



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL
EN EL DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS INTERNAS, EN EL
ÁREA DE OPERACIONES UNITARIAS**

Menphis Sofonias Reyes Mazariegos
Asesorado por el Ing. José Manuel Tay Oroxóm

Guatemala, marzo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL
EN EL DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS INTERNAS, EN EL
ÁREA DE OPERACIONES UNITARIAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

POR

**MENPHIS SOFONIAS REYES MAZARIEGOS
ASESORADO POR EL ING. JOSÉ MANUEL TAY OROXÓM**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, MARZO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXÁMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Juan Orlando Posadas Valdez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL
EN EL DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS INTERNAS, EN EL
ÁREA DE OPERACIONES UNITARIAS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de 19 de septiembre de 2008.



Memphis Sofonias Reyes Mazariegos

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

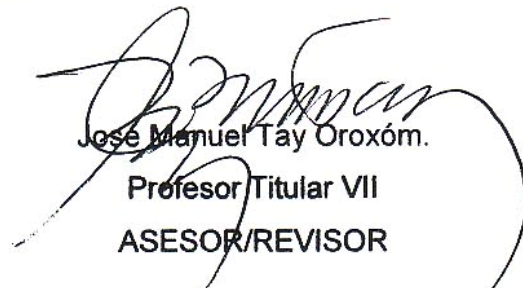
Guatemala, 21 de noviembre de 2008.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Su Despacho

Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el informe final de trabajo de graduación del estudiante Memphis Sofonias Reyes Mazariegos con número de carné 2003-12547 titulado **“Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas en el área de operaciones unitarias”**.

Habiendo encontrado dicho informe apto para ser presentado ante usted, extiendo la presente para que se continúe con los trámites respectivos.

Atentamente,


José Manuel Tay Oroxóm.
Profesor Titular VII
ASESOR/REVISOR



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

Guatemala, 23 de Febrero de 2009
Ref. EI.Q.061.2009

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-011-09-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario **MENPHIS SOFONIAS REYES MAZARIEGOS**, identificado con carné No. **2003-12547**, titulado: "APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN EL DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS INTERNAS EN EL ÁREA DE OPERACIONES UNITARIAS" el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico José Manuel Tay Oroxom , como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Reyes Mazariegos** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.

COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación




ESCUELA DE
INGENIERÍA QUÍMICA

C.c.: archivo



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía, M.Sc. Después de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el trabajo de graduación de la estudiante **Menphis Sofonias Reyes Mazariegos** titulado: **“APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN EL DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS INTERNAS, EN EL ÁREA DE OPERACIONES UNITARIAS”**, procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía M.Sc.
DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA



Guatemala, marzo de 2,009

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.051.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN EL DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS INTERNAS, EN EL AREA DE OPERACIONES UNITARIAS** presentado por el estudiante universitario **Menphis Sofonías Reyes Mazariegos**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, marzo de 2009



/cc

AGRADECIMIENTOS A:

Dios

Por darme la sabiduría, paciencia, disciplina y fuerza necesaria para cumplir con mis objetivos y lograr así alcanzar mis metas.

Mis padres

Por brindarme su apoyo y cariño incondicional a lo largo de mis estudios.

Ing. José M. Tay Oroxom

Por su asesoría y orientación invaluable en el desarrollo de esta investigación.

Inga. Lisely de León Arana

Por su tiempo, colaboración y aportes para la realización de esta investigación.

Estudiantes del curso laboratorio de IQ-1, segundo semestre 2008

Por su colaboración y dedicación para la ejecución de esta investigación.

Escuela de Ingeniería Química

Por velar por el rendimiento académico de cada estudiante y su exhortación por alcanzar la excelencia académica.

Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala

Por la excelente formación académica recibida.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi fortaleza en todo tiempo, por rebasar mis sueños y colmarme de bendiciones. Todo te lo debo a ti.
Mis padres	Cornelio Reyes y Aurora de Reyes, por darme todo el apoyo posible y por alentarme hacer las cosas mejor, que Dios les bendiga siempre.
Mis hermanos	Edwin, Sefora y Pricila, gracias por estar presentes en los mejores momentos de mi vida y por ayudarme a resolver mis problemas. Bendiciones para cada uno de ustedes.
Mis amigos	De quienes siempre he recibido apoyo y con quienes he tenido el agrado y la suerte de compartir tantas experiencias de vida. A todos muchas gracias.
La Universidad San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de ser parte de los profesionales egresados de tan prestigiosa academia.

“Buenas cosas obtendrán los que esperan en Dios”

1.1.3.5	Asignación de las muestras seleccionadas	9
1.1.4	Características	9
1.1.4.1	Simplicidad	9
1.1.4.2	Grado de precisión	10
1.1.4.3	Ausencia de error sistemático	10
1.1.4.4	Rango de validez de las conclusiones	10
1.1.4.5	Cálculo del grado de incertidumbre	11
1.1.5	Principios básicos	11
1.1.5.1	Información experimental o realización de rép.	11
1.1.5.2	Aleatorización	11
1.1.5.3	Formación de Bloques	12
1.1.5.4	Confiabilidad y generalidad	12
1.1.5.5	Estrategias de Investigación	12
1.1.5.6	Validez interna y validez externa	13
1.1.5.7	Variabilidad	13
1.1.5.8	Control experimental	14
1.1.6	Aplicaciones	14
1.1.7	Evaluación y comparación	15
1.1.7.1	Capacidad informativa	15
1.1.7.2	Costo	15
1.1.7.3	Poder	16
1.1.7.4	Restricciones metodológicas	16
1.1.7.5	Restricciones prácticas	16
1.1.7.6	Propósito	17
1.1.7.7	Efecto de la estadística	17
1.2	Diseño experimental en la Ingeniería Química	17
1.2.1	Experimentación en la Ingeniería Química	18
1.2.2	Características	19
1.2.2.1	Manipulación	20
1.2.2.2	Control	20
1.2.2.3	Distribución aleatoria	20

