizontales y verticales.
- Accesorios.
- Bobinas de Tracción y de Inducción.
- Motores de uso ultra severo con capacidad de 25 a 300 hp de alta eficiencia entre otros.

1.2 Problemática

En el proceso de manufactura de motores eléctricos se realizan diversas pruebas que deben cumplir con las especificaciones establecidas en el plan de calidad. Las piezas aprobadas son ensambladas para formar el motor eléctrico. Una vez ensamblado por completo se realizan unas pruebas denominadas como “Pruebas Finales”, estas tienen como objetivo evaluar la calidad y el cumplimiento de los estándares establecidos para el producto terminado con el fin de asegurar un alto nivel de calidad y son realizadas al 100 % de los motores para su liberación; a continuación se enlistan estas pruebas con una breve descripción del objetivo de cada una:

- **Winding Resistance Test.** Esta es una prueba de resistencia para asegurar que el embobinado esté bien conectado y que el calibre del cable sea el adecuado.
- **AC HIPOT Test.** Sirve para verificar la calidad del aislamiento del embobinado.
- **Open Bar Test.** Sirve para verificar la calidad del inyector de aluminio del rotor, este no debe tener burbujas o espacios vacíos.
- **Unfiltered Vibration Test Data.** Sirve para verificar el nivel de vibración del motor en funcionamiento.
- **Load Test** Esta es una prueba especial que se le realiza al 2 % de la producción, en esta prueba se verifican los parámetros del motor en funcionamiento y con carga. Los parámetros que se verifican son: resistencia, impedancia, temperatura, ruido y eficiencia.

Para este trabajo en particular nos enfocaremos en la prueba de Vibración; la problemática consiste en que no se conocen que variables intervienen de manera significativa en la vibración del motor, y como se podría minimizar esta a un nivel óptimo. La importancia de mantener la vibración en niveles adecuados radica en que tendremos un mejor desempeño en los motores eléctricos.

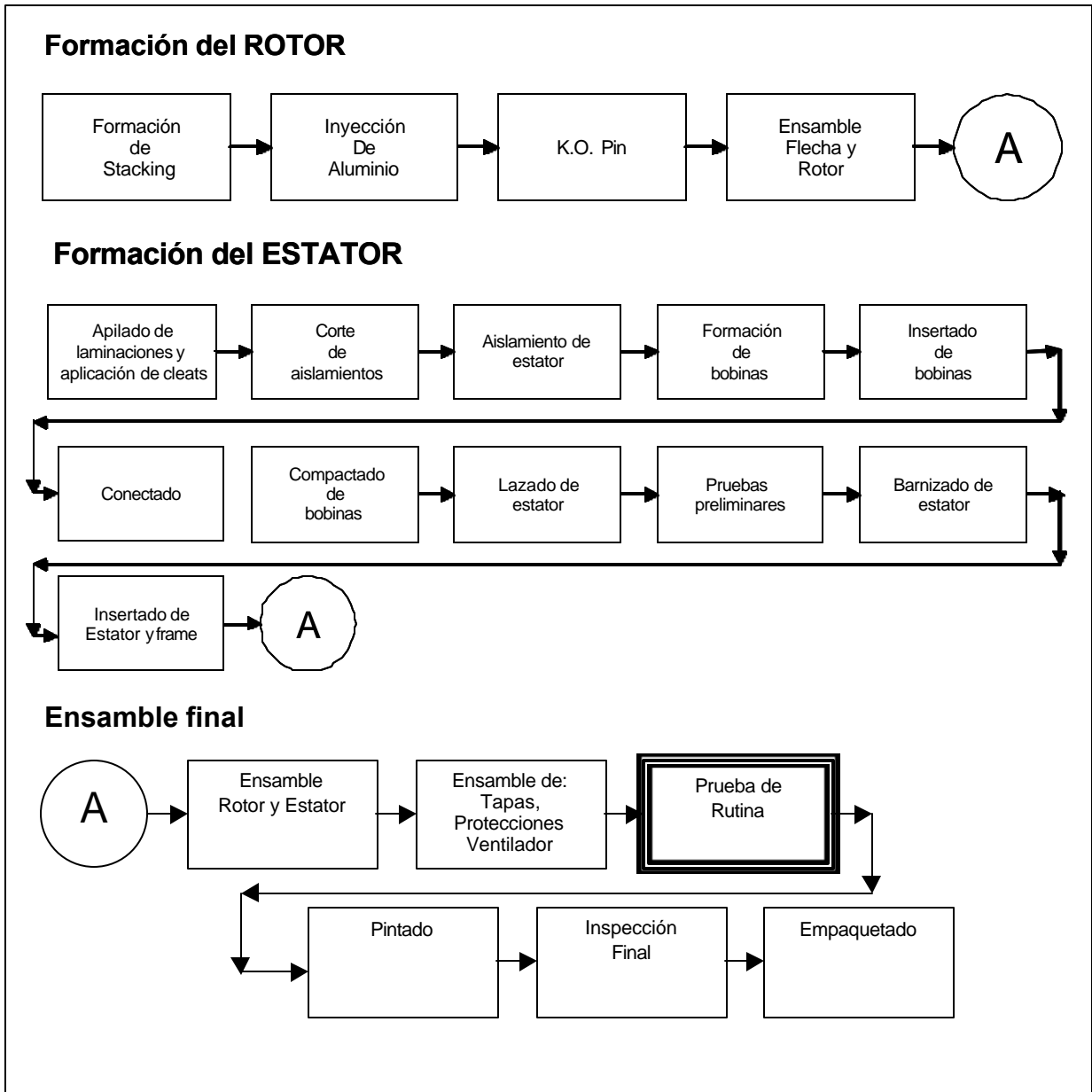
Los objetivos del presente trabajo son:

1. Minimizar la vibración en pruebas finales de motores eléctricos para mantenerlas en un valor por debajo de 0.04 pulg./seg de desplazamiento.
2. Identificar las variables significativas.
3. Identificar que Interacción de variables son significativas.
4. Sugerir valores (niveles) óptimos de operación.
5. De ser posible, encontrar niveles que permitan minimizar los costos de operación.

1.3 Descripción del Proceso

El proceso de manufactura de motores eléctricos puede dividirse básicamente en tres etapas: Formación del rotor, formación del estator y el ensamble final, el diagrama de flujo del proceso puede observarse a continuación (Fig. 1.1).

Figura 1.1 Diagrama de flujo del proceso de manufactura de motores eléctricos.



Formación del Rotor: El proceso consiste en apilar cierto número de láminas de aluminio que tienen una perforación circular al centro, el diámetro de esta perforación es igual al diámetro de la flecha. Una vez apiladas las láminas se procede a inyectarles aluminio a presión para evitar que queden espacios o burbujas de aire. Posteriormente se introduce la flecha y se procede a rectificar las laminaciones para darle un acabado completamente liso (Fig. 1.2).



Figura 1.2 Rotor en espera de ser ensamblado.

Formación del Estator: El proceso consiste en apilar cierto número de láminas de aluminio que tienen una perforación circular al centro, el diámetro de esta perforación es igual al diámetro del rotor. Una vez apiladas las láminas se le aplican unos seguros para mantenerlas fijas, posteriormente se procede a aplicarles un aislamiento. Ya aislado el esqueleto, se procede a ensamblar los embobinados y a conectar los cables según marque el procedimiento; posteriormente las bobinas se compactan para reducir su diámetro, se lazan para sujetarlas y se procede a introducir las a la máquina de barnizado, esto es con el fin de aislar el embobinado en toda la superficie. Por último se procede a insertar el estator en el frame (fig. 1.3 y 1.4).



Figura 1.3 Estator con embobinado y cables conectados.



Figura 1.4 Estator ensamblado en el frame.

Ensamble final: El último paso consiste en ensamblar el rotor en el estator, colocar baleros en flecha, tapas, ventilador, caja de conexiones etc. (Fig. 1.5). Posteriormente se realizan las pruebas de rutina, entre las que se encuentran las pruebas de vibración, después se pinta el motor de acuerdo al modelo y por último se le realiza una inspección final previo al empaque (Fig. 1.6).

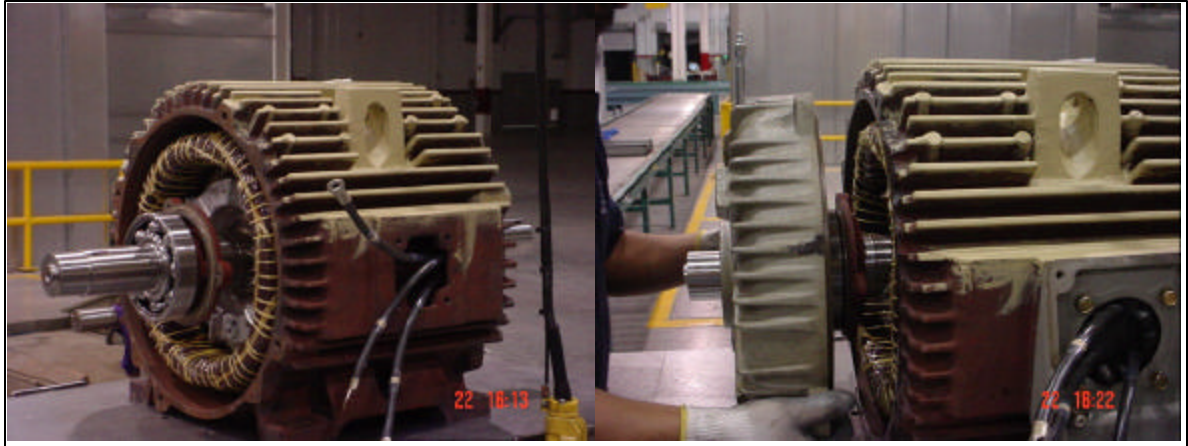


Figura 1.5 Ensamble final del motor.



Figura 1.6 Producto terminado.

1.4 Estrategias a seguir para resolver la problemática

La estrategia a seguir para resolver la problemática se dividió en tres etapas, la primera consiste en definir la problemática actual y que es lo que se pretende lograr, posteriormente determinar las variables (factores), niveles y rangos, determinar la variable de respuesta y por último seleccionar el diseño experimental.

La segunda etapa consiste en Realizar el experimento, analizar estadísticamente los datos obtenidos y realizar pruebas confirmatorias.

Por último en la tercera etapa se darán a conocer las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

1.5 Organización del contenido del presente trabajo

El presente trabajo aborda la aplicación del diseño de experimentos para conocer y entender el comportamiento de las variables que intervienen en la vibración de motores eléctricos y poder manipularlas para lograr una mejora en el proceso, en el capítulo dos revisaremos algunos conceptos teóricos relacionados con el diseño experimental utilizado para resolver la problemática planteada. También se abordarán temas relacionados con la planeación y ejecución del experimento. En el tercer capítulo revisaremos la información obtenida y se emitirán recomendaciones para realizar la corrida confirmatoria, por último revisaremos y analizaremos la información obtenida de la corrida confirmatoria y se reportarán los beneficios obtenidos. En el cuarto y último capítulo se hará un breve repaso de la experimentación completa y se darán a conocer las conclusiones y recomendaciones, también se plantearán los proyectos a futuro que se realizarán en la empresa.

Capítulo 3 Análisis estadístico del experimento.

El objetivo de éste capítulo es revisar los resultados obtenidos de la experimentación, dar recomendaciones para realizar la corrida de confirmación, revisar los resultados obtenidos de la corrida de confirmación y por último reportar los beneficios obtenidos.

3.1 Anova (Análisis de la varianza)

En las tablas 1 a 5 del anexo 1 se resume el análisis de varianza para cada uno de los puntos de prueba. Se puede observa que no existe un valor de F y P, tampoco se puede hacer un análisis para verificar los supuestos de los residuales (MSE = 0) esto es debido a que es un diseño de experimentos fraccionado, por lo tanto nos guiaremos con los gráficos de probabilidad normal de las estimaciones de los efectos para revisar cuales son significativos.

Las figuras 3.1 a 3.5 son gráficos de probabilidad normal y paretos de las estimaciones de los efectos para cada punto de prueba, podemos observar que solo existen efectos significativos en el punto Horizontal ODE, estos efectos son AB y BC (interacción Alineación Estator-Balaceo y Balanceo-Montaje de Baleros).

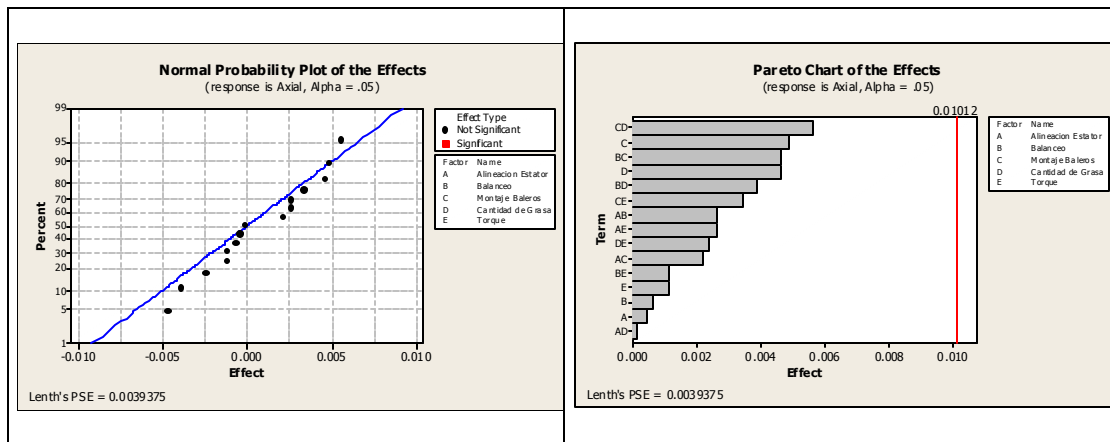


Figura 3.1 Gráfico de probabilidad normal y pareto de las estimaciones de los efectos del punto Axial.

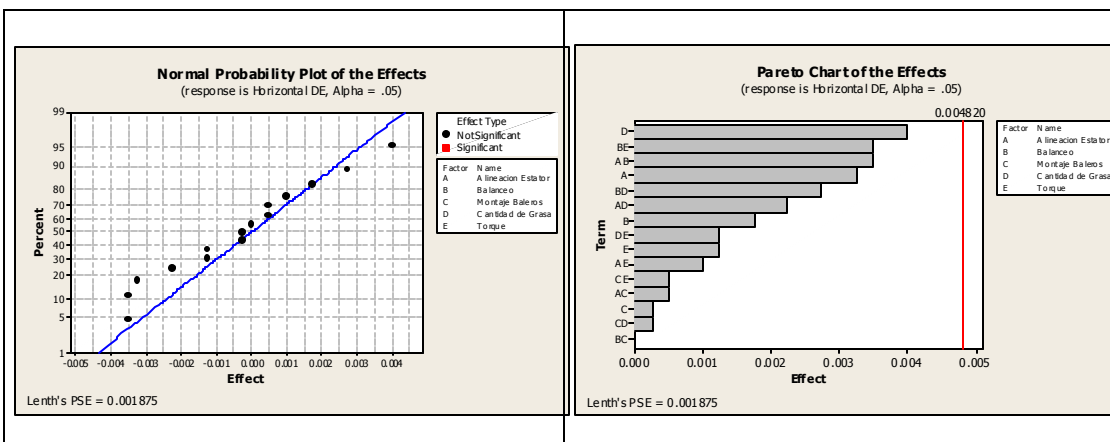


Figura 3.2 Gráfico de probabilidad normal y pareto de las estimaciones de los efectos del punto Horizontal DE.

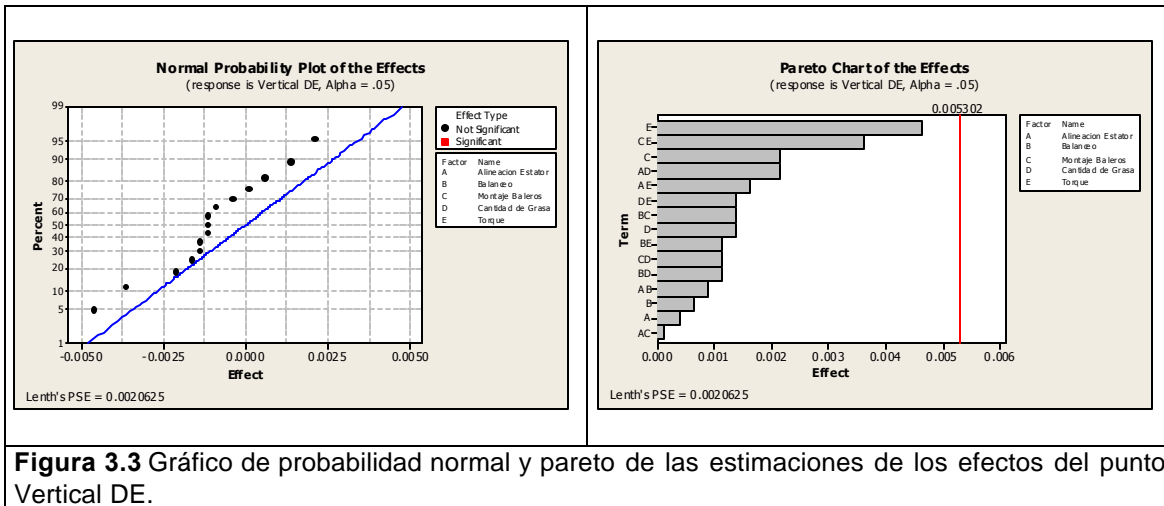


Figura 3.3 Gráfico de probabilidad normal y pareto de las estimaciones de los efectos del punto Vertical DE.

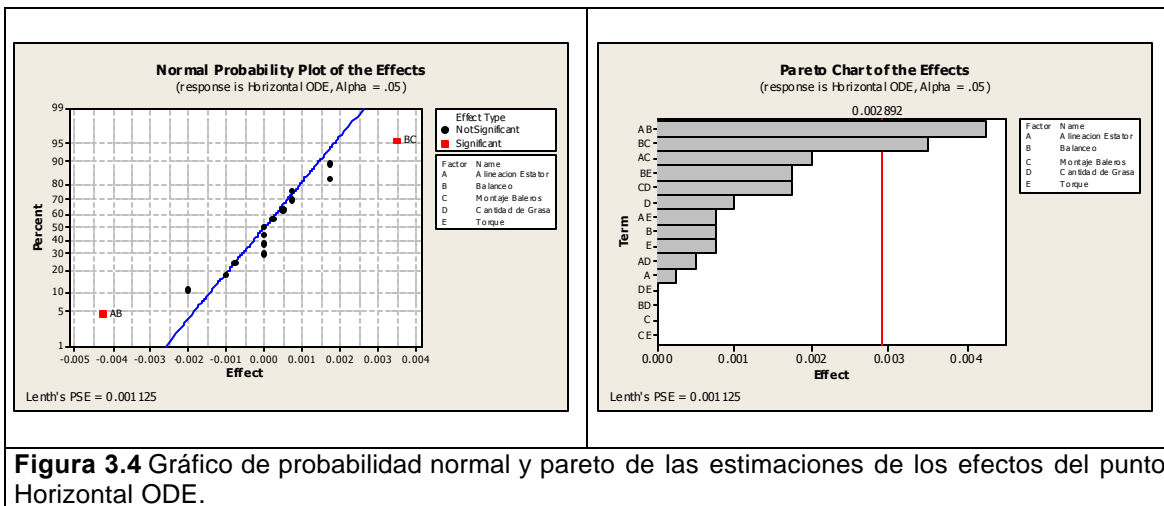


Figura 3.4 Gráfico de probabilidad normal y pareto de las estimaciones de los efectos del punto Horizontal ODE.

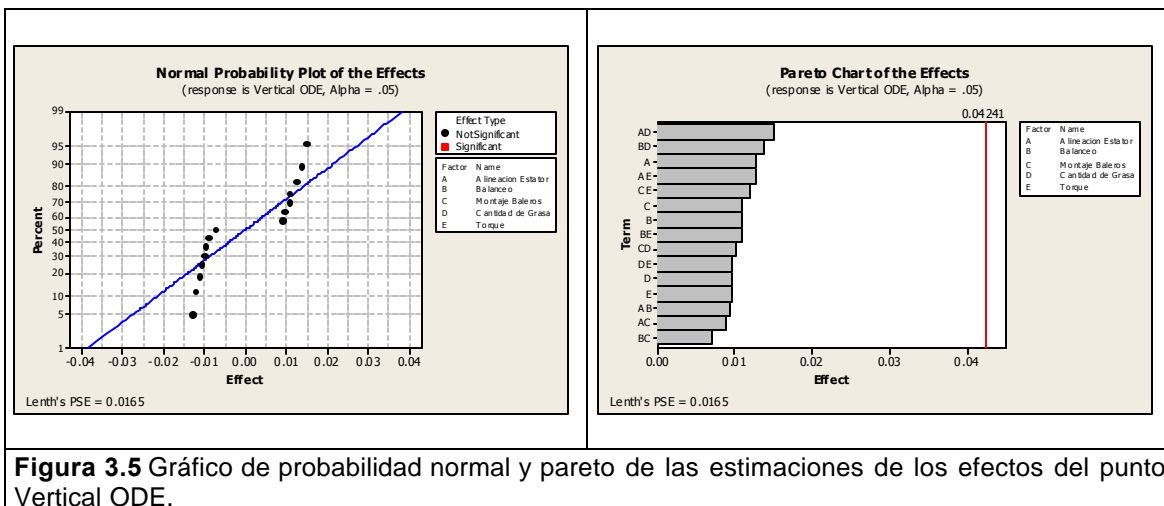


Figura 3.5 Gráfico de probabilidad normal y pareto de las estimaciones de los efectos del punto Vertical ODE.

3.2 Resultados

Puesto que ambas interacciones AB y BC incluyen un efecto principal se procede a realizar un análisis de varianza para el modelo con los factores A, B, C, AB y BC, el análisis se muestra en la tabla 3.1. Este es un diseño factorial completo 2^3 , es recomendable examinar los gráficos de efectos principales y efectos dobles.

Si observamos en la tabla 3.1 el P-valor de los efectos principales y de las interacciones podemos encontrar que los únicos valores que “no” superan el valor de α (nivel de significancia = 0.05) son las interacciones AB y BC por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, recordar que si el P-valor $> \alpha$ se acepta H_0 .

H_0 : Todas las medias de los niveles altos y bajos del factor en cuestión son iguales (No significativo)

H_1 : Al menos una media del nivel alto del factor en cuestión es diferente a la media del nivel bajo (Significativo).

Factorial Fit: Horizontal O versus Alineacion E, Balanceo, Montaje Bale						
Estimated Effects and Coefficients for Horizontal ODE (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T		
Constant		0.014375	0.000515	27.89		
Alineacion Estator	0.000250	0.000125	0.000515	0.24		
Balanceo	0.000750	0.000375	0.000515	0.73		
Montaje Baleros	-0.000000	-0.000000	0.000515	-0.00		
Alineacion Estator*Balanceo	-0.004250	-0.002125	0.000515	-4.12		
Alineacion Estator*Montaje Baleros	-0.002000	-0.001000	0.000515	-1.94		
Balanceo*Montaje Baleros	0.003500	0.001750	0.000515	3.40		
Alineacion Estator*Balanceo*Montaje Baleros	0.000000	0.000000	0.000515	0.00		
Term					P	
Constant					0.000	
Alineacion Estator					0.814	
Balanceo					0.488	
Montaje Baleros					1.000	
Alineacion Estator*Balanceo					0.003	←
Alineacion Estator*Montaje Baleros					0.088	
Balanceo*Montaje Baleros					0.009	←
Alineacion Estator*Balanceo*Montaje Baleros					1.000	
S = 0.00206155 R-Sq = 80.43% R-Sq(adj) = 63.31%						
Analysis of Variance for Horizontal ODE (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.00000250	0.00000250	0.00000083	0.20	0.896
2-Way Interactions	3	0.00013725	0.00013725	0.00004575	10.76	0.004
3-Way Interactions	1	0.00000000	0.00000000	0.00000000	*	*
Residual Error	8	0.00003400	0.00003400	0.00000425		
Pure Error	8	0.00003400	0.00003400	0.00000425		
Total	15	0.00017375				
Effects Plot for Horizontal ODE						
Effects Pareto for Horizontal ODE						
Alias Structure						
I						
Alineacion Estator						
Balanceo						
Montaje Baleros						
Alineacion Estator*Balanceo						
Alineacion Estator*Montaje Baleros						
Balanceo*Montaje Baleros						
Alineacion Estator*Balanceo*Montaje Baleros						

Tabla 3.1 análisis de varianza de los efectos A, B, C, AB y BC.

La figura 3.6 muestra gráficos de normalidad e histogramas de los residuales, también gráficos de residuales Vs. Valores alimentados y residuales Vs. El orden de los datos. Podemos notar que se cumple con los supuestos de normalidad, aleatoriedad y amplitud de varianza. La gráfica del pareto de los efectos significativos se presenta en la figura 3.7, observe que solo son significativas las interacciones de los efectos AB y BC, esto sugiere encontrar los niveles adecuados para optimizar el proceso.

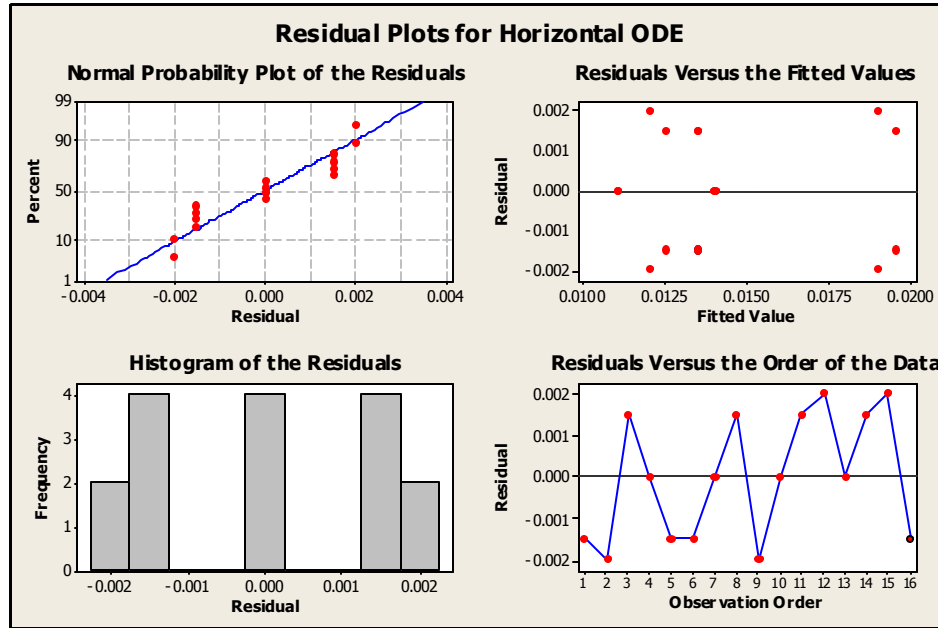


Figura 3.6 Gráficos de probabilidad normal y aleatoriedad de residuales.

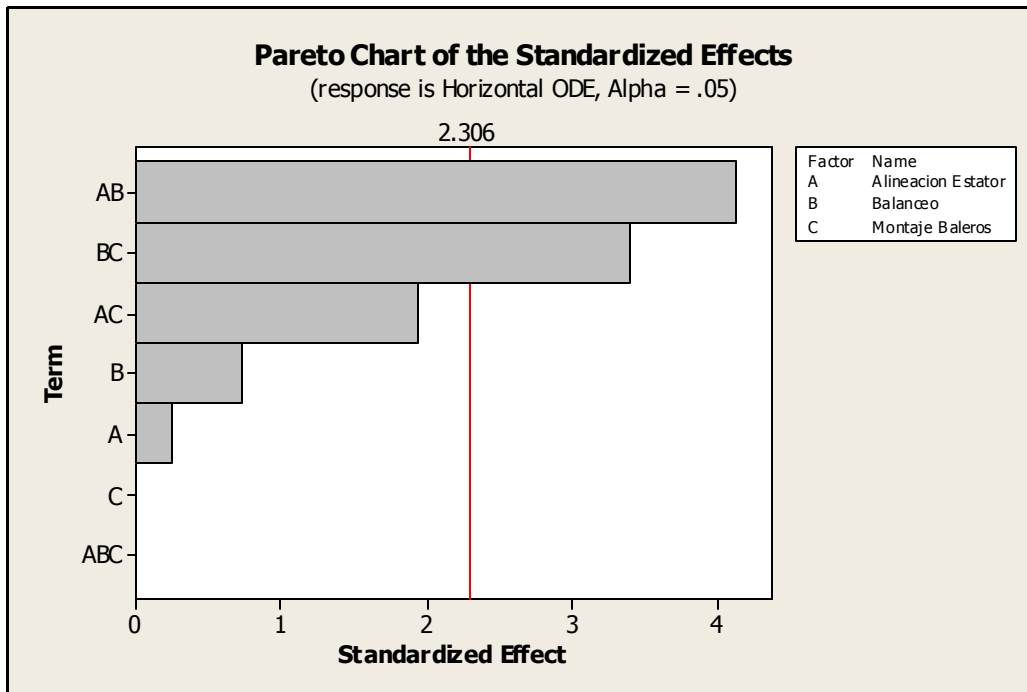


Figura 3.7 Gráfico pareto de las estimaciones de los efectos principales.

En la figura 3.8 se muestra la proyección de este diseño 2^{5-1}_V en dos replicas de un diseño 2^3 en los factores A, B y C. La mejor estimación de las condiciones de operación para minimizar la vibración es A en el nivel bajo, B en el nivel bajo y C en el nivel alto. También se muestran gráficos de los efectos principales (Fig. 3.9) y sus interacciones (Fig. 3.10), observe que el montaje de baleros por si solo no tiene un impacto profundo en la variabilidad.

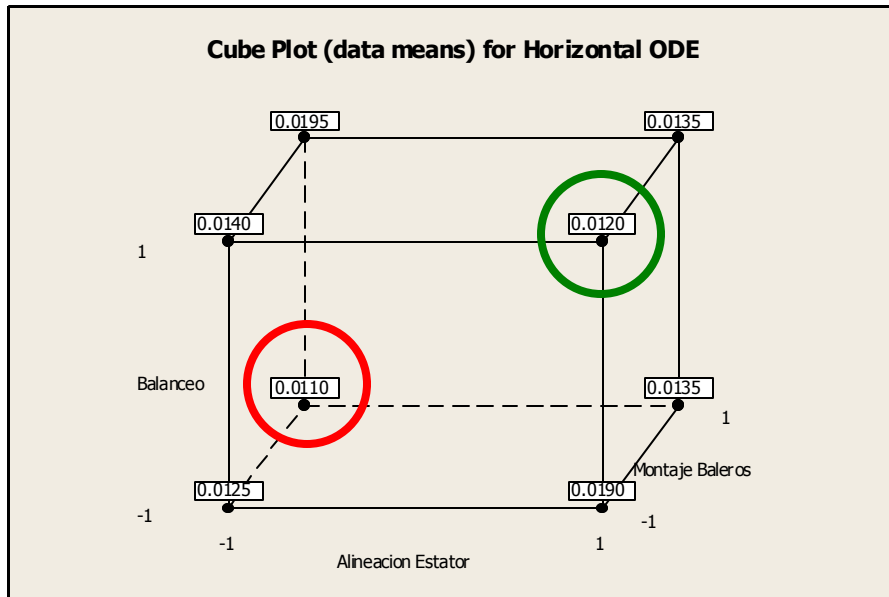


Figura 3.8 El diseño 2^{5-1}_V proyectado en dos réplicas de un diseño 2^3 en los factores A, B y C.

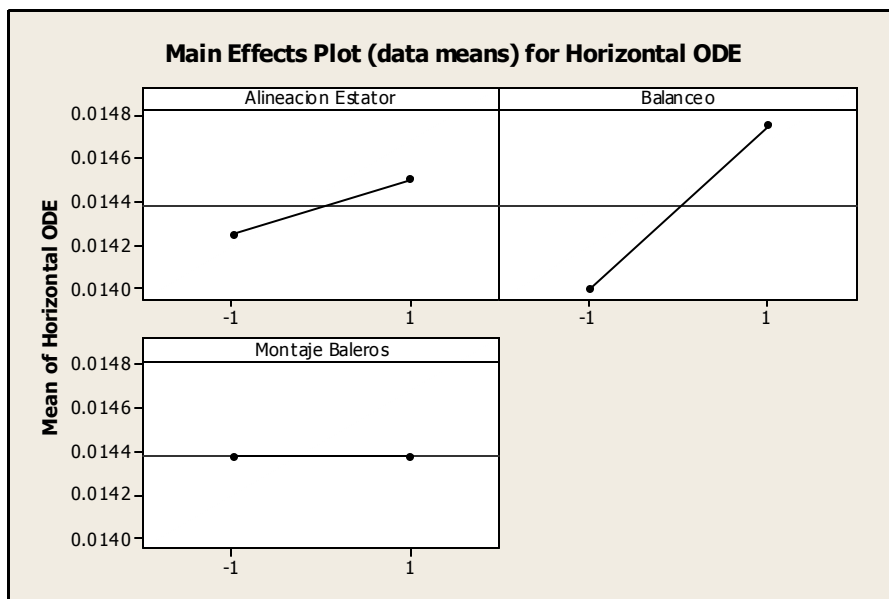


Figura 3.9 Gráfico de los efectos principales A, B y C del diseño 2^3 .

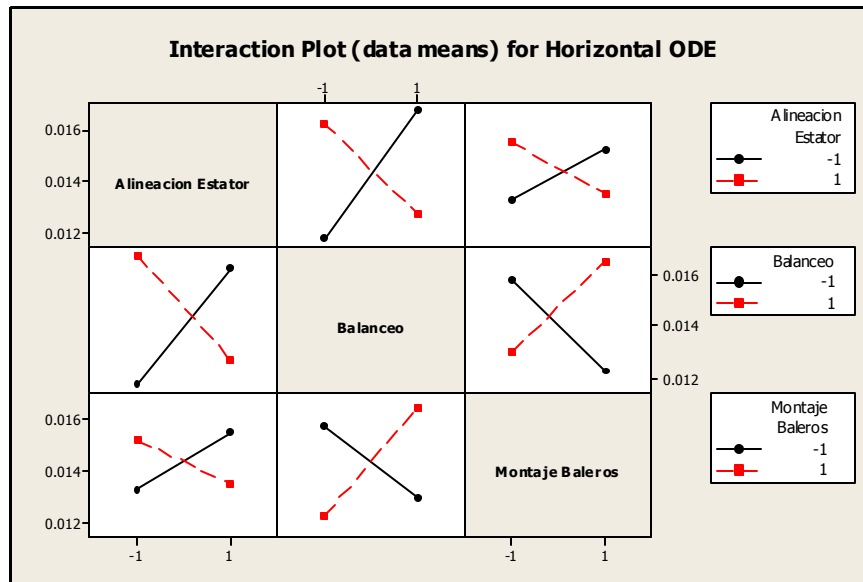


Figura 3.10 Gráfico de las interacciones AB, BC y AC para el diseño 2^3 proyectado.