1.2.3	Clases de experimentos	21
1.2.3.1	Experimentos exploratorios	21
1.2.3.2	Experimentos confirmatorios	22
1.2.3.3	Investigación no experimental	22
1.2.3.3.1	Estudios transaccionales	22
1.2.3.3.1.1	Estudios transaccionales descriptivos	22
1.2.3.3.1.2	Estudios transaccionales correlacionales	23
1.2.3.3.2	Estudios longitudinales	23
1.2.3.3.2.1	Estudios longitudinales de tendencia	23
1.2.3.3.2.2	Estudios longitudinales de grupo	23
1.2.3.3.2.3	Estudios longitudinales de panel	23
1.2.4	Diseño de experimentos	24
1.2.4.1	Ejecución del diseño experimental	24
1.2.4.1.1	Descripción del problema en estudio	26
1.2.4.1.1.1	Definición de objetivos	26
1.2.4.1.1.2	Preguntas referentes a la Investigación	26
1.2.4.1.1.3	Justificación del procedimiento	27
1.2.4.1.2	Descripción de las variables involucradas	27
1.2.4.1.2.1	Factores tratamiento	27
1.2.4.1.2.2	Factores nuisance	28
1.2.4.1.2.2.1	Factor bloque	28
1.2.4.1.2.2.2	Factor ruido	29
1.2.4.1.2.2.3	Covariable	29
1.2.4.1.3	Selección de las variables de respuesta	29
1.2.4.1.4	Elección del diseño experimental adecuado	30
1.2.4.1.4.1	Diseño de tratamientos	30
1.2.4.1.4.2	Diseño de control de error	30
1.2.4.1.4.3	Muestreo	31
1.2.4.1.4.4	Diseño de observaciones	31

1.2.4.1.5	Planteamiento de hipótesis	31
1.2.4.1.5.1	Hipótesis científica	32
1.2.4.1.5.2	Hipótesis estadística	32
1.2.4.1.5.2.1	Hipótesis nula	32
1.2.4.1.5.2.2	Hipótesis alternativa	33
1.2.4.1.6	Realización del experimento	33
1.2.4.2	Análisis de los resultados	33
1.2.4.2.1	Análisis estadístico de datos	33
1.2.4.2.1.1	Según número de factores	35
1.2.4.2.1.1.1	Unifactorial	35
1.2.4.2.1.1.2	Multifactorial	35
1.2.4.2.1.2	Según número de repeticiones	35
1.2.4.2.1.2.1	Igual número de repeticiones	35
1.2.4.2.1.2.2	Desigual número de repeticiones	35
1.2.4.2.1.3	Según la forma de seleccionar los niveles de los factores	36
1.2.4.2.1.3.1	Modelo de efectos fijos	36
1.2.4.2.1.3.2	Modelo de componentes de varianza	36
1.2.4.2.1.3.3	Modelo mixto	36
1.2.4.2.2	Formulación de conclusiones y recomendaciones	36
1.3	Modelos de diseños experimentales clásicos	37
1.3.1	Diseños comparativos	38
1.3.2	Diseños simples	38
1.3.2.1	Diseño completamente aleatorizado	39
1.3.2.2	Ventajas	40
1.3.2.2.1	Flexibilidad	40
1.3.2.2.2	Análisis estadístico simple	40
1.3.2.2.3	Máximo número de grados de libertad	

para el error	40
1.3.2.2.4 Precisión	41
1.3.2.3 Desventajas	41
1.3.3 Diseños en bloques	42
1.3.3.1 Ventajas	42
1.3.3.1.1 Eficacia	42
1.3.3.1.2 Tratamiento estadístico	43
1.3.3.2 Desventajas	43
1.3.3.3 Modalidades	44
1.3.3.3.1 Diseño en bloques al azar	44
1.3.3.3.2 Diseño cuadrado latino	45
1.3.3.3.3 Diseño cuadrado grecolatino	46
1.3.4 Diseños factoriales	47
1.3.4.1 Ventajas	48
1.3.4.1.1 Economía en material experimental	48
1.3.4.1.2 Interacción entre todos los factores	49
1.3.4.1.3 Control de error	49
1.3.4.2 Desventajas	49
1.3.4.3 Modalidades	50
1.3.4.3.1 Diseño factorial de dos factores	50
1.3.4.3.2 Diseño factorial general	51
1.3.4.3.3 Diseño factorial con bloqueo	52
1.3.4.3.4 Diseño factorial 2^k	52
2. MARCO METODOLÓGICO	55
2.1 Recursos utilizados	55
2.1.1 Recursos humanos	55
2.1.2 Recursos físicos	55
2.2 Unidades experimentales involucradas	56
2.2.1 Intercambiador de calor de concha y tubos de cobre (ICCTCu)	56

2.2.2	Medidores de flujo de agua (MDF)	57
2.2.3	Intercambiador de calor de tubos concéntricos (ICTC)	58
2.2.4	Bomba centrífuga (BC)	60
2.3	Procedimiento de trabajo	61
2.3.1	Inducción a los estudiantes del curso	62
2.3.2	Elaboración de guía	63
2.3.3	Ejecución de diseños experimentales	65
2.3.4	Desarrollo de diseños experimentales por parte de los estudiantes del curso	65
2.3.5	Supervisión	66
2.3.6	Evaluación	67
2.3.7	Reforzamiento y apoyo técnico	68
2.3.8	Procedimiento de evaluación y comparación	70
2.3.9	Selección	71
2.3.10	Realización de cambios y modificaciones	71
2.3.11	Propuesta de diseños experimentales	71
2.3.12	Evaluación final	72
3.	RESULTADOS	73
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	123
	CONCLUSIONES	127
	RECOMENDACIONES	129
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
	BIBLIOGRAFÍA	133
	APÉNDICE	135
	Apéndice A: Instrumentos de evaluación	137
	Apéndice B: Cuestionarios de evaluación	143
	Apéndice C: Ecuaciones y tablas para ANDEVA	147
	Apéndice D: Curvas de operación para número de corridas	157
	Apéndice E: Diagrama para iniciar trabajo de graduación	165

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Modelo general de un proceso de investigación	6
2.	Modelo lógico del diseño experimental	25
3.	Modelo del diseño experimental comparativo simple	38
4.	Procedimiento de aleatorización	39
5.	Modelo del diseño experimental completamente aleatorizado	41
6.	Modelo del diseño experimental en bloques al azar	45
7.	Modelo del diseño experimental cuadrado latino	46
8.	Modelo del diseño experimental cuadrado grecolatino	47
9.	Modelo del diseño experimental factorial de dos factores	50
10.	Modelo del diseño experimental factorial de tres factores	51
11.	Modelo del diseño experimental factorial tipo 2^k	53
12.	Unidad experimental para (ICCTCu)	57
13.	Unidad experimental para (MDF)	58
14.	Unidad experimental para (ICTC)	59
15.	Unidad experimental para (BC)	60
16.	Flujograma del desarrollo de la investigación	61
17.	Contenido temático cubierto en la presentación	62
18.	Esquema de la presentación realizada	63
19.	Metodología propuesta para el desarrollo de diseños experimentales en Ingeniería Química	64
20.	Supervisión del trabajo de los estudiantes	67
21.	Reforzamiento otorgado a un grupo de estudiantes	69
22.	Descripción de la población que ejecutó el programa	73

23.	Necesidad del DE en la carrera de IQ	74
24.	Capacidad de ejecución del DE en el estudiante de IQ	75
25.	Existencia de beneficios ejecutando el DE	76
26.	Fundamentación de datos experimentales con DE previo	77
27.	Fundamento de conclusiones, evaluado por encargados del curso donde se ejecutó el programa	78
28.	Conocimiento del DE antes del programa	79
29.	Conocimiento del procedimiento para la ejecución del DE	80
30.	Evaluación de la correcta utilización del DE	81
31.	Conocimiento de los diseños estadísticos clásicos	82
32.	Conocimiento del DE posterior a la ejecución del programa desarrollado en esta investigación	83
33.	Conocimiento del DE posterior a la ejecución del programa desarrollado en esta investigación	83
34.	Evaluación de la metodología desarrollada	84

TABLAS

I.	Avance de la calificación de diseño experimentales evaluados por el tesista para el grupo del día martes	85
II.	Avance de la calificación de diseño experimentales evaluados por el tesista para el grupo del día jueves	85
III.	Evaluación y comparación de los diseños experimentales seleccionados para la práctica ICCTCu	86
IV.	Evaluación y comparación de los diseños experimentales seleccionados para la práctica ICTC	87
V.	Evaluación y comparación de los diseños experimentales seleccionados para la práctica BC	87
VI.	Evaluación y comparación de los diseños experimentales seleccionados para la práctica MDF	88

LISTA DE SÍMBOLOS

ANOVA	<i>Analyze of variance</i> , análisis de varianza
DCA	Diseño completamente aleatorizado
n	Número de réplicas o corridas
N	Número total de observaciones
t	Tratamientos
UE	Unidad experimental
ICCTCu	Intercambiador de calor de concha y tubos de cobre
MDF	Medidores de flujo
ICTC	Intercambiador de calor de tubos concéntricos
BC	Bomba centrífuga
DE-E	Cuestionario de evaluación para estudiantes del curso
DE-A	Cuestionario de evaluación para encargados del curso
IQ	Ingeniería Química
DE	Diseño experimental
Ho	Hipótesis nula
Ha	Hipótesis alternativa
GL	Grados de libertad
SC	Sumatoria de cuadrados
MC	Cuadrados medios
F	Valor de F para comparación en análisis de varianza
P	Probabilidad de aceptación de la hipótesis nula
S	Desviación estándar
%	Tanto por ciento
UR	Unidades del Rotámetro
° C	Temperatura en grados Celsius

m	Longitud en metros
mm	Longitud en milímetros
PSI	Presión en lb/plg ²
atm	Presión en atmósferas
mmHg	Presión en milímetros de mercurio
Hp	Potencia en horse-power
RPM	Revoluciones por minuto
lb/plg²	Libras por pulgada cuadrada
Kg/s	Kilogramos por segundo
m³/s	Metros cúbicos por segundo
lb/ft²	Libras por pies cuadrados
Btu/ h ft² °F	Btu por hora por pies cuadrados por grados Fahrenheit
KW/m² °K	Kilowatts por metros cuadrados por grados Kelvin
NPSH	Cabeza de succión neta positiva
NRe	Número de Reynolds
NPr	Número de Prandtl
Yij	Observación en el i-ésimo tratamiento en la j-ésima repetición