3.3 Recomendaciones

Retomando la figura 3.8 podemos observar que los niveles de las variables que minimizan la vibración son:

- A (Alineación Estator): Nivel Bajo
- B (Balanceo): Nivel Bajo
- C (Montaje de Baleros): Nivel Alto

Esta combinación de niveles da un promedio de medias igual a 0.0110 pulg/seg por debajo de 0.04 pulg/seg que es el límite máximo de especificación, sin embargo al revisar los resultados con el gerente de manufactura y el personal involucrado se llegó a la conclusión de que operativamente no es práctico trabajar con esos niveles debido a que se invertiría mucho tiempo en balancear los rotores y muy probablemente sería necesaria la ayuda de otro operador para lograr sacar la producción. Por tal motivo se decidió encontrar un punto que aunque no minimice la vibración al nivel mas bajo, se obtengan costos de operación y niveles de vibración bajos.

El punto mas adecuado en base a estas apreciaciones es el delimitado por:

- A (Alineación estator): Nivel Alto.
- B (Balanceo): Nivel Alto.
- C (Montaje de Baleros): Nivel Bajo.

En la figura 3.08 se puede observar que el promedio de las medias para este punto es de 0.0120 pulg/seg que sigue estando por debajo del límite superior de especificación.

Para poder elegir las combinaciones mas recomendables de los factores D (cantidad de grasa) y E (torque), es necesario observar el comportamiento de su interacción con cada uno de los cinco puntos de prueba, esto nos ayudará a reducir la variabilidad y la dispersión; en las figuras 3.11 a 3.15 se presentan estas interacciones.

Observemos en la figura 3.11 que el torque a nivel bajo tiene un trazo mas horizontal (plano), esto representa que tiene menos variabilidad, en la figura 3.12 de nuevo encontramos que el torque a nivel bajo ofrece menos variabilidad al sistema; realizando un análisis similar para cada grafico (3.11 a 3.15) con los factores D y E se decidió tomar D a nivel bajo y E a nivel alto para completar la combinación de los 5 factores y poder correr los estudios confirmatorios.

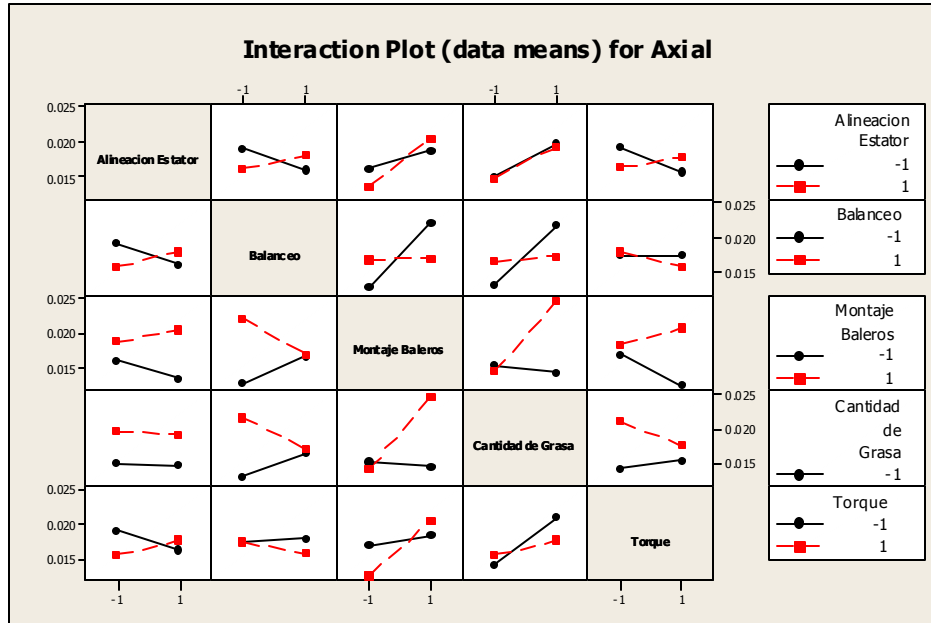


Figura 3.11 de efectos principales en el punto Axial.

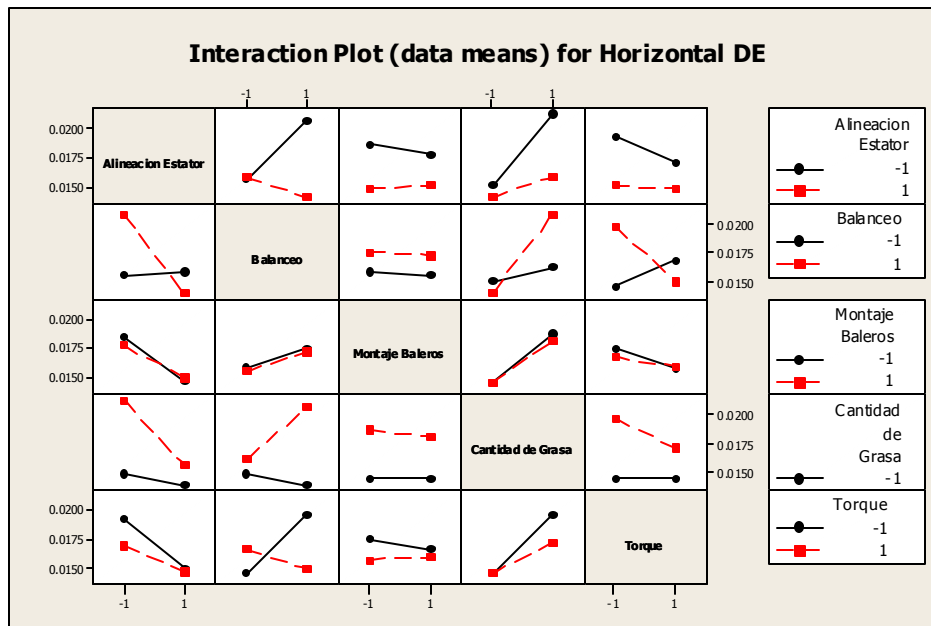


Figura 3.12 de efectos principales en el punto Horizontal DE.

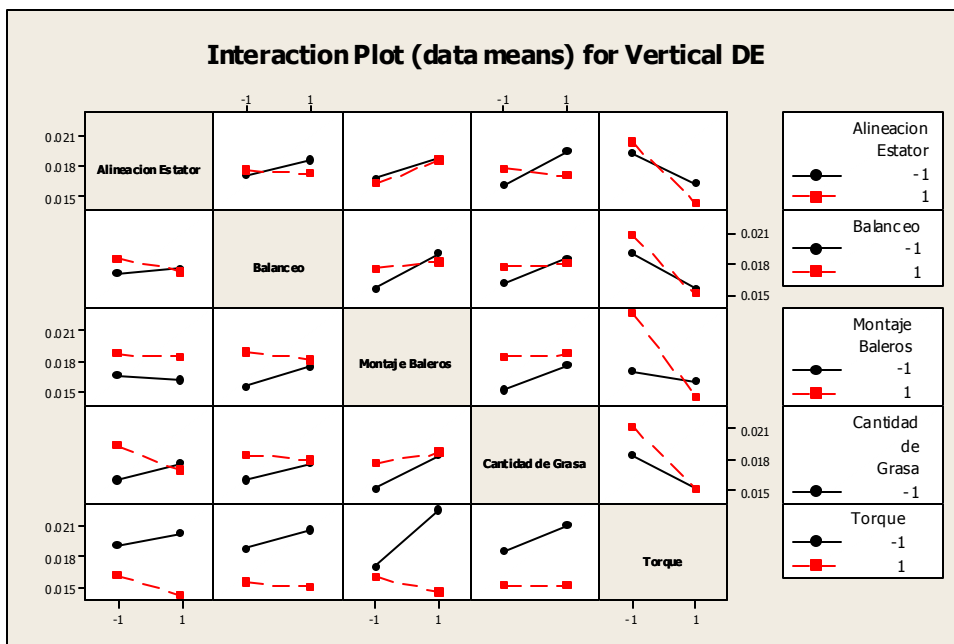


Figura 3.13 de efectos principales en el punto Vertical DE.

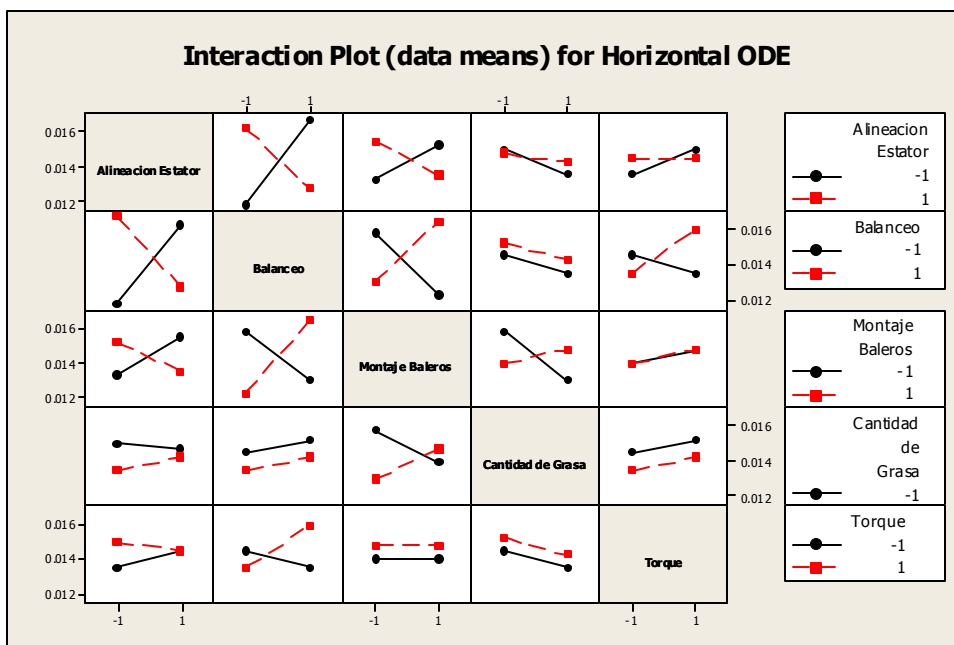


Figura 3.14 de efectos principales en el punto Horizontal ODE.

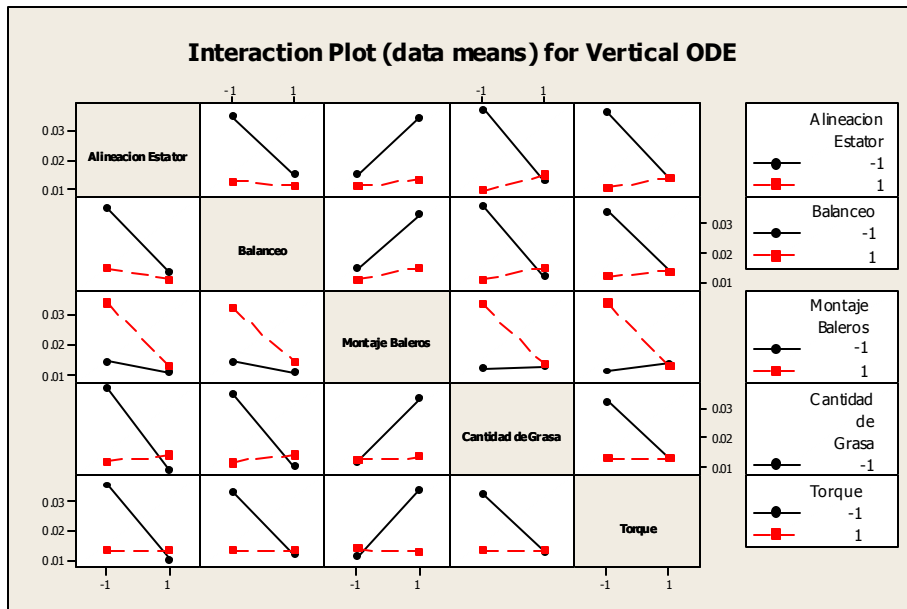


Figura 3.15 de efectos principales en el punto Vertical ODE.

3.4 Corrida de Confirmación.

Del análisis realizado en el punto 3.3 se determinó la combinación de niveles de los factores para realizar la corrida de confirmación, es importante recalcar que la combinación de niveles elegidos para los puntos A, B y C se eligieron en coordinación con el personal involucrado en la operación y no corresponden a la combinación que minimiza la vibración ya que operativamente no es práctico operar bajo esas condiciones.

La corrida de confirmación se realizará con la siguiente combinación de Factores:

- Alineación estator “**A**”: Nivel Alto
- Balanceo “**B**”: Nivel Alto
- Montaje de Baleros “**C**”: Nivel Bajo
- Cantidad de Grasa “**D**”: Nivel Bajo
- Torque “**E**”: Nivel Alto

Previo a la corrida se reunió al personal involucrado para darles una capacitación en donde se les presentó el resultado del experimento y los nuevos niveles a los que se debería trabajar durante un mes y así obtener los resultados del estudio confirmatorio. En la tabla 3.2 se muestran los niveles de operación y el resultado de vibración de las pruebas de los 20 motores producidos en el período.

Alineación Estator	Balaceo	Montaje Baleros	Cantidad de Grasa	Torque	No. serie	Axial	Horizontal DE	Vertical DE	Horizontal ODE	Vertical ODE
1	1	-1	-1	1	WWFT254A02	0.024	0.025	0.021	0.017	0.017
1	1	-1	-1	1	WWFT253C09	0.021	0.025	0.025	0.018	0.014
1	1	-1	-1	1	WWFT254A04	0.012	0.021	0.018	0.021	0.015
1	1	-1	-1	1	WWFT257B02	0.012	0.025	0.024	0.028	0.018
1	1	-1	-1	1	WWFT253A07	0.019	0.024	0.03	0.02	0.017
1	1	-1	-1	1	WWFT257B04	0.039	0.023	0.023	0.019	0.012
1	1	-1	-1	1	WWFT257B05	0.019	0.028	0.029	0.019	0.018
1	1	-1	-1	1	WWFT254A03	0.017	0.021	0.033	0.019	0.022
1	1	-1	-1	1	WWFT254B03	0.014	0.015	0.012	0.014	0.012
1	1	-1	-1	1	WWFT257B01	0.021	0.015	0.017	0.012	0.015
1	1	-1	-1	1	WWFT258C02	0.021	0.011	0.012	0.017	0.021
1	1	-1	-1	1	WWFT258C01	0.021	0.02	0.026	0.017	0.016
1	1	-1	-1	1	WWFT260C04	0.018	0.022	0.023	0.014	0.018
1	1	-1	-1	1	WWFT261C02	0.017	0.017	0.02	0.016	0.016
1	1	-1	-1	1	WWFT264B01	0.031	0.013	0.022	0.016	0.015
1	1	-1	-1	1	WWFT264C01	0.031	0.021	0.016	0.019	0.012
1	1	-1	-1	1	WWFT266A04	0.035	0.015	0.017	0.017	0.013
1	1	-1	-1	1	WWFT258B01	0.027	0.012	0.023	0.017	0.017
1	1	-1	-1	1	WWFT265B01	0.016	0.018	0.019	0.016	0.011
1	1	-1	-1	1	WWFT265B02	0.028	0.015	0.021	0.026	0.018

Tabla 3.2 Resultados de vibración del estudio confirmatorio.

Con los resultados obtenidos del estudio confirmatorio se procedió a realizar pruebas de normalidad para cada punto de prueba (Figuras 3.16 a 3.20), podemos observar que el punto “Horizontal ODE” tiene un p-valor menor a 0.05 para la prueba Anderson-Darling, lo que significa que no se ajusta a una normal, sin embargo la campana es muy similar a la de una normal. Los demás puntos de prueba tienen un p-valor por arriba del α (0.05) por lo tanto se ajustan a una normal.

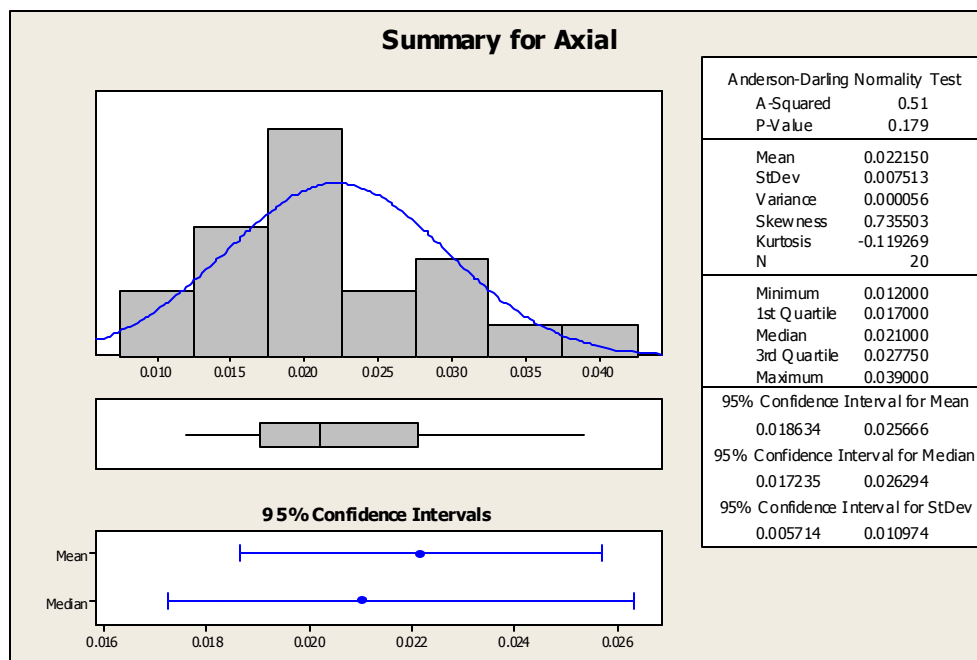


Figura 3.16 prueba de normalidad para los resultados del experimento confirmatorio del punto de prueba Axial.