GLOSARIO

A priori	Locución latina que expresa un juicio, conocimiento o conclusión anterior a la experiencia.
Alfa (α)	Valor utilizado en pruebas de hipótesis que representa el máximo nivel de riesgo aceptable para rechazar una hipótesis nula verdadera y se expresa como una probabilidad cuyos valores se encuentran entre 0 y 1.
Análisis de regresión	Análisis estadístico que genera una ecuación para describir la relación estadística entre uno o más predictores y la variable de respuesta, para predecir nuevas observaciones.
Análisis de varianza	Análisis estadístico que prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales, evaluando la importancia de uno o más factores en los diferentes niveles de factores.
Bloque	Grupo de corridas experimentales realizadas en condiciones relativamente homogéneas.

Confusión	Son los efectos que no se pueden estimar por separado y ocurre cuando se utiliza un diseño factorial fraccional, porque no se ejecutan todas las combinaciones de niveles de factores.
Control local	Consiste en tomar medidas dentro del diseño experimental para hacerlo más eficiente, de tal manera que pueda permitir la reducción del error experimental y así hacerlo más sensible a cualquier prueba de significación.
Corrida	Cada condición experimental o combinación de niveles de factor en la cual se miden las respuestas.
Diseño paramétrico	Diseño que hace insensibles a los factores ambientales o de otra índole que son difíciles de controlar.
Experimento factorial	Es el diseño de experimentos en el cual existen observaciones de todos las posibles combinaciones de tratamientos.
Factor	Son las variables independientes que pueden influir en la variabilidad de la variable de interés.
Factor bloque	Es un factor en el que no se está interesado en conocer su influencia en la respuesta pero se supone que ésta existe y se quiere controlar para disminuir la variabilidad residual.

Factor tratamiento	Es un factor del que interesa conocer su influencia en la respuesta.
Grados de libertad	La cantidad de información suministrada por sus datos que se puede "gastar" para estimar los valores de parámetros desconocidos de población y calcular la variabilidad de estos estimados.
Hipótesis	Es un enunciado o conjunto de enunciados que precede a otros enunciados y constituye su fundamento.
Interacción de factores	Existe interacción entre dos factores, si el efecto de algún nivel de un factor cambia al cambiar de nivel en el otro factor.
Niveles	Son los tipos o grados específicos del factor que se tendrán en cuenta en la realización del experimento.
Postfacto	Locución latina que se refiere a los acontecimientos después del hecho generador.
Observación	Es una medida en las condiciones determinadas por uno de los tratamientos.
Réplicas	Múltiples corridas experimentales con la misma configuración de factores (niveles).

Sesgo	El grado en que un conjunto de datos no es simétrico.
Significación estadística	Se tiene significancia estadística cuando se demuestra que es poco probable que una hipótesis haya ocurrido por casualidad.
Testigo	Es el tratamiento de comparación adicional, que se constituye como referencial del experimento y sirve para la comparación de los tratamientos en prueba.
Tratamiento	Son las condiciones experimentales que se desean comparar en el experimento. En un diseño con un único factor son los distintos niveles del factor y en un diseño con varios factores son las distintas combinaciones de niveles de los factores.
Unidades Experimentales	Son el material donde evaluar la variable de respuesta y al que se le aplican los distintos niveles de los factores tratamiento.
Unidad de muestreo o unidad Observacional	Es aquella fracción de la unidad experimental sobre la cual se mide el efecto del tratamiento.
Variable de respuesta	Es la variable que se desea estudiar y controlar su variabilidad.

RESUMEN

Con el objeto fundamental de establecer la aplicación del diseño experimental en la carrera de Ingeniería Química, se desarrolló una metodología específica para introducir a los estudiantes del curso objetivo al conocimiento del mismo, la cual consistió inicialmente en el desarrollo de los fundamentos teóricos de tal modo que cada estudiante pudo extraer la esencia que es aplicable en la carrera de Ingeniería Química, para luego desarrollar los diseños experimentales de cada práctica interna del curso.

Inicialmente se desarrolló un proceso de inducción al tema para suplir los fundamentos teóricos, a continuación se realizó un programa de supervisión y dirección constante que le permitió a cada estudiante del curso desarrollar y perfeccionar cada uno de los diseños experimentales elaborados. De esta manera el estudiante del laboratorio de Ingeniería Química I, logró introducirse al conocimiento y aplicación del diseño experimental en la Ingeniería Química, conociendo así los beneficios e implicaciones satisfactorias que con la utilización del mismo se generan, creando en ellos las expectativas para la utilización del diseño experimental en cualquier experimentación de la carrera. Se consiguió comprobar la hipótesis formulada de que el diseño experimental debe ser aplicado en la carrera de Ingeniería Química otorgando así resultados más consistentes y de mayor significación, que sirven de buen fundamento para la formulación de conclusiones en la investigación experimental, así también se obtuvieron los mejores diseños experimentales de cada práctica validada por los estudiantes, de tal manera que estos puedan ser utilizados como casos prácticos de la aplicación del tema.