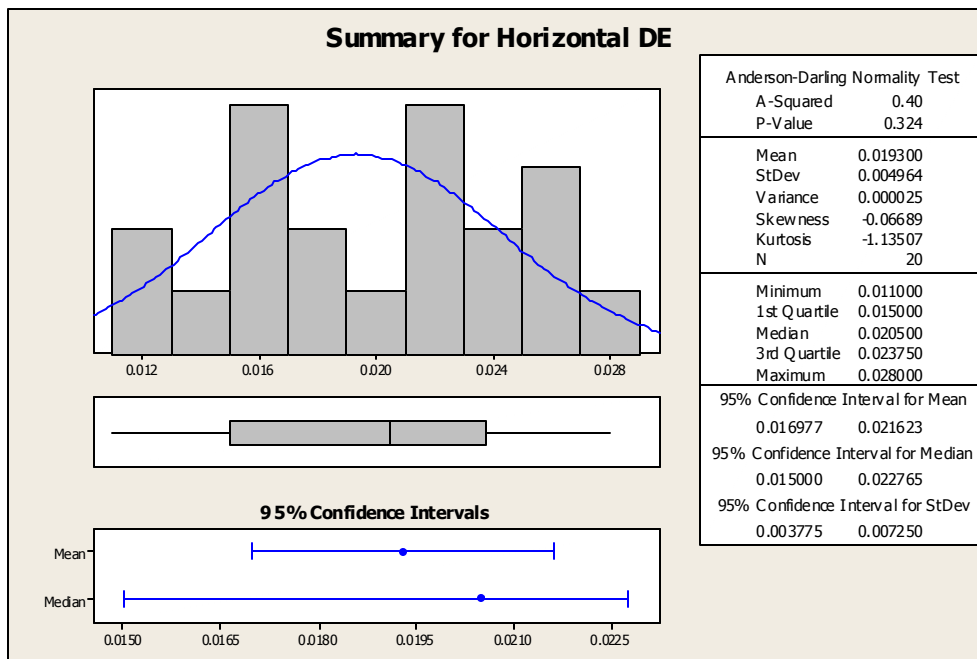


Figura 3.17 prueba de normalidad para los resultados del experimento confirmatorio del punto de prueba Horizontal DE.

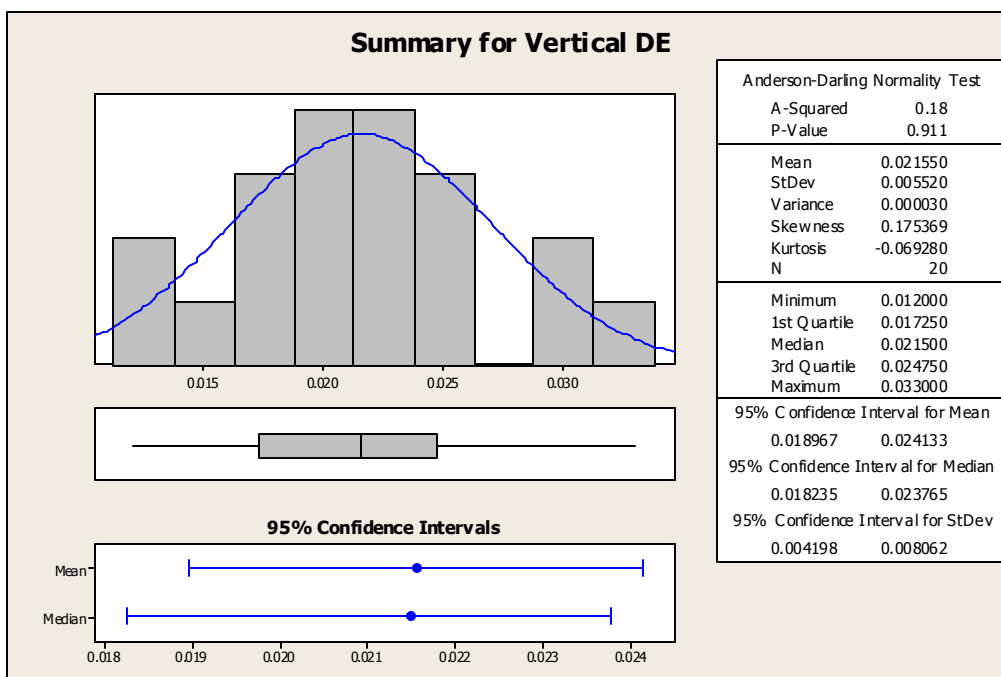


Figura 3.18 prueba de normalidad para los resultados del experimento confirmatorio del punto de prueba Vertical DE.

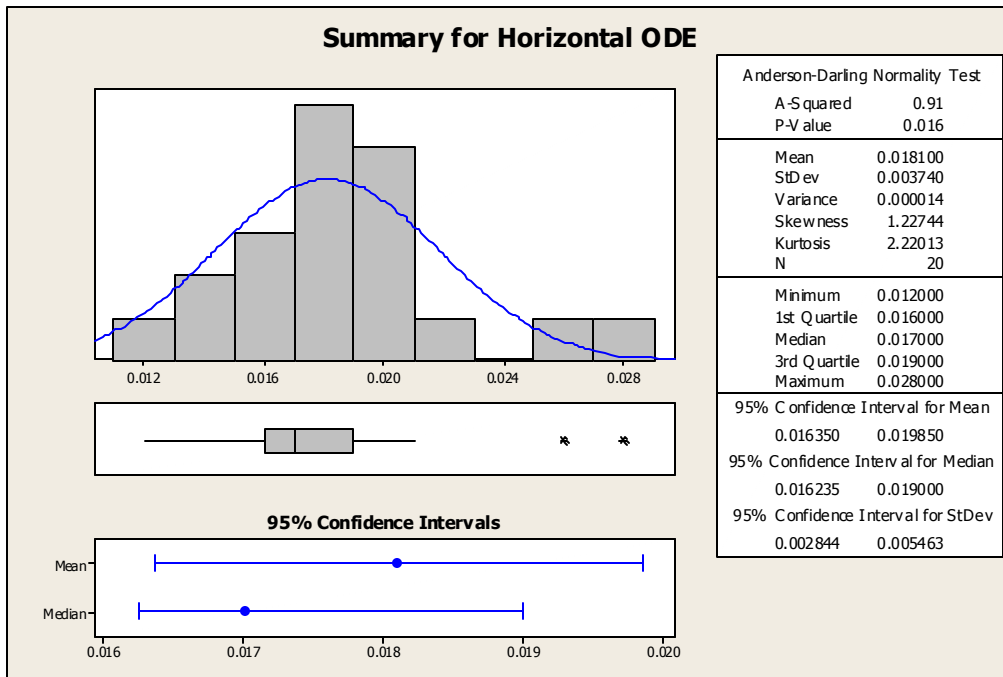


Figura 3.19 prueba de normalidad para los resultados del experimento confirmatorio del punto de prueba Horizontal ODE.

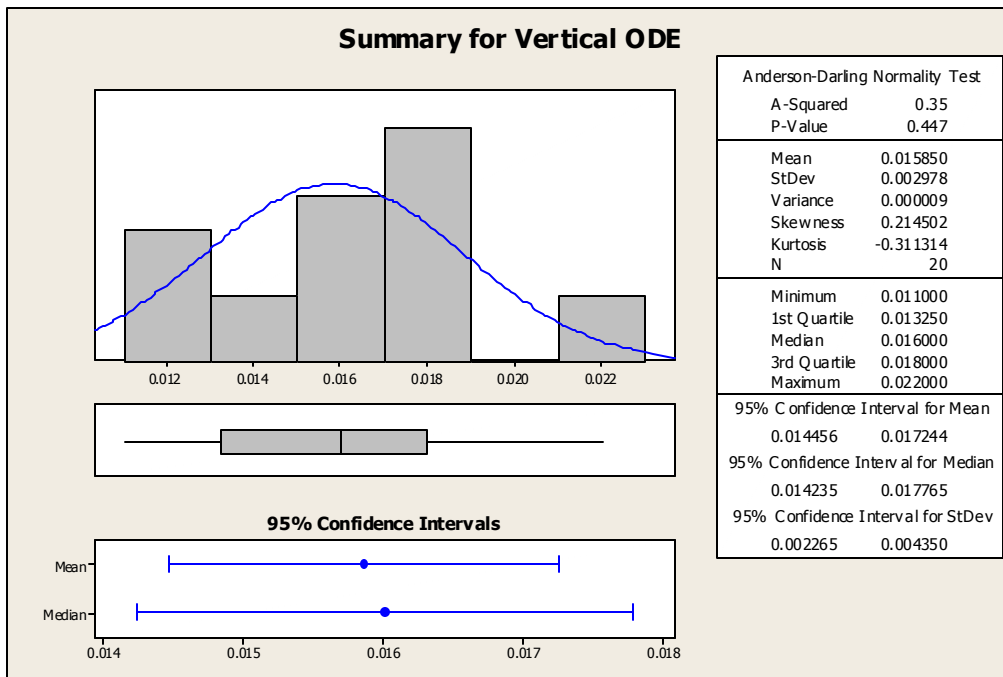


Figura 3.20 prueba de normalidad para los resultados del experimento confirmatorio del punto de prueba Vertical ODE.

En la tabla 3.3 se puede ver el análisis de correlación para los cinco puntos de prueba, podemos observar que el p-valor para el punto Vertical DE y el punto Horizontal DE es menor que α (0.05) por lo tanto esto indica que si existe correlación entre estos 2 puntos de prueba.

Correlations: Axial, Horizontal DE, Vertical DE, Horizontal ODE, Vertical ODE				
	Axial	Horizontal D	Vertical DE	Horizontal O
Horizontal D	-0.224 0.342			
Vertical DE	-0.091 0.703	0.589 0.006		
Horizontal O	-0.057 0.812	0.336 0.148	0.298 0.202	
Vertical ODE	-0.305 0.191	0.035 0.883	0.428 0.060	0.271 0.248
Cell Contents: Pearson correlation P-Value				

Tabla 3.3 Análisis de correlación de los efectos principales A, B, C, D y E.

Los intervalos de tolerancia para cada punto de prueba se muestran en la tabla 3.4 con valor de gamma igual a 0.99 y $\alpha = 0.01$. El límite de tolerancia es tomado solo para un lado debido a que solo tenemos límite superior de especificación, este se halla por medio de tablas (Anexo 2); con los datos de gamma, α , y $n = 20$, el valor encontrado es de 3.832 [3].

n = 20, gamma = 0.99 , 1-a = 0.99, límite de tolerancia un lado = 3.832			
Punto de prueba	Media	St Dev	Intervalo
Vertical ODE	0.01585	0.002978	0.027261696
Horizontal ODE	0.0181	0.00374	0.03243168
Vertical DE	0.02155	0.00552	0.04270264
Horizontal DE	0.0193	0.004964	0.038322048
Axial	0.02215	0.007513	0.050939816

Tabla 3.4 Cálculo del intervalo de tolerancia para cada punto de prueba.

La interpretación de la tabla 3.4 se presenta a continuación:

Hay un 99 % de confianza de que el 99 % de los motores estén por debajo de **0.02726** en la prueba de vibración del punto **Vertical ODE**.

Hay un 99 % de confianza de que el 99 % de los motores estén por debajo de **0.03243** en la prueba de vibración del punto **Horizontal ODE**.

Hay un 99 % de confianza de que el 99 % de los motores estén por debajo de **0.04270** en la prueba de vibración del punto **Vertical DE**.

Hay un 99 % de confianza de que el 99 % de los motores estén por debajo de **0.03832** en la prueba de vibración del punto **Horizontal DE**.

Hay un 99 % de confianza de que el 99 % de los motores estén por debajo de **0.05093** en la prueba de vibración del punto **Axial**.

Del análisis anterior podemos concluir que en los puntos Vertical DE y Axial existe probabilidad de encontrar niveles de vibración por arriba del límite de especificación que es de 0.04 pulg/seg.

La probabilidad estimada de encontrar motores con vibración por arriba de 0.04 pulg/seg en cada uno de los puntos de prueba se presenta en la siguiente tabla (3.5):

PUNTO	X	media	desv. Est		Prob. X > 0.04	10,000
VERTICAL ODE	0.04	0.01585	0.002978	1.00000	0.00000	0.00000
HRIZONTAL ODE	0.04	0.0181	0.00374	1.00000	0.00000	0.00002
VERTICAL DE	0.04	0.02155	0.00552	0.99958	0.00042	4.15355
HORIZONTAL DE	0.04	0.0193	0.004964	0.99998	0.00002	0.15238
AXIAL	0.04	0.02215	0.007513	0.99125	0.00875	87.53522

Tabla 3.5 Probabilidad estimada de encontrar motores por arriba de 0.04 pul/seg.

Podemos observar que la probabilidad estimada de encontrar motores con vibración por arriba de 0.04 pulg/seg para los puntos Vertical DE y Axial es de 0.00042 y 0.00875 respectivamente, lo que significa que existe la probabilidad de que por cada diez mil motores fabricados 5 motores tendrán problemas de vibración para el punto Vertical DE y 88 motores tendrán problemas de vibración para el punto Axial.

En la tabla 3.6 podemos encontrar datos históricos de pruebas de vibración del mismo tipo de motores previos a la realización del experimento; en la tabla 3.7 encontramos la probabilidad estimada de encontrar motores con vibración por arriba de 0.04 pulg/seg para cada uno de los puntos de prueba de los datos históricos.

No. de Serie	Axial	Horizontal DE	Vertical DE	Horizontal ODE	Vertical ODE
TWFT167A10	0.025	0.02	0.017	0.02	0.021
TWFT159B01	0.023	0.014	0.016	0.015	0.014
TWFT154B04	0.028	0.014	0.013	0.015	0.015
TWFT159A03	0.02	0.014	0.016	0.025	0.016
TWFT154B05	0.037	0.018	0.019	0.024	0.018
TWFT154B02	0.018	0.017	0.015	0.019	0.011
TWFT154A02	0.022	0.013	0.018	0.022	0.015
TWFT153C01	0.035	0.016	0.018	0.025	0.023
TWFT168A01	0.013	0.014	0.019	0.015	0.016
TWFT180A03	0.012	0.014	0.015	0.021	0.015
TWFT168A04	0.028	0.026	0.019	0.019	0.018
TWFT174C01	0.01	0.016	0.015	0.017	0.016
TWFT174B01	0.021	0.027	0.029	0.016	0.012
TWFT174A05	0.012	0.015	0.014	0.014	0.02
TWFT174A03	0.02	0.028	0.024	0.018	0.017
TWFT168A03	0.032	0.019	0.019	0.011	0.023
TWFT180B02	0.022	0.019	0.016	0.014	0.013
SWFT134C03	0.025	0.027	0.022	0.031	0.017
SWFT134B10	0.02	0.024	0.021	0.019	0.012
SWFT133C04	0.021	0.026	0.024	0.02	0.024
SWFT134B01	0.018	0.017	0.016	0.014	0.013
SWFT133C02	0.011	0.011	0.013	0.013	0.012
SWFT133C01	0.039	0.014	0.023	0.014	0.019
SWFT133B03	0.017	0.018	0.022	0.013	0.014
SWFT126B07	0.034	0.029	0.028	0.025	0.029
SWFT133A03	0.038	0.019	0.019	0.015	0.015
SWFT126C04	0.03	0.03	0.03	0.021	0.022
SWFT146B04	0.002	0.002	0.027	0.022	0.023
Promedio	0.023	0.019	0.020	0.018	0.017
Desv.est.	0.00932	0.00648	0.00484	0.00476	0.00445

Tabla 3.6 Datos históricos de pruebas de vibración de mayo y junio del 2004.

PUNTO	X	media	dev. Est		Prob. X > 0.04	10,000
VERTICAL ODE	0.04	0.01725	0.004452423	1.00000	0.00000	0.00162
HRIZONTAL ODE	0.04	0.018464286	0.004756922	1.00000	0.00000	0.02991
VERTICAL DE	0.04	0.019535714	0.00484181	0.99999	0.00001	0.11871
HORIZONTAL DE	0.04	0.018607143	0.006476964	0.99952	0.00048	4.78486
AXIAL	0.04	0.022607143	0.009318795	0.96901	0.03099	309.90717

Tabla 3.7 Probabilidad estimada de encontrar motores por arriba de 0.04 pulg/seg de datos históricos.

Podemos observar que en los datos históricos la probabilidad estimada de encontrar motores con vibración por arriba de 0.04 pulg/seg para los puntos Horizontal DE y Axial es de 0.00048 y 0.03099 respectivamente, lo que significa que existe la probabilidad de que por cada diez mil motores fabricados 5 motores tendrán problemas de vibración para el punto Horizontal DE y 310 motores tendrán problemas de vibración para el punto Axial.

3.5 Beneficios obtenidos

Del análisis anterior concluimos que existe una notable reducción en las probabilidades estimadas de encontrar motores con vibración por arriba del límite de especificación, este es un indicador de que la combinación de niveles elegido dará buenos resultados al ser implementados.

Operando el balanceo de los rotores a un nivel de 2gr (nivel alto) obtenemos una importante reducción en el tiempo de procesamiento⁽¹⁾ de estas piezas, esta reducción va de 18 a 5 minutos en promedio, lo que implica una disminución en la media de 13 minutos del tiempo de procesamiento por pieza.

Actualmente el plan de producción es de aproximadamente 75 motores por semana, en la empresa se trabajan solamente 4 días a la semana en turnos de 12 horas (19 motores por día), el tiempo de preparación y el tiempo de acabado de la pieza es de 7 y 5 minutos en promedio respectivamente, sumándole los 18 minutos que tarda el balanceo da un total de 30 minutos para procesar cada pieza, por lo tanto ocupamos un total de 9.5 horas para poder sacar la producción a tiempo. En total se tienen 11 horas útiles de trabajo; el pronóstico de producción para el 2005 es de 110 motores por semana (dato tomado de la planeación estratégica de la empresa para el 2005), si se continuara trabajando con los tiempos actuales ocuparíamos procesar 30 motores en promedio por día, lo que implicarían 15 horas de trabajo, el beneficio que obtenemos en la reducción del tiempo de procesamiento de los rotores es que con el mismo operador se podría cumplir con el plan de producción del 2005 ya que el tiempo para procesar cada pieza sería de 17 minutos (7 de preparación, 5 del balanceo y 5 de acabado), de otra manera se tendría que contratar otro operador para el segundo turno lo que implicaría un costo estimado⁽²⁾ de 11,000 USD.

Notas:

(1) Los datos de tiempos promedios de procesamiento en el balanceo de los rotores fueron obtenidos de los datos históricos de la empresa.

(2) El costo estimado que implica la contratación de un operador para desempeñar funciones en el área de balanceo para el segundo turno fue proporcionado por el departamento de manufactura, este costo incluye todos los gastos en que puede incurrir dicho operador, tales como gastos de transportación, alimentación, equipo de seguridad, sueldo, etc.

Capítulo 4 Conclusiones y recomendaciones.

4.1 Resumen

Las técnicas del diseño experimental basadas en la estadística son particularmente útiles en el mundo de la ingeniería en lo que toca a la mejora del rendimiento de los procesos de manufactura. En el presente trabajo fue posible identificar que factores intervienen en la prueba final de vibración de motores eléctricos mediante el empleo del diseño de experimentos, el diseño seleccionado fue un diseño factorial fraccionado 2^{k-1} . En total se utilizaron 5 factores, por lo tanto el diseño obtenido es de resolución V, y se expresa 2^{5-1}_V . Como mencionamos en el capítulo 2 para este diseño ningún efecto principal o interacción entre dos factores tiene alias con cualquier otro efecto principal o interacción entre dos factores, pero estas últimas tienen alias con interacciones entre tres factores, la identidad I = ABCDE.

En total se realizaron 16 pruebas con combinaciones de niveles altos (+) y bajos (-) de los siguientes factores:

- A) Alineación estator
- B) Balanceo
- C) Montaje de Baleros
- D) Cantidad de Grasa
- E) Torque.

En motores eléctricos, son 5 los puntos de prueba de vibración en donde se colocan sensores para obtener las lecturas y compararlas con la especificación, ninguna lectura debe estar por arriba de 0.04 pulg/seg, estos puntos de prueba son:

- Axial
- Horizontal Drive End
- Vertical Drive End
- Horizontal Over side Drive End
- Vertical Over side Drive End

Se realizaron análisis de varianzas para cada uno de los 5 puntos de prueba de vibración por medio de el paquete estadístico MINITAB 14, se pudo observar que solo salieron significativas las interacciones AB y BC, para el punto Horizontal ODE, por tal motivo se procedió a proyectar el diseño 2^{5-1}_V en 2 réplicas de un diseño 2^3 completo en los factores A, B y C. La mejor combinación de las condiciones de operación tomando en cuenta la opinión del equipo de trabajo involucrado en el estudio son A en el nivel alto (alineación estator), B en el nivel alto (balanceo) y C en el nivel bajo (montaje de baleros). Para definir los niveles de los factores D y E se ocuparon los gráficos de interacción del diseño fraccionado original quedando D a nivel bajo (cantidad de grasa) y E a nivel alto (torque).

La corrida de confirmación se realizó durante un mes de producción con los niveles seleccionados de los factores.

4.2 Conclusiones y Recomendaciones

El desarrollo del presente trabajo consistió en la aplicación del diseño de experimentos para investigar el comportamiento de las variables que intervienen en las pruebas finales de vibración de motores eléctricos.

Para poder llevar a cabo el diseño del experimento se tomaron en cuenta todos los factores implicados en la entrada, esto dio como resultado un diseño factorial completo con alto número de experimentos a realizar, por lo que se llegó a la conclusión de que sería in factible llevarlos a cabo por el alto costo y problemas de logística que implicaba para la empresa.

Para seleccionar los factores de entrada que se ocuparían para el diseño experimental, fue necesario estandarizar algunos de ellos en el proceso a los cuales se les llamó variables fijas, de esta manera quedó reducido de 10 a 5 factores, debido al alto número de experimentos que continuaba implicando realizar, se llegó a la conclusión de que un diseño experimental fraccionado era la mejor opción, en total se realizaron 16 pruebas experimentales.

Entre las variables fijas se encuentra la posición y nivelación del motor en la mesa, es importante asegurar que estas variables queden bien estandarizadas ya que un cambio en ellas podría nulificar los beneficios obtenidos en el presente trabajo, con respecto al resto de las variables fijas (alineación del rotor, air gap y run out), si las piezas no cumplen con la especificación correspondiente deberán ser desechadas.

Haciendo una comparación entre los datos históricos y los datos obtenidos en el estudio confirmatorio se observó que existe una notable disminución en la probabilidad estimada de encontrar motores con vibración por arriba del límite de especificación, por lo tanto concluimos que la combinación de niveles elegida es adecuada para minimizar los niveles actuales de vibración.

Existe una notable reducción en el tiempo promedio de procesamiento de los rotores ya que el tiempo promedio de balancear una pieza disminuyó en un 72 % al utilizar la combinación de niveles seleccionada.

La aportación del presente trabajo para la empresa en estudio es de alta importancia, puesto que con el desarrollo de un diseño de experimentos es posible conocer los factores que afectan a determinada prueba y manipularlos para mejorar los resultados; también será tomado como base para realizar otros proyectos a futuro.

4.3 Proyectos a Futuro

En el área de balanceo se pretende ampliar los límites de especificación ya que se pudo demostrar que trabajando a niveles de balanceo a nivel alto (2 gr) no existe una diferencia marcada en los resultados de vibración de los motores que cuando se trabaja a nivel bajo (300 mg), esto traerá como consecuencia una reducción importante en el tiempo de procesamiento de los rotores.

Se pretende hacer extensivas las condiciones nuevas de todos los modelos de motores fabricados en la empresa, excepto en los motores de 2 polos por presentar un comportamiento diferente ya que giran a mayor número de revoluciones por minuto.

Se realizará un diseño de experimento para los motores de 2 polos, se tomará como base el estudio realizado en el presente trabajo.

Se dará a conocer el estudio a las demás plantas productoras de motores del grupo para que tengan más conocimiento acerca de las variables que intervienen en las pruebas de vibración y motivarlos a que realicen este tipo de proyectos.

BIBLIOGRAFIA

- 1. Diseño y análisis de experimentos**
Douglas C. Montgomery
Editorial Limusa
Segunda edición 2004, México
- 2. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería**
Douglas C. Montgomery y George C. Runger
Editorial Mc. Graw Hill.
Primera edición 1996, México
- 3. Introduction to statistical quality control**
Douglas C. Montgomery
Editorial Wiley
Cuarta edición 2001, USA
- 4. Estadística para investigadores : introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos**
Box, George E. P.
Editorial Reverté
Tercera edición 1993, Barcelona
- 5. System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Cost**
G. Taguchi
Editorial White Plains
Primera edición 1991, New York:

ANEXO 1

Análisis de varianza para cada punto de prueba de vibración.

Analysis of Variance for Axial (coded units)							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Main Effects	5	0.0001878	0.0001878	0.00003756	*	*	
2-Way Interactions	10	0.0004186	0.0004186	0.00004186	*	*	
Residual Error	0	*	*	*			
Total	15	0.0006064					

Tabla 1 Análisis de varianza del punto Axial.

Analysis of Variance for Horizontal DE (coded units)							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Main Effects	5	0.0001250	0.0001250	0.00002500	*	*	
2-Way Interactions	10	0.0001610	0.0001610	0.00001610	*	*	
Residual Error	0	*	*	*			
Total	15	0.0002860					

Tabla 2 Análisis de varianza del punto Horizontal DE.

Analysis of Variance for Vertical DE (coded units)							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Main Effects	5	0.0001133	0.0001133	0.00002266	*	*	
2-Way Interactions	10	0.0001146	0.0001146	0.00001146	*	*	
Residual Error	0	*	*	*			
Total	15	0.0002279					

Tabla 3 Análisis de varianza del Vertical DE.

Analysis of Variance for Horizontal ODE (coded units)							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Main Effects	5	0.00000875	0.00000875	0.00000175	*	*	
2-Way Interactions	10	0.00016500	0.00016500	0.00001650	*	*	
Residual Error	0	*	*	*			
Total	15	0.00017375					

Tabla 4 Análisis de varianza del punto Horizontal ODE.

Analysis of Variance for Vertical ODE (coded units)							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Main Effects	5	0.002360	0.002360	0.0004719	*	*	
2-Way Interactions	10	0.005012	0.005012	0.0005012	*	*	
Residual Error	0	*	*	*			
Total	15	0.007371					

Tabla 5 Análisis de varianza del punto Vertical ODE.

Anexo 2

Pag. 763 Introduccion to statistical quality control
Montgomery

n	gamma = 0.90			gamma = 0.95			gamma = 0.99		
	1-alfa			1-alfa			1-alfa		
	0.9	0.95	0.99	0.9	0.95	0.99	0.9	0.95	0.99
3	4.258	5.31	7.34	6.158	7.655	10.552	***	***	***
4	3.187	3.957	5.437	4.163	5.145	7.042	***	***	***
5	2.742	3.4	4.666	3.407	4.202	5.741	***	***	***
6	2.494	3.091	4.242	3.006	3.707	5.062	4.408	5.409	7.334
7	2.333	2.894	3.972	2.755	3.399	4.641	3.856	4.73	6.411
8	2.219	2.755	3.783	2.582	3.188	4.353	3.496	4.287	5.811
9	2.133	2.649	3.641	2.454	3.031	4.143	3.242	3.971	5.389
10	2.065	2.568	3.532	2.355	2.911	3.981	3.048	3.739	5.075
11	2.012	2.503	3.444	2.275	2.815	3.852	2.897	3.557	4.832
12	1.966	2.448	3.371	2.21	2.736	3.747	2.773	3.41	4.633
13	1.928	2.403	3.31	2.155	2.67	3.659	2.677	3.29	4.472
14	1.895	2.363	3.257	2.108	2.614	3.585	2.592	3.189	4.336
15	1.866	2.329	3.212	2.068	2.566	3.52	2.521	3.102	4.224
16	1.842	2.299	3.172	2.032	2.523	3.463	2.458	3.028	4.124
17	1.82	2.272	3.136	2.001	2.486	3.415	2.405	2.962	4.038
18	1.8	2.249	3.106	1.974	2.453	3.37	2.357	2.906	3.961
19	1.781	2.228	3.078	1.949	2.423	3.331	2.315	2.855	3.893
20	1.765	2.208	3.052	1.926	2.396	3.295	2.275	2.807	3.832
21	1.75	2.19	3.028	1.905	2.371	3.262	2.241	2.768	3.776
22	1.736	2.174	3.007	1.887	2.35	3.233	2.208	2.729	3.727
23	1.724	2.159	2.987	1.869	2.329	3.206	2.179	2.693	3.68
24	1.712	2.145	2.969	1.853	2.309	3.181	2.154	2.663	3.638
25	1.702	2.132	2.952	1.838	2.292	3.158	2.129	2.632	3.601
30	1.657	2.08	2.884	1.778	2.22	3.064	2.029	2.516	3.446
35	1.623	2.041	2.833	1.732	2.166	2.994	1.957	2.431	3.334
40	1.598	2.01	2.793	1.697	2.126	2.941	1.902	2.365	3.25
45	1.577	1.986	2.762	1.669	2.092	2.897	1.857	2.313	3.181
50	1.56	1.965	2.735	1.646	2.065	2.863	1.821	2.296	3.124

Capítulo 2 Planeación del experimento.

El objetivo de éste capítulo es revisar los conceptos básicos del diseño de experimentos para recordar los fundamentos principales. También se definen las variables que intervienen en el proceso y los niveles de operación, por último se reportan los resultados arrojados por el programa MINITAB 14 de la experimentación.

2.1 Introducción general al DDE

La referencia bibliográfica tomada para el desarrollo de los puntos 2.1 y 2.2 del presente capítulo puede verse en la sección de “referencias bibliográficas” marcado con el número 1. Los conceptos que se manejarán en dichos puntos son conceptos generales que pueden encontrarse en cualquier libro de diseño de experimentos.

2.1-1 Estrategia de experimentación

Investigadores de prácticamente todos los campos de estudio llevan acabo experimentos, por lo general para descubrir algo acerca de un proceso o sistema particular. En un sentido literal, un experimento es una prueba. En una perspectiva más formal, un experimento puede definirse como una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida.

En cualquier experimento, los resultados y las conclusiones que puedan sacarse dependen en gran medida de la manera en que se recabaron los datos. En general, los experimentos se usan para estudiar el desempeño de procesos y sistemas. El proceso o sistema puede representarse con el modelo ilustrado en la figura 2.1. El proceso puede por lo general visualizarse como una combinación de máquinas, métodos, personas u otros recursos que transforman cierta entrada (con frecuencia un material) en una salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas variables del proceso x_1, x_2, \dots, x_p son controlables, mientras que otras z_1, z_2, \dots, z_q son no controlables (aunque pueden serlo para los fines de una prueba). Los objetivos del experimento podrían comprender los siguientes:

1. Determinar cuáles son las variables que tienen mayor influencia sobre la respuesta y .
2. Determinar cuál es el ajuste de las x que tiene mayor influencia para que y esté casi siempre cerca del valor nominal deseado.
3. Determinar cuál es el ajuste de las x que tiene mayor influencia para que la variabilidad de y sea reducida.
4. Determinar cuál es el ajuste de las x que tiene mayor influencia para que los efectos de las variables z_1, z_2, \dots, z_q sean mínimos.

Como se puede ver por el análisis anterior, los experimentos incluyen muchas veces varios factores. Habitualmente, uno de los objetivos de la persona que realiza un experimento, llamada el experimentador, es determinar la influencia que tienen

estos factores sobre la respuesta de salida del sistema. Al enfoque general para planear y llevar a cabo el experimento se le llama estrategia de experimentación.

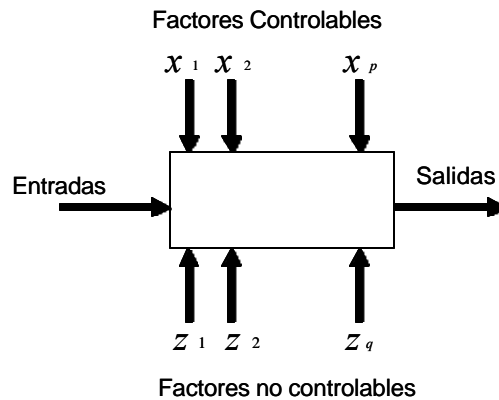


Figura 2.1 Modelo general de un proceso o sistema.

2.1-2 Algunas aplicaciones típicas del diseño experimental.

Los métodos del diseño experimental han encontrado amplia aplicación en diversas disciplinas. De hecho la experimentación puede considerarse parte del proceso científico y uno de los medios para conocer el funcionamiento de sistemas y procesos. En general, el aprendizaje ocurre a través de una serie de actividades en las que se hacen conjeturas acerca de un proceso, se llevan a cabo experimentos para generar datos del proceso y después se usa la información del experimento para establecer nuevas conjeturas, lo que lleva a nuevos experimentos, y así sucesivamente.

El diseño experimental es una herramienta de importancia fundamental en el ámbito de la ingeniería para mejorar el desempeño de un proceso de manufactura. También tiene múltiples aplicaciones en el desarrollo de procesos nuevos. La aplicación de las técnicas del diseño experimental en las fases iniciales del desarrollo de un proceso puede redundar en

1. Mejoras en el rendimiento del proceso.
2. Variabilidad reducida y conformidad mas cercana con los requerimientos nominales o proyectados.
3. Reducción del tiempo de desarrollo.
4. Reducción de los costos globales.

Los métodos del diseño experimental desempeñan también un papel importante en las actividades del diseño de ingeniería, donde se desarrollan productos nuevos y se hacen mejoramientos en los productos existentes. Entre las aplicaciones del diseño experimental en el diseño de ingeniería se encuentran:

1. La evolución y comparación de configuraciones de diseños básicos.
2. La evaluación de materiales alternativos.
3. La selección de los parámetros del diseño para que el producto tenga un buen funcionamiento en una amplia variedad de condiciones de campo, es decir, para que el producto sea robusto.
4. La determinación de los parámetros clave del diseño del producto que afectan el desempeño del mismo.

El uso del diseño experimental en estas áreas puede redundar en productos cuya fabricación sea mas sencilla, en productos que tengan un desempeño y confiabilidad de campo mejorados, en costos de producción mas bajos y en tiempos más cortos para el diseño y desarrollo del producto.

2.1-3 Principios básicos

Si quiere llevarse acabo un experimento con la mayor eficiencia posible, es necesario utilizar un enfoque científico para planearlo. El diseño estadístico de experimentos se refiere al proceso para planear el experimento de tal forma que se recaben datos adecuados que puedan analizarse con métodos estadísticos que llevarán a conclusiones válidas y objetivas. El enfoque estadístico del diseño experimental es necesario si se quieren sacar conclusiones significativas de los datos. Cuando el problema incluye datos que están sujetos a errores experimentales, la metodología estadística es el único enfoque objetivo de análisis. Por lo tanto, cualquier problema experimental incluye dos aspectos: El diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos. Estos dos aspectos se encuentran íntimamente relacionados porque el método de análisis depende directamente del diseño empleado.