OBJETIVOS

GENERAL

Establecer la aplicación fundamental del diseño experimental en la carrera de Ingeniería Química, mediante la propuesta de diseños experimentales de las prácticas del curso de laboratorio de Ingeniería Química de la facultad de ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala.

ESPECÍFICOS:

1. Establecer los parámetros metodológicos que rigen al diseño experimental en la Ingeniería Química, que son válidos al conjunto de experimentaciones llevadas a cabo a lo largo de la carrera.
2. Introducir al estudiante de Ingeniería Química al conocimiento y aplicación del diseño experimental, mediante la elaboración de diseños experimentales de las prácticas internas del área de operaciones unitarias.
3. Realizar la validación y propuesta de diseños experimentales de las prácticas internas del área de operaciones unitarias.

HIPÓTESIS

El diseño experimental debe ser aplicado en la carrera de Ingeniería Química otorgando así resultados más consistentes y de mayor significación, capaces de servir de buen fundamento para la formulación de conclusiones en la investigación experimental.

INTRODUCCIÓN

Debido a que la experimentación se ha convertido en la base fundamental para la comprobación de postulados, hipótesis, teorías científicas, recolección de datos e información confiable en la Ingeniería Química, resulta de drástica importancia introducir al estudiante de la carrera de Ingeniería Química hacia el conocimiento del diseño experimental y las implicaciones satisfactorias que con la utilización del mismo se logran. Sin embargo la experimentación pierde completamente su valor si no existe un diseño previo que garantice la fidelidad e importancia del procedimiento experimental seleccionado; a partir del cual se obtendrían los datos experimentales de naturaleza significativa, con el menor margen de error para la toma de decisiones y fundamentación de conclusiones.

Es por ello que esta investigación pretende ser una base para que el estudiante de la carrera de Ingeniería Química sea capaz de diseñar cualquier tipo de experimento de laboratorio y lograr consigo la obtención de datos más certeros, que pueda analizar con diferentes técnicas y herramientas estadísticas para aceptar o rechazar los datos, procedimientos, métodos, técnicas, y de esta manera formular conclusiones mejor fundamentadas.

En esta investigación se consigue realizar un recorrido de los fundamentos teóricos que dictan las directrices del diseño experimental.

Así también, se establece la esencia aplicable en la Ingeniería Química de modo que se presenta la metodología que permite ejecutar diseños experimentales en la carrera de Ingeniería Química, específicamente en el área de operaciones unitarias.

Finalmente, se presenta una serie de casos de aplicación del diseño experimental en el área de operaciones unitarias, diseños que fueron desarrollados y validados por los estudiantes del curso que ejecutaron la metodología descrita en esta investigación, cada uno de estos diseños también fueron evaluados de modo que se presentan los mejores diseños correspondientes a las prácticas de intercambiador de calor de concha y tubos de cobre, medidores de flujo, intercambiador de calor de tubos concéntricos y bomba centrífuga; estos casos se presentan con el objeto de servir de ejemplo para el desarrollo de diseños experimentales en la carrera de Ingeniería Química.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Diseño experimental

La estadística se ha convertido en una herramienta fundamental e indispensable para garantizar todas las investigaciones experimentales. Mediante la utilización de las herramientas estadísticas existentes se puede valorar de forma significativa el fundamento de los datos experimentales obtenidos, consiguiendo de esta manera la consistencia de las experimentaciones y la fundamentación de los postulados comprobados.

La estadística en el diseño experimental juega tres funciones primordiales: la descripción del acontecimiento experimental, mediante el establecimiento del procedimiento adecuado que permita las comparaciones de interés; el análisis de los resultados obtenidos, mediante la utilización de técnicas y herramientas estadísticas que permitan la valoración probabilística de los resultados; y la predicción de situaciones futuras, mediante la obtención de modelos correlacionales de significación estadística que describan el comportamiento de las variables de interés. Mediante la interacción de estas tres funciones y la previa formulación de hipótesis de comprobación estadística, el experimentador logra que el acontecimiento experimental adquiera el carácter de validez deseado para la fundamentación de sus conclusiones.

El conjunto de decisiones correspondientes al planeamiento del experimento que permiten la interacción de estas tres funciones se conoce como diseño experimental.

1.1.1 Antecedentes

A lo largo de los años el diseño experimental estadístico ha venido desarrollándose, adquiriendo así las características que le han permitido convertirse en una disciplina fundamental de todo tipo de investigaciones experimentales. Principalmente este desarrollo se puede clasificar en cuatro eras fundamentales donde el diseño experimental ha tenido las mayores transformaciones y extensiones, estas son la era agrícola, la era industrial, era de la calidad y la era actual.

1.1.1.1 Desarrollo de la era agrícola

El diseño experimental nació con un enfoque hacia la agricultura, basado principalmente en el trabajo de Ronald A. Fisher, quien en los años de 1920 sentó los principios fundamentales del diseño experimental con enfoque estadístico de tal forma que los datos obtenidos de experimentos no dificultaran el análisis de los mismos.

Fisher propuso la utilización de métodos y técnicas estadísticas que permitieran el análisis de los datos experimentales mediante la planeación de experimentos basados en tres principios fundamentales aleatorización, realización de réplicas y formación de bloques.