Los tres principios básicos del diseño experimental son:

1. La realización de réplicas.
2. La aleatorización.
3. La formulación de bloques.

Por realización de réplicas se entiende la repetición del experimento básico, éste posee dos propiedades importantes, la primera permite al experimentador obtener una estimación del error experimental. Esta estimación del error se convierte en una unidad de medición básica para determinar si las diferencias observadas en los datos son en realidad estadísticamente diferentes. Segunda, si se usa la media muestral para estimar el efecto de un factor en el experimento, la realización de réplicas permite al experimentador obtener una estimación más precisa de este efecto. Por ejemplo, si σ^2 es la varianza de una observación individual y hay n réplicas, la varianza de la media muestral es:

$$S_y^2 = \frac{s^2}{n}$$

La aleatorización es la piedra angular en la que se fundamenta el uso de los métodos estadísticos en el diseño experimental. Por aleatorización se entiende que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se desarrollarán las corridas o ensayos individuales del experimento se determinan al azar. Uno de los requisitos de los métodos estadísticos es que las observaciones (o los errores) sean variables aleatorias con distribuciones independientes. La aleatorización hace por lo general que este supuesto sea válido. La aleatorización correcta del experimento ayuda también a “sacar del promedio” los efectos de factores extraños que pudieran estar presentes.

En ocasiones los experimentadores se encuentran con situaciones en las que la aleatorización de un aspecto del experimento es complicada. Por ejemplo, en un proceso químico, la temperatura puede ser una variable muy difícil de modificar, haciendo casi imposible la aleatorización completa de este factor. Existen métodos de diseño estadístico para resolver las restricciones sobre la aleatorización.

La formación de bloques es una técnica de diseño que se utiliza para mejorar la precisión de las comparaciones que se hacen entre los factores de interés. Muchas veces la formación de bloques se emplea para reducir o eliminar la variabilidad transmitida por factores perturbadores; es decir aquellos factores que pueden influir en la respuesta experimental pero en los que no hay un interés específico. En general un bloque es un conjunto de condiciones experimentales relativamente homogéneas.

2.1-4 Pautas generales para diseñar experimentos

Para aplicar el enfoque estadístico en el diseño y análisis de un experimento, es necesario que todos los que participan en el mismo tengan una idea clara de que es exactamente lo que va a estudiarse, cómo van a colectarse los datos, y al menos una comprensión cualitativa de la forma en que van a analizarse estos datos. En la tabla 2.1 se muestra un esquema general del procedimiento recomendado. A continuación se presenta una breve explicación de este esquema y se elaboran algunos de los puntos clave.

Tabla 2.1 Pautas generales para diseñar un experimento

1. {	Planeación previa al	el problema.
2. }	experimento	niveles y los rangos. ^a
3. Selección de la variable de respuesta. ^a		
4. Elección del diseño experimental.		
5. Realización del experimento.		
6. Análisis estadístico de los datos.		
7. Conclusiones y recomendaciones.		

^a En la práctica los pasos 2 y 3 suelen hacerse simultáneamente o en el orden inverso.

1. Identificación y enunciación del problema. Este punto podría parecer muy obvio pero es común que en la práctica no sea sencillo darse cuenta de que existe un problema que requiere experimentación, y tampoco es fácil desarrollar una enunciación clara, con lo que todos estén de acuerdo, de este problema. Es necesario desarrollar todas las ideas acerca de los objetivos del experimento. Generalmente, es importante solicitar aportaciones de todas las áreas involucradas: Ingeniería, aseguramiento de calidad, manufactura, mercadotecnia, administración, el cliente y el personal de operación (el cual por lo general conoce a fondo el proceso y al que con demasiada frecuencia se ignora). Por esta razón, se recomienda un enfoque de equipo para diseñar experimentos.

Una enunciación clara del problema contribuye sustancialmente a menudo para alcanzar una mejor comprensión de los fenómenos bajo estudio y la solución final del problema.

2. Elección de los factores, los niveles y los rangos. Como se enuncia en la tabla 2.1, los pasos 2 y 3 muchas veces se hacen simultáneamente o en orden inverso. Cuando se consideran los factores que pueden influir en el desempeño de un proceso o sistema, el experimentador suele descubrir que estos factores pueden clasificarse como factores potenciales del diseño o bien como factores perturbadores. Los factores potenciales del diseño son aquellos que el experimentador posiblemente quiera hacer variar en el experimento. Es frecuente encontrar que hay muchos factores potenciales del diseño, por lo que es conveniente contar con alguna clasificación adicional de los mismos. Algunas clasificaciones útiles son factores del diseño, factores que se mantienen constante y factores a los que se permite variar. Los factores de diseño son los que se seleccionen realmente para estudiarlos en el experimento. Los factores que se mantienen constantes son variables que pueden tener cierto efecto sobre la respuesta, pero que para los fines del experimento en curso no son de interés, por lo que se mantendrán fijos en un nivel específico. Como un ejemplo de factores a los que se permite variar, las unidades experimentales o los “materiales” a los que se aplican los factores del diseño no son homogéneos por lo general, no obstante lo cual con frecuencia se ignora esta variabilidad de una unidad a otra y se confía en la aleatorización para compensar cualquier efecto del material o la unidad experimental. Muchas veces se trabajará con el supuesto de que los efectos de los factores que se mantienen constantes y de los factores a los que se les permite variar son relativamente pequeños.

Por otra parte, los factores perturbadores pueden tener efectos considerables que deben tomarse en consideración, a pesar de que no haya interés en ellos en el contexto del experimento en curso. Los factores perturbadores suelen clasificarse como factores controlables, no controlables o de ruido. Un factor perturbador controlable es aquel cuyos niveles pueden ser ajustados por el experimentador. La estructura básica de la formación de bloques, comentada en la sección anterior, suele ser útil para trabajar con factores perturbadores controlables. Si un factor perturbador no es controlable en el experimento, pero puede medirse, muchas veces puede usarse el procedimiento de análisis denominado análisis de covarianza para compensar este efecto. Cuando un factor que varía de manera natural y no controlable en el proceso puede controlarse para los fines de un experimento, con frecuencia se llama factor de ruido. En tales situaciones, es común que el objetivo sea encontrar los ajustes de los factores controlables del diseño que mantienen la variabilidad transmitida por los factores de ruido. En ocasiones a esto se le llama el estudio de robustez del proceso o el problema de robustez del diseño.

Una vez que el experimentador ha seleccionado los factores de diseño, debe elegir los rangos en los que hará variar estos factores, así como los niveles específicos con los que se realzarán las corridas. También deberá pensarse como van a controlarse estos factores en los valores deseados y como van a medirse.

3. Selección de la variable de respuesta. Para seleccionar la variable de respuesta, el experimentador deberá tener la certeza de que esta variable proporciona en realidad información útil acerca del proceso bajo estudio. En la mayoría de los casos, el promedio o la desviación estándar (o ambos) de la característica medida será la variable de respuesta. No son la excepción las respuestas múltiples. La eficiencia de los instrumentos de medición (o error de medición) también es un factor importante. Si la eficiencia de los instrumentos de medición es inadecuada, el experimentador sólo detectará los efectos relativamente grandes de los factores o quizá sean necesarias réplicas adicionales.

Se reitera lo crucial que es exponer todos los puntos de vista y la información del proceso en los pasos 1 al 3 anteriores. Se hace referencia a esto como planeación

previa al experimento. La mayor parte del éxito gravitará en torno a qué tan bien se haya hecho la planeación previa del experimento.

4. Elección del diseño experimental. Si las actividades de planeación previas al experimento se realizaron como es debido, este paso es relativamente sencillo. La elección del diseño implica la consideración del tamaño de la muestra (número de réplicas), la selección de un orden de corridas adecuado para los ensayos experimentales y la determinación de si entran en juego o no la formación de bloques u otras restricciones sobre la aleatorización.

Existen también varios paquetes interactivos de software estadístico que soportan esta fase del diseño experimental. El experimentador puede introducir la información del número de factores, los niveles y los rangos, y estos programas presentarán a la consideración del experimentador una selección de diseños o recomendarán un diseño particular.

Al seleccionar el diseño, es importante tener en mente los objetivos experimentales. En muchos experimentos de ingeniería se sabe de antemano que algunos de los niveles de los factores producirán valores diferentes de la respuesta. En consecuencia el interés se centra, en identificar que factores causan esta diferencia y en estimar la magnitud del cambio de la respuesta.

5. Realización del experimento. Cuando se lleva a cabo el experimento es vital monitorear con atención el proceso a fin de asegurarse de que todo se este haciendo conforme a la planeación. Los errores en el procedimiento experimental en esta etapa destruirán por lo general la validez experimental. Poner en un primer plano la planeación es crucial para el éxito. Es fácil subestimar los efectos de logística y planeación cuando se corre un experimento diseñado en un ambiente complejo de manufactura o de investigación y desarrollo.

Coleman y Montgomery sugieren que antes de llevar acabo el experimento, es conveniente en muchas ocasiones realizar algunas corridas piloto de prueba. Estas corridas proporcionan información acerca de la consistencia del material experimental, una comprobación del sistema de medición, una idea aproximada del error experimental y la oportunidad de poner en práctica la técnica experimental global. Esto ofrece también una oportunidad para revisar, de ser necesario, las decisiones tomadas en los pasos 1 al 4.

6. Análisis estadístico de los datos. Deberán usarse métodos estadísticos para analizar los datos a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivos y no de carácter apreciativo. Si el experimento se ha diseñado correctamente y se ha llevado acabo de acuerdo con el diseño, los métodos estadísticos necesarios no deben ser complicados. Existen varios paquetes de software excelentes diseñados para auxiliar en el análisis de datos, y muchos de los programas usados en el paso 4 para seleccionar el diseño cuentan con una interfase directa para el análisis estadístico. Con frecuencia se encuentra que los métodos gráficos simples desempeñan un papel importante en el análisis e interpretación de datos. Los procedimientos para probar hipótesis y estimar intervalos de confianza son muy útiles en el análisis de datos de un experimento diseñado. El análisis residual y la verificación de la adecuación del modelo son también técnicas de análisis importantes.

Recuerde que los métodos estadísticos no pueden demostrar que un factor (o factores) poseen un efecto particular, solo proporcionan pautas generales en cuanto a la confiabilidad y la validez de los resultados. La ventaja principal de los métodos estadísticos es que le dan objetividad al proceso de toma de decisiones bajo cierta

incertidumbre. Las técnicas estadísticas, aunadas a una buena ingeniería o conocimiento del proceso y el sentido común, llevarán por lo general a conclusiones sólidas.

7. Conclusiones y recomendaciones. Una vez que se han analizado los datos, el experimentador debe sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso de acción. Los métodos gráficos suelen ser útiles en esta etapa, en particular para presentar los resultados. También deberán realizarse corridas de seguimiento o pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento.

Un experimento exitoso requiere conocer los factores importantes, los rangos en los que deberán hacerse variar estos factores, el número apropiado de niveles que deberán usarse y las unidades de medición apropiadas para estas variables. A medida que avanza un programa experimental, es común abandonar algunas variables de entrada e incorporar otras, modificar la región de experimentación de algunos factores o incorporar nuevas variables de respuesta.

2.1-5 Uso de técnicas estadísticas en la experimentación

Gran parte de la investigación en la ingeniería, las ciencias y la industria es empírica y hace un uso extensivo de la experimentación. Los métodos estadísticos pueden incrementar en gran medida la eficiencia de estos experimentos y con frecuencia pueden fortalecer las conclusiones así obtenidas. El uso correcto de las técnicas estadísticas en la experimentación requiere que el experimentador tenga presentes los puntos siguientes:

1. Uso de conocimientos no estadísticos del problema. Los experimentadores suelen poseer amplios conocimientos de sus respectivos campos. En algunos campos existe un cuerpo enorme de teoría física en el cual indagar para explicar las relaciones entre los factores y las respuestas. Este tipo de conocimientos no estadísticos es invaluable para elegir los factores, determinar los niveles de los factores, decidir cuántas réplicas correr, interpretar los resultados del análisis, etc. El uso de la estadística no es sustituto de la reflexión sobre el problema.

2. Mantener el diseño y el análisis tan simple como sea posible. Es necesario no exagerar en el uso de las técnicas estadísticas complejas y sofisticadas. Los métodos de diseño y análisis relativamente simples son siempre los mejores. En este punto cabe hacer hincapié nuevamente en el paso 4 del procedimiento recomendado en la sección 2.1-4. Si un diseño se hace de manera cuidadosa y correcta, el análisis casi siempre será relativamente directo. Sin embargo, si el diseño se estropea grandemente por falta de conocimiento, no es posible que incluso la estadística más compleja y elegante salve la situación.

3. Tener presente la diferencia entre significación práctica y significación estadística. Debido justamente a que dos condiciones experimentales producen respuestas medias que son estadísticamente diferentes, no existe ninguna seguridad de que esta diferencia sea la magnitud suficiente como para tener algún valor práctico. Por ejemplo, un ingeniero puede determinar que una modificación en el sistema de inyección de combustible de un automóvil puede producir un mejoramiento promedio real en el rendimiento del combustible de 0.1 mi/gal. Este es un resultado estadísticamente significativo. Sin embargo, si el costo de la modificación es muy alto, la diferencia de 0.1 mi/gal probablemente será muy pequeña para poseer algún valor práctico.

4. Los experimentos son generalmente iterativos. Recuerde que en la mayoría de las situaciones no es conveniente diseñar un experimento demasiado comprensivo al principio del estudio. Un diseño exitoso requiere conocer los factores importantes, los rangos en que estos factores se harán variar, el número apropiado de niveles para cada factor y los métodos y unidades de medición adecuados para cada factor y respuesta. En general ningún experimentador está en posición de responder estas cuestiones al principio del experimento, sino que las respuestas aparecen sobre la marcha. Esto habla a favor del enfoque iterativo o secuencial analizado anteriormente. Por consiguiente no deberá invertirse más del 25% de los recursos para la experimentación (corridas, presupuesto, tiempo, etc.) en el experimento inicial. Con frecuencia estos esfuerzos iniciales constituyen solo experiencias de aprendizaje, y es necesario contar con recursos suficientes para alcanzar los objetivos finales del experimento.

2.2 Factoriales e interacción

2.2-1 Definiciones y principios básicos

En muchos experimentos interviene el estudio de dos o más factores. En general los diseños factoriales son los más eficientes para este tipo de experimentos. Por diseño factorial se entiende que en cada ensayo o réplica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. Por ejemplo, si el factor A tiene a niveles y el factor B tiene b niveles, cada réplica contiene todas las ab combinaciones de los tratamientos. Cuando los factores están incluidos en un diseño factorial, es común decir que están cruzados.

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor. Con frecuencia se le llama efecto principal porque se refiere a los factores de interés primario en el experimento. Por ejemplo, considere el experimento sencillo de la figura 2.2. Se trata de un experimento factorial de dos factores en el que los dos factores del diseño tienen dos niveles. A estos niveles se les ha denominado “bajo” y “alto” y se denotan como “-“ y “+”, respectivamente. El efecto principal del factor A de este diseño de dos niveles puede visualizarse como la diferencia entre la respuesta promedio con el nivel bajo de A y la respuesta promedio con el nivel alto de A. Numéricamente, esto es

$$A = \frac{40 + 52}{2} - \frac{20 + 30}{2} = 21$$

Es decir, cuando el nivel A se incrementa del nivel bajo al nivel alto se produce un incremento de la respuesta promedio de 21 unidades. De manera similar, el efecto principal de B es

$$B = \frac{30 + 52}{2} - \frac{20 + 40}{2} = 11$$

Cuando los factores tienen más de dos niveles, es necesario modificar el procedimiento anterior, ya que existen otras formas de definir el efecto de un factor.

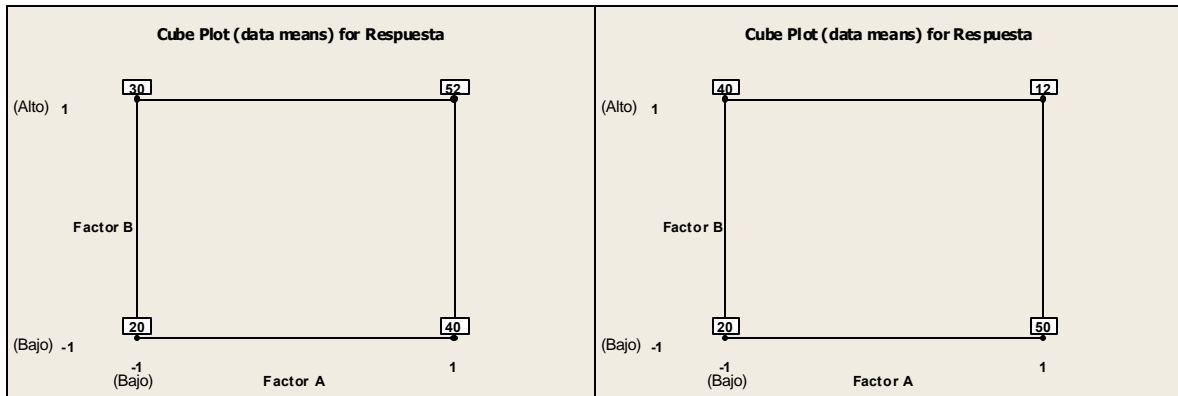


Figura 2.2 Experimento factorial de dos factores con la respuesta (y) indicada en los vértices.

Figura 2.3 Experimento factorial de dos factores con interacción.

En algunos experimentos puede encontrarse que la diferencia en la respuesta entre los niveles de un factor no es la misma para todos los niveles de los otros factores. Cuando esto ocurre, existe una interacción entre los factores. Por ejemplo, considere el experimento factorial de dos factores que se ilustra en la figura 2.3. Con el nivel bajo del factor B (o B⁻), el efecto de A es

$$A = 50 - 20 = 30$$

Y con el nivel alto del factor B (o B⁺), el efecto de A es

$$A = 12 - 40 = -28$$

Puesto que el efecto de A depende del nivel que se elige para el factor B, se observa que existe una interacción entre A y B. La magnitud del efecto de la interacción es la diferencia promedio de esos dos efectos de A, o $AB = (-28 - 30)/2 = -29$. Eventualmente, en este experimento la interacción es grande.

Estas ideas pueden ilustrarse gráficamente. En la figura 2.4 se grafican los datos de las respuestas de la figura 2.2 contra el factor A para ambos niveles del factor B. Observe que las rectas B⁻ y B⁺ son aproximadamente paralelas, lo cual indica la ausencia de interacción entre los factores A y B. De manera similar, en la figura 2.5 se grafican los datos de las respuestas de la figura 2.3. En este caso se observa que las rectas B⁻ y B⁺ no son paralelas. Esto indica una interacción entre los factores A y B. Gráficas como éstas son de gran ayuda para interpretar las interacciones significativas y para reportar los resultados al personal sin preparación estadística. Sin embargo, no deberán utilizarse como la única técnica para el análisis de datos, ya que su interpretación es subjetiva y su apariencia con frecuencia es engañosa.

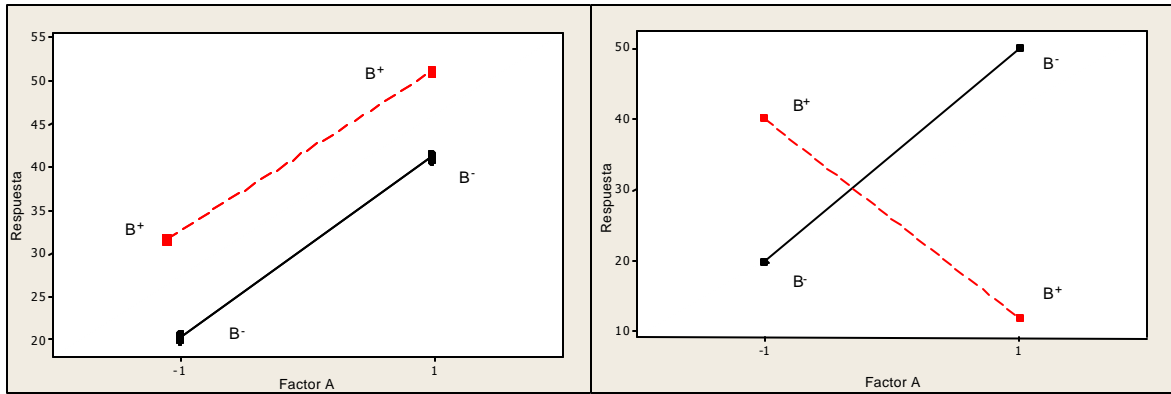


Figura 2.4 Experimento factorial sin interacción.

Figura 2.5 Experimento factorial con interacción.

2.2-2 La ventaja de los diseños factoriales

Es sencillo ilustrar la ventaja de los diseños factoriales. Suponga que se tienen dos factores A y B, cada uno con dos niveles. Los niveles de los factores se denotan por A^- , A^+ , B^- y B^+ . Podría obtenerse información acerca de ambos factores haciéndolos variar uno a la vez, como se muestra en la figura 2.6. El efecto de cambiar el factor A está dado por $A^+ B^- - A^- B^-$, y el efecto de cambiar el factor B está dado por $A^- B^+ - A^- B^-$. debido a que está presente el error experimental, es deseable realizar dos observaciones, por ejemplo, para cada combinación de tratamientos y estimar los efectos de los factores utilizando las respuestas promedio. Por lo tanto, se necesita un total de seis observaciones.

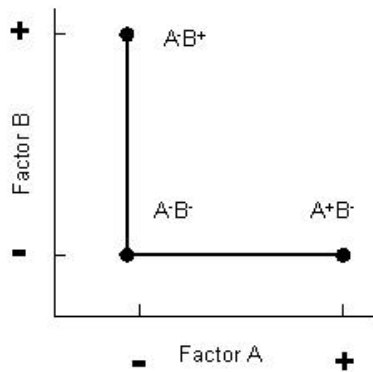


Figura 2.6 Experimento con un factorial a la vez.

Si se hubiera efectuado un experimento factorial, se habría registrado una combinación adicional de los tratamientos $A^+ B^+$. Ahora, utilizando sólo cuatro observaciones, pueden hacerse dos estimaciones del efecto de A: $A^+ B^- - A^- B^-$ y $A^+ B^+ - A^- B^+$. De manera similar pueden hacerse dos estimaciones del efecto de B. Estas dos estimaciones de cada efecto principal podrían promediarse para producir efectos principales promedio que tienen la misma precisión que las estimaciones del experimento con un solo factor, pero solo se requieren cuatro observaciones en total, y nosotros diríamos que la eficiencia relativa del diseño factorial con respecto al experimento de un factor a la vez es de $(6/4) = 1.5$. En general, esta eficiencia relativa aumentará conforme se incremente el número de factores, como se muestra en la figura 2.7.

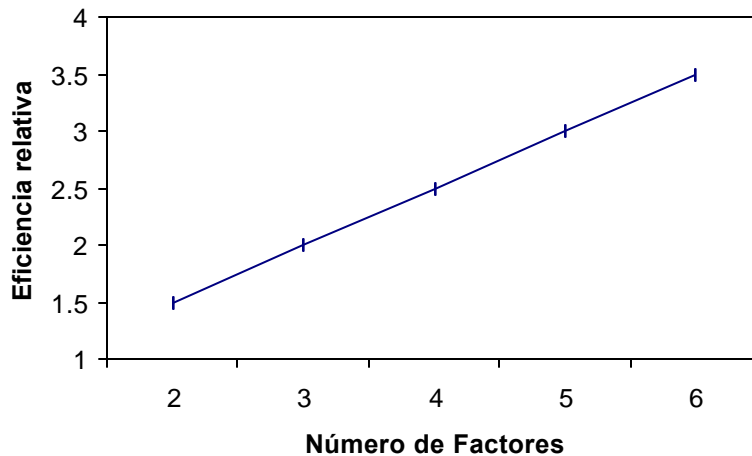


Figura 2.7 Eficiencia relativa de un diseño factorial con respecto a un experimento de un factor a la vez (dos niveles del factor).

Suponga ahora que está presente una interacción. Si el diseño de un factor a la vez indicara que $A^- B^+$ - $A^+ B^-$ dieron mejores respuestas que $A^- B^-$, una conclusión lógica sería que $A^+ B^+$ sería todavía mejor. Sin embargo, si está presente una interacción, esta conclusión puede ser una equivocación grave.

En resumen, observe que los diseños factoriales ofrecen varias ventajas. Son más eficientes que los experimentos de un factor a la vez. Además, un diseño factorial es necesario cuando puede haber interacciones presentes a fin de evitar llegar a conclusiones incorrectas. Por último, los diseños factoriales permiten la estimación de los efectos de un factor con varios niveles de los factores restantes, produciendo conclusiones que son válidas para un rango de condiciones experimentales.

2.2-3 Diseño factorial general

En el caso General hay a niveles del factor A, b niveles del factor B, c niveles del factor C, etc. dispuestos en un experimento factorial. En general habrá $abc \dots n$ observaciones totales si se hacen n réplicas del experimento completo. De nueva cuenta observe que es necesario un mínimo de dos réplicas ($n > 0 = 2$) para determinar una suma de cuadrados debida al error si todas las interacciones posibles están incluidas en el modelo.

Cuando todos los factores del experimento son fijos, es sencillo formular y probar hipótesis acerca de los efectos principales y las interacciones. Para un modelo con efectos fijos, los estadísticos de prueba para cada efecto principal e interacción pueden construirse dividiendo el cuadrado medio correspondiente del efecto o interacción por el cuadrado del error. Todas estas pruebas F serán de una cola superior. El número de grados de libertad de cualquier efecto principal es el número de niveles del factor menos uno, y el número de grados de libertad de una interacción es el producto del número de grados de libertad asociados con los componentes individuales de la interacción.

Por ejemplo, considere el modelo del análisis de varianza de tres factores:

$$Y_{ijkl} = \mu + t_i + b_j + g_k + (tb)_{ij} + (tg)_{jk} + (bg)_{jk} + (tbg)_{ijk} + e_{ijkl}$$

$$i = 1, 2, \dots, a$$

$$j = 1, 2, \dots, b$$

$$k = 1, 2, \dots, c$$

$$l = 1, 2, \dots, n$$

Suponiendo que A, B y C son fijos, la tabla del análisis de varianza se presenta en la tabla 2.2. Las pruebas F para los efectos principales y las interacciones se siguen directamente de los cuadrados medios esperados.

Tabla 5-12 La tabla del análisis de varianza del modelo de tres factores con efectos fijos

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Cuadrado medio esperado	F ₀
A	SS _A	a - 1	MS _A	$\sigma^2 + \frac{bcn \sum t_i^2}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS _B	b - 1	MS _B	$\sigma^2 + \frac{acn \sum \beta_j^2}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS _C	c - 1	MS _C	$\sigma^2 + \frac{abn \sum \gamma_k^2}{c-1}$	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS _{AB}	(a - 1)(b - 1)	MS _{AB}	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS _{AC}	(a - 1)(c - 1)	MS _{AC}	$\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS _{BC}	(b - 1)(c - 1)	MS _{BC}	$\sigma^2 + \frac{an \sum \sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS _{ABC}	(a - 1)(b - 1)(c - 1)	MS _{ABC}	$\sigma^2 + \frac{n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS _E	abc(n - 1)	MS _E	σ^2	
Total	SS _T	abcn - 1			

Tabla 2.2 Tabla del análisis de varianza del modelo de tres factores con efectos fijos.

En general los cálculos del análisis de varianza se efectuarían utilizando un paquete de software de estadística. Sin embargo, en ocasiones resultan útiles las fórmulas para calcular manualmente las sumas de cuadrados de la tabla 2.2.

2.2-4 Diseño factorial 2^K

Los diseños factoriales se usan ampliamente en experimentos que incluyen varios factores cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de los factores sobre una respuesta. Hay varios casos especiales del diseño factorial general que son importantes debido a su uso generalizado en el trabajo de investigación y porque constituyen las bases de otros diseños de gran valor práctico.

El más importante de estos casos especiales es el de k factores, cada uno con sólo dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos, como dos valores de temperatura, presión o tiempo, o bien cualitativos, como dos máquinas, dos operadores, los niveles “alto” y “bajo” de un factor, o quizá la presencia o ausencia de un factor. Una réplica completa de este diseño requiere 2 X 2 X ... X 2 = 2^K observaciones y se le llama diseño factorial 2^K.

El diseño 2^k es de particular utilidad en las etapas iniciales del trabajo experimental, cuando probablemente se están investigando muchos factores. Este diseño proporciona el menor número de corridas con las que pueden estudiarse k factores en un diseño factorial completo. Por consiguiente, estos diseños se usan ampliamente en los experimentos de tamizado o selección de factores.

Puesto que solo hay dos niveles para cada factor, se supone que la respuesta es aproximadamente lineal en el rango elegido para los niveles de los factores. En muchos experimentos de tamizado de factores, cuando se acaba de iniciar el estudio del proceso o sistema, este supuesto suele ser razonable.

2.2-5 Diseños factoriales fraccionados de dos niveles

Cuando el número de factores de un diseño factorial 2^k se incrementa, el número de corridas necesarias para realizar una réplica completa del diseño rebasa con rapidez los recursos de la mayoría de los experimentadores. Por ejemplo, una réplica completa de un diseño 2^6 requiere 64 corridas. En este diseño, solo 6 de los 63 grados de libertad corresponden a los efectos principales, y solo 15 a las interacciones de dos factores. Los 42 grados de libertad restantes se asocian con las interacciones de tres o más factores.

Si el experimentador puede suponer razonablemente que ciertas interacciones de orden superior son insignificativas, es posible obtener información de los efectos principales y las interacciones de orden inferior corriendo únicamente una fracción del experimento factorial completo. Estos diseños factoriales fraccionados se encuentran entre los tipos de diseños de uso más generalizado en el diseño de productos y procesos y en el mejoramiento de procesos.

Una de las principales aplicaciones de los diseños factoriales fraccionados es en los diseños de tamizado o exploración. Se trata de experimentos en los que se consideran muchos factores y el objetivo es identificar aquellos factores (en caso de haberlos) que tienen efectos grandes. Los experimentos de tamizado suelen utilizarse en las etapas iniciales de un proyecto, cuando es posible que muchos de los factores considerados en un principio tengan un efecto reducido o nulo sobre la respuesta. Entonces los factores que se identifican como importantes se investigan con mayor detalle en experimentos subsecuentes.

El uso exitoso de los diseños factoriales fraccionados se basa en tres ideas clave:

1. El principio de efectos esparcidos o escasez de defectos. Cuando hay varias variables, es posible que el sistema o proceso esté dominado principalmente por algunos de los efectos principales y las interacciones de orden inferior.
2. La propiedad de proyección. Se dice que un diseño factorial fraccionado se proyecta en un diseño factorial completo cuando el número de efectos significativos es pequeño y se consideran únicamente los datos de estos efectos para completar un diseño factorial completo; en ocasiones incluso podemos obtener réplicas.
3. Experimentación secuencial. Es posible combinar las corridas de dos (o más) diseños factoriales fraccionados para ensamblar secuencialmente un diseño

mas grande para estimar los efectos de los factores y las interacciones de interés.

2.2-6 La fracción un medio del diseño 2^K

Considere una situación en la que tres factores, cada uno con dos niveles, son de interés, pero los experimentadores no están en posición de correr las $2^3 = 8$ combinaciones de tratamientos. Sin embargo pueden llevar a cabo 4 corridas. Esto sugiere una fracción un medio de un diseño 2^3 . Puesto que el diseño contiene $2^{3-1} = 4$ combinaciones de tratamientos, es común llamar diseño 2^{3-1} a una fracción un medio del diseño 2^3 .

En la tabla 2-3 se muestra la agrupación de signos positivos y negativos del diseño 2^3 . Suponga que se seleccionan las cuatro combinaciones de tratamientos a, b, c y abc como la fracción un medio con la que se trabajará. Estas corridas se muestran en la parte superior de la tabla 2-3 y en la figura 2.8^a.

Observe que el diseño 2^{3-1} se forma seleccionando sólo las combinaciones de tratamientos que tienen signo positivo en la columna ABC. Por lo tanto, a ABC se le llama el generador de esta fracción particular. Además la columna identidad I también es siempre positiva, por lo que a

$$I = ABC$$

Se le llama la relación de definición del diseño. En general, la relación de definición de un diseño factorial fraccionado será siempre el conjunto de todas las columnas que son iguales a la columna identidad I.

Las combinaciones de tratamientos del diseño 2^{3-1} producen tres grados de libertad que pueden usarse para estimar los efectos principales. Con referencia a la tabla 2-3, se observa que las combinaciones lineales de las observaciones usadas para estimar los efectos principales de A, B y C son:

$$l_A = 1/2 (a - b - c + abc)$$

$$l_B = 1/2 (-a + b - c + abc)$$

$$l_C = 1/2 (-a - b + c + abc)$$

También es sencillo verificar que las combinaciones lineales de las observaciones usadas para estimar las interacciones de dos factores son:

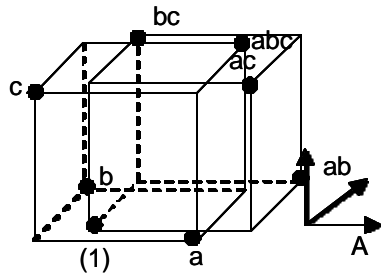
$$l_{BC} = 1/2 (a - b - c + abc)$$

$$l_{AC} = 1/2 (-a + b - c + abc)$$

$$l_{AB} = 1/2 (-a - b + c + abc)$$

Tabla 2.3 Signos positivos y negativos del diseño factorial 2^3

Combinación de tratamientos	Efecto factorial							
	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
c	+	-	-	+	+	-	-	+
abc	+	+	+	+	+	+	+	+
ab	+	+	+	-	+	-	-	-
ac	+	+	-	+	-	+	-	-
bc	+	-	+	+	-	-	+	-
(1)	+	-	-	-	+	+	+	-



a) La fracción principal, $I = +ABC$ b) La fracción alterna, $I = -ABC$

Figura 2.8 Las dos fracciones un medio del diseño 2^3

Por lo tanto $l_A = l_{BC}$, $l_B = l_{AC}$ y $l_C = l_{AB}$; por consiguiente; es imposible diferenciar entre A y BC, entre B y AC y entre C y AB. De hecho, cuando se estima A, B y C, se están estimando en realidad $A + BC$, $B + AC$ y $C + AB$. A dos o más efectos que tienen esta propiedad se les llama alias. En el ejemplo tratado aquí, A y BC son alias, b y AC son alias y C y AB son alias. Esto se indica con la notación l_A A + BC, l_B B + AC y l_C C + AB.

Las estructuras de los alias para este diseño puede determinarse con facilidad utilizando la relación de definición $I = ABC$. Al multiplicar cualquier columna (o efecto) por la relación de definición se obtienen los alias de esa columna (o efecto). En el ejemplo tratado aquí se encuentra que el alias de A es

$$A \cdot I = A \cdot ABC = A^2BC$$

o puesto que el cuadrado de cualquier columna es la identidad I,

$$A = BC$$

De manera similar, se encuentra que los alias de B y C son

$$B \cdot I = B \cdot ABC$$

$$B = AB^2C = AC$$

y

$$C \cdot I = C \cdot ABC$$

$$C = ABC^2 = AB$$

A esta fracción un medio, con $I = +ABC$, suele llamársele la fracción principal.