Con el trabajo de Fisher se logró incorporar al diseño de experimentos principios estadísticos que incluyeron el diseño factorial y el análisis de varianza. Así se logró la aplicación del diseño de investigaciones en ciencias biológicas y principalmente en las ramas de la agricultura.

1.1.1.2 Desarrollo de la era industrial

Con el desarrollo del diseño experimental agrícola, surge la duda que el diseño experimental llevado a cabo en experimentos industriales fuese compatible con el diseño experimental desarrollado hasta el momento; ya que los experimentos agrícolas difieren notoriamente de los experimentos llevados a cabo en la industria. La diferencia radica primordialmente en la variable de respuesta, en las experimentaciones en la industria esta puede observarse casi de forma inmediata siendo el caso contrario de la experimentación agrícola.

En el año de 1930, Box G.E.P y K.G. Wilson desarrollaron la metodología que permitió la aplicación del diseño experimental en experimentaciones de la industria, facilitando así su pronta utilización asentándose en el principio de inmediatez y secuencialidad que gozan las experimentaciones de pronta respuesta. A partir de estas investigaciones se desarrollaron los principios que generalizaron el diseño experimental hacia las industrias químicas e industrias de procesos en los trabajos de investigación y desarrollo.

1.1.1.3 Desarrollo de la era de la calidad

Con el enfoque tendiente al mejoramiento de la calidad en la industria, se desarrolló una nueva era del diseño experimental esta vez dirigida a los experimentos tendientes al mejoramiento de la calidad.

Durante la década de 1970, Genichi Taguchi desarrolló los principios del diseño experimental enfocado al mejoramiento de la calidad, proponiendo así el diseño paramétrico robusto el cual se basa en hacer los procesos insensibles a los factores ambientales o de otra índole que son difíciles de controlar; y así fabricar productos insensibles a la variación encontrando los niveles de las variables del proceso que obliguen a la obtención de los valores estándar. El trabajo de Taguchi insertó nuevas metodologías en torno a la obtención del diseño paramétrico robusto. Esta metodología demostró que aún cuando se basaba en conceptos de la ingeniería, aún persistían problemas e torno a la estrategia experimental y metodología de análisis de datos.

1.1.1.4 Era actual

Con el desarrollo continuo de cada una de las eras ya mencionadas, el diseño experimental ha cobrado una basta aplicación; extendiéndose el uso de los experimentos diseñados para las industrias que desarrollan componentes de alta precisión tal como industria automotriz, electrónica, aeroespacial entre otras. En la era actual se ha tenido un desarrollo continuo del diseño experimental que ha generado diferentes enfoques, que permiten llevar a cabo diseños experimentales para cualquier experimentación de manera efectiva.

Finalmente las aplicaciones del diseño experimental son múltiples, especialmente en la investigación de las ciencias naturales, ingeniería, laboratorios y casi todas las ramas de las ciencias sociales. Teniendo el enfoque primordial en las diversas ramas de la ingeniería como factor clave para mejorar la competitividad industrial.

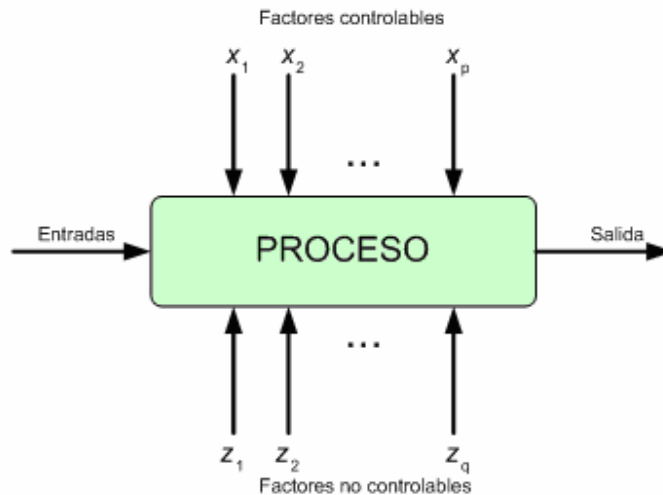
1.1.2 Definición

Un experimento es llevado a cabo con el objeto fundamental de establecer si una o más variables independientes afectan o no, a una o más variables dependientes y por qué lo hacen. Para obtener respuesta de esta relación supuesta, el investigador hace variar la variable independiente y observa si la dependiente varía o no.

Mediante un diseño experimental se establecen las condiciones óptimas que permitan la observación de la dependencia de una o más variables experimentales con otras, de tal forma que se obtengan los datos adecuados que puedan ser analizados mediante métodos y herramientas estadísticas que deriven conclusiones válidas y objetivas.

De esta manera se logra la obtención de información de una alta fidelidad, aprovechando de una mejor forma los recursos disponibles.

Figura 1. “Modelo general de un proceso de investigación”



Fuente: Montgomery Douglas, **Diseño y análisis de experimentos**. Pág. 2.

Por lo tanto, un diseño experimental pretende la elaboración de un plan de acción, de acuerdo con el cual se asignan las diferentes variables experimentales a los diferentes grupos o condiciones experimentales, en los cuales el diseño experimental establece de antemano la operativa en la que serán comparados estos sujetos y el tipo de análisis estadístico que es el más indicado según la naturaleza de los datos.

1.1.3 Fundamentación

El propósito de cualquier diseño experimental es proporcionar una cantidad máxima de información pertinente al problema bajo investigación, regularmente un diseño experimental trata de explicar los siguientes aspectos en una experimentación:

1.1.3.1 Exposición de las finalidades de la experimentación

Se deben especificar y enumerar las finalidades fundamentales del experimento de modo que se lleven a cabo únicamente operativas que generen la observación de los datos pertinentes para el cumplimiento de las finalidades de la experimentación. Además debe evaluarse el método de interés para obtener los resultados, estableciendo la justificación de la elección del método seleccionado en comparación con los demás existentes que permitan la colección de datos experimentales.

1.1.3.2 Serie de tratamientos seleccionados

Son todas aquellas condiciones experimentales que se desean generar con el objeto que la unidad experimental muestre como respuesta los datos de interés y estos pueden ser comparados con otros tratamientos u otros niveles de tratamiento; seleccionando dentro de todos los tratamientos, sólo aquellas condiciones de interés, es decir las condiciones bajo las cuales se quiere estudiar la variable de respuesta.

1.1.3.3 Factores de afección de las variables de respuestas

Consiste en la delimitación de todas aquellas variables extrañas que puedan influenciar en los datos obtenidos y que contribuyan al aumento de la variabilidad de los resultados, tales como factores extraños controlables y no controlables.

1.1.3.3.1 Factores perturbadores controlables

Dentro de esta categoría se incluyen todos aquellos factores cuyos niveles pueden ser ajustados por el experimentador. Sobre estos factores el experimentador sabe de antemano o puede establecer la variabilidad o afección que tiene sobre las variables de respuestas en estudio.

1.1.3.3.2 Factores de ruido

Cuando un factor varía de forma natural y esta variación no es controlable o cuantificable sobre la variable de respuesta, se dice que se trata de un factor perturbador no controlable o comúnmente llamado factor de ruido. En esta situación es recomendable encontrar los ajustes de los factores controlables que minimicen la variabilidad transmitida por los factores de ruido, mediante un estudio de robustez del proceso.

1.1.3.4 Número de muestras necesarias

Para lograr establecer un grupo de resultados experimentales contenidos dentro de un intervalo de confianza determinado por el experimentador, es decir la garantía de que los datos son representativos, se debe establecer un número de replicas de la actividad experimental que conlleve a la manipulación de datos de una alta fidelidad. El número de réplicas en la experimentación se establece mediante la utilización de herramientas estadísticas que minimicen la variabilidad de los datos observados. En ocasiones también se puede incurrir al análisis de recursos disponibles en la experimentación tales como, material experimental, costo, número de experimentadores, tiempo.

1.1.3.5 Asignación de las muestras seleccionadas

Con el objeto fundamental de eliminar la afección de factores extraños a los datos experimentales, se incurre a una asignación de las corridas de forma aleatorizada a los diferentes factores de interés. De modo que la distribución de réplicas del experimento sea llevada en un orden generalmente secuencial.

1.1.4 Características

El planeamiento correcto de un diseño experimental otorgará datos experimentales que describan fielmente el acontecimiento experimental, los cuales al ser analizados servirán de buen fundamento para la emisión de conclusiones.

El diseño experimental cumple con las siguientes características:

1.1.4.1 Simplicidad

Se refiere a que la selección de los tratamientos y la disposición experimental, deberá hacerse de la forma más simple. También es importante que el diseño, plan o programa de prueba sea tan simple como posible. Esto con el objeto fundamental de ahorrar tiempo, dinero, personal y material experimental. Afortunadamente, la mayoría de los diseños estadísticos simples, no sólo son fáciles de analizar sino también son eficientes económica y estadísticamente hablando.

1.1.4.2 Grado de precisión

Mediante el diseño experimental se debe garantizar que el experimento tenga la capacidad de medir diferencias entre tratamientos con los grados de precisión deseados. El grado de precisión deseado por el experimentador en una investigación se logra mediante el correcto establecimiento del diseño experimental así como la selección del número de réplicas adecuado para el experimento.

1.1.4.3 Ausencia de error sistemático

La experimentación planeada asegura que las unidades experimentales que reciban un tratamiento no difieran sistemáticamente de aquellas que reciben otro tratamiento. Procurando de esta manera la reducción del error sistemático mediante la mejora de procedimientos y métodos experimentales, calibración o ajuste de instrumentos utilizados y el uso correcto de las ecuaciones para la obtención de los resultados.

1.1.4.4 Rango de validez de las conclusiones

Definiendo intervalos de confianza y niveles de significancia adecuados en la experimentación, se contribuye a aumentar el rango de validez del experimento. Lo cual se logra primordialmente con los experimentos replicados y los experimentos con estructuras factoriales que permiten la obtención de datos más significativos y la comparabilidad total entre los factores de interés sobre la variable de respuesta seleccionada en estudio.

1.1.4.5 Cálculo del grado de incertidumbre

En todo experimento existe algún grado de incertidumbre en cuanto a la validación de las conclusiones. El experimento deberá ser concebido de modo que sea posible calcular la probabilidad de obtener los resultados observados debidos únicamente al azar como principio fundamental estadístico.