Suponga ahora que se eligió la otra fracción un medio, es decir, las combinaciones de tratamientos de la tabla 2-3 asociados con los signos negativos de la columna ABC. Esta fracción un medio alterna o complementaria (la cual se compone de las corridas (1), ab, ac, y bc) se ilustra en la figura 2-8b. La relación de definición de este diseño es

$$I = -ABC$$

De la combinación lineal de las observaciones, por ejemplo l'_A , l'_B , y l'_C , de la fracción alterna se obtiene

$$l'_A \quad A - BC$$

$$l'_B \quad B - AC$$

$$l'_C \quad C - AB$$

Por lo tanto cuando se estima A, B y C son esta fracción particular, en realidad se está estimando A - BC, B - AC y C - AB.

En la práctica, no importa cuál de las fracciones se usa. Ambas fracciones pertenecen a la misma familia; es decir, las dos fracciones un medio forman un diseño 2^3 completo. Esto puede observarse con facilidad con referencia a los incisos a y b de la figura 2-8.

Suponga que después de correr una de las fracciones un medio del diseño 2^3 , también se corrió la otra. Por lo tanto, se cuenta ahora con las ocho corridas asociadas con el diseño 2^3 completo. Pueden obtenerse entonces las estimaciones sin alias de todos los efectos analizando las ocho corridas como un diseño 2^3 completo en dos bloques de cuatro corridas cada uno. Esto también podría hacerse sumando y restando la combinación lineal de los efectos de las dos fracciones individuales.

Resolución del diseño

Al diseño 2^{3-1} precedente se le llama diseño de resolución III. En este diseño, los efectos principales son alias de las interacciones de dos factores. Un diseño es de resolución R cuando ningún efecto del factor p es alias de otro efecto que contiene menos de $R - p$ factores. Por lo general se emplea un subíndice con un numeral romano para denotar la resolución del diseño; por lo tanto, la fracción un medio del diseño 2^3 con la relación de definición $I = ABC$ (o $I = -ABC$) es un diseño 2_{III}^{3-1} .

Los diseños de resolución III, IV y V son particularmente importantes. A continuación se presentan las definiciones de estos diseños:

1. Diseños de resolución III. Se trata de diseños en los que ninguno de los efectos principales es alias de ningún otro efecto principal, pero los efectos principales son alias de las interacciones de dos factores, y algunas de las interacciones de dos factores pueden ser alias entre sí. Un diseño 2^{3-1} con $I = ABC$ es un diseño de resolución III (2_{III}^{3-1}).

2. Diseños de resolución IV. Se trata de diseños en los que ninguno de los efectos principales es alias de ningún otro efecto principal ni de las interacciones de dos factores, pero las interacciones de dos factores son alias entre sí. Un diseño 2^{4-1} con I = ABCD es un diseño de resolución IV (2_{IV}^{4-1}).
3. Diseños de resolución V. Se trata de diseños en los que ninguno de los efectos principales ni de las interacciones de dos factores son alias de otro efecto principal o interacción de dos factores, pero las interacciones de dos factores son alias de las interacciones de tres factores. Un diseño 2^{5-1} con I = ABCDE es un diseño de resolución V (2_{V}^{5-1}).

2.3 Planeación del experimento

Como se mencionó en el capítulo I en el proceso de ensamble de motores eléctricos se realizan pruebas finales para evaluar la calida y el cumplimiento de los estándares establecidos para el producto terminado.

En las pruebas de vibración se colocan 5 sensores en 5 puntos específicos del motor (fig. 2.9), posteriormente se pone en funcionamiento el motor y se determina el nivel de vibración en cada punto, este nivel de vibración debe ser menor o igual 0.04 0.04 pulg./seg de desplazamiento.

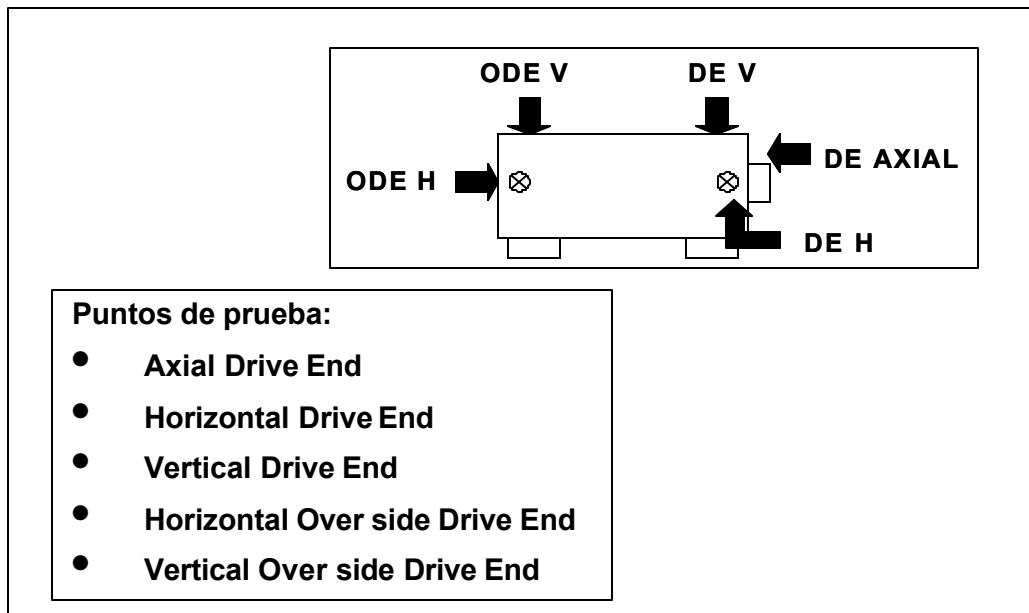


Figura 2.9 Esquema de puntos de ubicación de sensores para prueba final de vibración.

Para determinar que variables son las que intervienen en esta prueba se realizó una junta en donde se invitó al personal involucrado en la operación para darles a conocer el proyecto; por medio de una lluvia de ideas se determinaron las variables que probablemente influyen en la vibración de los motores, quedando de la siguiente manera:

1. Alineación Estator
2. Alineación Rotor
3. Balanceo
4. Posición del motor en mesa de prueba
5. Nivelación de mesa de prueba
6. Montaje de Baleros
7. Run Out (concentricidad)
8. Cantidad de grasa
9. Air Gap (Diferencia entre laminación Rotor y Estator)
10. Torque

Una vez definidas las variables de entrada, se procedió a analizar con detalle cada una de ellas y se determinó que solo 5 podían ser controlables y las otras 5 quedarían como fijas. Las variables fijas no se pueden controlar, sin embargo se llegó al acuerdo de que deberían ser vigiladas durante el experimento; si durante la prueba alguna variable fija no cumpliera con la especificación la pieza tendría que ser desechada.

En la siguiente tabla (2.4) se muestran las variables controlables y las fijas.

Variables Controlables	Variables Fijas
Alineación Estator	Alineación Rotor
Balanceo	Posición del motor en mesa
Montaje de Baleros	Run Out (Concentricidad)
Cantidad de Grasa	Air Gap (Diferencia entre laminación Rotor y Estator)
Torque	Nivelación de Mesa

Tabla 2.4 Variables Controlables y Variables fijas determinadas para el experimento.

2.4 Justificación del experimento

Como podemos observar tenemos 5 variables controlables, por lo tanto se realizará un experimento 2^K donde $K = 5$, quedando un total de 32 motores; debido a los altos costos en los que se incurre cuando un motor esta fuera de especificaciones, y a la planeación de la producción el gerente de manufactura decidió que solo se tenía presupuesto para experimentar con a lo mas 20 motores, por lo que se optó por un diseño factorial fraccionado 2^{K-1} , quedando un total de 16 motores para el experimento.

El diseño factorial fraccionado 2^{5-1} tiene una buena resolución ya que como vimos en la sección 2.2-4 se trata de un diseño en el que ninguno de los efectos principales ni de las interacciones de dos factores se confunde con efectos principales o con interacciones dobles, en este diseño las interacciones dobles se confunden con las interacciones de 3 factores, éste es un diseño de resolución V.

El tipo de motor seleccionado para el experimento es el modelo 360, 4 polos SAA y XAA, del cual se tiene una producción semanal de entre 12 y 15 motores.

Los niveles de cada variable fueron elegidos en base a las especificaciones y a la experiencia del personal involucrado quedando definidos en la tabla 2.5.

	Variable	Nivel Bajo	Nivel Alto
A	Alineación Estator	- 1/16 “	+ 1/16
B	Balanceo	300 mg	2 gr
C	Montaje de Baleros	Insertar balero caliente hasta el tope de la flecha y soltar	Insertar balero caliente hasta el tope de la flecha y dejar presionado hasta que se enfríe
D	Cantidad de Grasa	Aplicar salteando un especio entre balina y balina	Aplicar sin saltar espacios entre balinas
E	Torque	Torque directo sin previo ajuste en tornillos	Ajuste de tornillos previo al Torque

Tabla 2.5 Niveles alto y bajo de variables seleccionadas para el experimento.

2.5 Realización del experimento

Previo a la realización del experimento se calibró el equipo de medición por parte del personal de la compañía que diseño dicho equipo para asegurar que los resultados sean confiables.

Para realizar el diseño experimental se utilizó un software (MINITAB 14) el cual arrojó los siguientes resultados:

Fractional Factorial Design

Factors: 5 Base Design: 5, 16 Resolution: V
 Runs: 16 Replicates: 1 Fraction: 1/2
 Blocks: 1 Center pts (total): 0

Design Generators: E = ABCD

Alias Structure

I + ABCDE

A + BCDE AE + BCD
 B + ACDE BC + ADE
 C + ABDE BD + ACE
 D + ABCE BE + ACD
 E + ABCD CD + ABE
 AB + CDE CE + ABD
 AC + BDE DE + ABC
 AD + BCE

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Alineacion Estator	Balanceo	Montaje Baleros	Cantidad de Grasa	Torque
15	1	1	1	-1	1	1	1	-1
10	2	1	1	1	-1	-1	1	1
1	3	1	1	-1	-1	-1	-1	1
5	4	1	1	-1	-1	1	-1	-1
9	5	1	1	-1	-1	-1	1	-1
6	6	1	1	1	-1	1	-1	1
11	7	1	1	-1	1	-1	1	1
16	8	1	1	1	1	1	1	1
12	9	1	1	1	1	-1	1	-1
3	10	1	1	-1	1	-1	-1	-1
7	11	1	1	-1	1	1	-1	1
2	12	1	1	1	-1	-1	-1	-1
13	13	1	1	-1	-1	1	1	1
14	14	1	1	1	-1	1	1	-1
4	15	1	1	1	1	-1	-1	1
8	16	1	1	1	1	1	-1	-1

En la siguiente tabla (2.6) podemos observar los valores de los niveles para cada uno de los experimentos.

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Alineacion Estator	Balanceo	Montaje Baleros	Cantidad de Grasa	Torque
15	1	1	1	-1/16"	2 gr	presionar	Sin saltear	torqueo
10	2	1	1	1/16"	300 mg	sin presion	Sin saltear	ajuste y torq.
1	3	1	1	-1/16"	300 mg	sin presion	Saltear	ajuste y torq.
5	4	1	1	-1/16"	300 mg	presionar	Saltear	torqueo
9	5	1	1	-1/16"	300 mg	sin presion	Sin saltear	torqueo
6	6	1	1	1/16"	300 mg	presionar	Saltear	ajuste y torq.
11	7	1	1	-1/16"	2 gr	sin presion	Sin saltear	ajuste y torq.
16	8	1	1	1/16"	2 gr	presionar	Sin saltear	ajuste y torq.
12	9	1	1	1/16"	2 gr	sin presion	Sin saltear	torqueo
3	10	1	1	-1/16"	2 gr	sin presion	Saltear	torqueo
7	11	1	1	-1/16"	2 gr	presionar	Saltear	ajuste y torq.
2	12	1	1	1/16"	300 mg	sin presion	Saltear	torqueo
13	13	1	1	-1/16"	300 mg	presionar	Sin saltear	ajuste y torq.
14	14	1	1	1/16"	300 mg	presionar	Sin saltear	torqueo
4	15	1	1	1/16"	2 gr	sin presion	Saltear	ajuste y torq.
8	16	1	1	1/16"	2 gr	presionar	Saltear	torqueo

Tabla 2.6 niveles de experimentos a realizar.

Resultados del experimento

Las respuestas observadas del diseño se muestran en la tabla 2.7, recordemos que es un diseño fraccionado 2^{5-1} con resolución V.

RunOrder	Variables de Respuesta				
	Axial	Horizontal DE	Vertical DE	Horizontal ODE	Vertical ODE
1	0.02	0.028	0.024	0.018	0.017
2	0.01	0.016	0.015	0.017	0.016
3	0.012	0.015	0.014	0.014	0.02
4	0.014	0.012	0.019	0.011	0.1
5	0.021	0.018	0.018	0.011	0.013
6	0.019	0.019	0.016	0.012	0.012
7	0.009	0.022	0.019	0.014	0.013
8	0.023	0.014	0.01	0.015	0.019
9	0.017	0.019	0.019	0.01	0.01
10	0.022	0.019	0.016	0.014	0.013
11	0.012	0.014	0.015	0.021	0.015
12	0.008	0.014	0.015	0.021	0.01
13	0.029	0.017	0.017	0.011	0.006
14	0.027	0.014	0.024	0.015	0.013
15	0.019	0.01	0.016	0.014	0.007
16	0.013	0.013	0.024	0.012	0.008

Tabla 2.7 Observaciones obtenidas del experimento, las unidades están en pulg/seg.

DEDICATORIAS

A Dios

Por la vida.

A mi madre

Quien con su infinito amor me aconseja y apoya en cada momento de mi vida.

A mi hermano Juan Carlos

Por todos sus consejos, cariño y apoyo incondicional hacia mi persona.

A mi padre

A mis hermanos Rik y Sergio

A mis sobrinos Maritza, Sergio, Ale, Maria Angélica, Juanito, Gabriel y Riquito

Su amor y cariño son lo más importante en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis Dr. Jose G. Ríos Alejandro por todas sus enseñanzas, consejos y por el interés mostrado a lo largo del presente trabajo.

A mis sinodales Dr. Jesús Salvador Arreola Risa y M.C. Salvador Cordero Barraza por tomarse el tiempo de revisar la tesis y aclarar mis dudas.

Al Ing. Cesar García y al Ing. Juan M. Díaz por todas las facilidades y completo apoyo durante la planeación y ejecución de la tesis.

A mis amigos de maestría con quienes compartí parte importante de mi vida.

RESUMEN

En el presente trabajo se aplicó la metodología del diseño de experimentos para reducir la vibración de motores eléctricos manufacturados en una planta importante de la localidad. La vibración es una variable crítica de calidad en el desempeño de este producto.

Primeramente se definieron las variables controlables a considerar, éstas fueron cinco: alineación del estator, balanceo, montaje de baleros, cantidad de grasa y torque. Los niveles de vibración fueron verificados en 5 puntos diferentes del motor. Se aplicó un diseño factorial fraccionado 2^{5-1} en el cual se identificaron las variables controlables que influyen en la vibración y se estimaron los niveles de estas variables que minimizan la media de la vibración. Se observó que la interacción de la alineación del estator con el balanceo y la interacción del balanceo con el montaje de baleros fueron los únicos efectos significativos en la media de vibración correspondiente al punto Horizontal ODE.

Se obtuvieron importantes beneficios como la reducción de la probabilidad estimada de encontrar motores con vibración por arriba del límite de especificación, la reestandarización del proceso y la reducción del tiempo de balanceo en un 72 % lo cual implica importantes beneficios económicos al año para la empresa.

INDICE

Capítulo 1	Introducción.....	1
	1.1 Descripción general de la planta.....	1
	1.2 Problemática.....	2
	1.3 Descripción del proceso.....	3
	1.4 Estrategias a seguir para resolver el problema.....	5
	1.5 Organización del contenido del presente trabajo.....	6
Capítulo 2	Planeación del experimento.....	7
	2.1 Introducción general al DDE.....	7
	2.1-1 Estrategia de experimentación.....	7
	2.1-2 Algunas aplicaciones típicas del diseño experimental.....	8
	2.1-3 Principios básicos.....	9
	2.1-4 Pautas generales para diseñar experimentos.....	10
	2.1-5 Uso de técnicas estadísticas en la experimentación.....	13
	2.2 Factoriales e interacción.....	14
	2.2-1 Definiciones y principios básicos.....	14
	2.2-2 La ventaja de los diseños factoriales.....	16
	2.2-3 Diseño factorial general.....	17
	2.2-4 Diseño factorial 2^k	18
	2.2-5 Diseños factoriales fraccionados en dos niveles.....	19
	2.2-6 La fracción un medio de un diseño 2^k	20
	2.3 Planeación del experimento.....	23
	2.4 Justificación del experimento.....	24
	2.5 Realización del experimento.....	25
Capítulo 3	Análisis estadístico del experimento.....	27
	3.1 Anova.....	27
	3.2 Resultados.....	29
	3.3 Recomendaciones.....	32
	3.4 Corrida de confirmación.....	35
	3.5 Beneficios obtenidos.....	41
Capítulo 4	Conclusiones y recomendaciones.....	42
	4.1 Resumen.....	42
	4.2 Conclusiones y recomendaciones.....	43
	4.3 Proyectos a futuro.....	43
	Bibliografía.....	45
	Anexos.....	46