1.1.5 Principios básicos

Existe una serie de consideraciones sumamente relevantes para todo aquel que intenta comprender o participar en la experimentación y muy particularmente para quien desea diseñar un experimento. Siendo los principios básicos del diseño experimental los siguientes:

1.1.5.1 Información experimental o realización de réplicas

Para obtener un mínimo de información útil, se requiere obtener datos de dos observaciones minuciosas, con el fin de poder hacer por lo menos una comparación formal, por lo tanto se deben planear situaciones en la cuales se pueda lograr al menos esas dos observaciones o medidas.

1.1.5.2 Aleatorización

Consiste en la asignación al azar de los tratamientos en estudio a las unidades experimentales con el propósito de asegurar la mínima afección sobre el experimento por parte de factores extraños incontrolables.

Por otro lado la aleatorización hace válidos los procesos de inferencia y las pruebas estadísticas.

1.1.5.3 Formación de bloques

Es una herramienta que permite la agrupación de observaciones pertenecientes a un mismo grupo o por lo menos a un grupo de variabilidad semejante. Se utiliza para mejorar la precisión de las comparaciones que se hacen entre los factores de interés. Debido a que la experimentación se encuentra ligada a los factores perturbadores resulta de drástica importancia la minimización de cualquier variabilidad contenida o generada por estos factores.

1.1.5.4 Confiabilidad y generalidad

Se refiere a la consistencia que muestran los datos a través del tiempo dadas las mismas condiciones, siendo la única forma razonable de obtener estos datos por replicación, ya que es esta la que provee las bases sólidas para la generalización.

1.1.5.5 Estrategias de Investigación

Mediante diferentes estrategias de investigación se formula una hipótesis tanto estadística como científica para que una vez formulada se seleccione un diseño experimental con el cual se logre la evaluación y comprobación de las mismas.

1.1.5.6 Validez interna y validez externa

A lo largo de la ejecución de un experimento, se presentan diversos factores o fuentes que pueden hacer que exista confusión en torno al comportamiento o influencia verdadera de una variable independiente. Este conjunto de conjeturas se refieren a la validez de un experimento, validez tanto interna como externa.

Un experimento debe buscar ante todo validez interna; lo que le garantiza la confianza en los resultados, y posteriormente la validez externa; que se refiere a qué tan generalizados son los resultados de un experimento a situaciones no experimentales y a otros sujetos o poblaciones. Para lograr la validez interna y externa en un experimento debe eliminarse todas las posibles fuentes de invalidación.

1.1.5.7 Variabilidad

Este tipo de análisis se puede utilizar para evaluar datos de un diseño en el cual se miden datos repetidamente a los mismos sujetos, de un diseño en el que se manipulan dos o más validaciones internas. De modo que se pueda establecer la variabilidad de los datos obtenidos en una serie de observaciones sucesivas, el cual puede ser presentado al final como un grado de incerteza de los resultados finales.

1.1.5.8 Control experimental

Consiste en tomar medidas dentro del diseño experimental para hacerlo más eficiente, de tal manera que pueda permitir la reducción del error experimental y así hacerlo más sensible a cualquier prueba de significación.

1.1.6 Aplicaciones

Un diseño experimental es aplicable para cualquier experimento que pretenda:

- a) Determinar las principales causas de variación en la respuesta.
- b) Encontrar las condiciones experimentales con las que se consigue un valor extremo en la variable de interés o respuesta.
- c) Comparar las respuestas en diferentes niveles de observación de variables controladas.
- d) Obtener un modelo estadístico-matemático que permita hacer predicciones de respuestas futuras.

1.1.7 Evaluación y comparación

En muchas investigaciones experimentales ocurre que para la misma actividad experimental, son aplicables diferentes diseños experimentales, por ello es que surge la evaluación y comparación entre los diseños experimentales. Esto se logra mediante una evaluación que permite considerar las características de cada diseño para establecer el más conveniente al estudio. Las evaluaciones a realizar son:

1.1.7.1 Capacidad informativa

Esta premisa se refiere a establecer que tanta información útil se obtiene del diseño experimental seleccionado. Cabe destacar que mientras más complejo sea el diseño experimental mayor información proporcionará, pero sin duda alguna esta decisión dependerá de la naturaleza del sistema bajo estudio así como la cantidad de observaciones que se permiten de la unidad experimental.

1.1.7.2 Costo

Se deben analizar factores que involucren cualquier gasto de recursos cuantificables (tiempo, dinero, material experimental). Por ello resulta factible seleccionar aquel diseño experimental que permita obtener la información necesaria con el menor número de observaciones por unidad experimental, menor número de sujetos de prueba, menor número de condiciones experimentales. Este concepto se relaciona con el esfuerzo tanto físico como económico que es necesario invertir para obtener la información requerida.

1.1.7.3 Poder

Esta premisa se refiere a la relación que guarda el costo y la capacidad informativa. De modo que un diseño será evaluado como un diseño del alto poder cuando por el mismo costo se genera mayor cantidad de información útil, sin embargo no analiza los factores de confiabilidad de los datos mostrados en cada diseño experimental.

1.1.7.4 Restricciones metodológicas

Se refiere a todas aquellas limitaciones de la metodología que presente el diseño experimental, tales como uso de factores y niveles, comparaciones entre tratamientos, replicabilidad. Por lo tanto, el diseño debe adaptarse a las condiciones requeridas en la experimentación y no de forma contraria.

1.1.7.5 Restricciones prácticas

En muchas ocasiones resulta que un diseño experimental muestra ciertas restricciones que limitan las opciones de análisis del investigador, lo cual no permite obtener el análisis o comparación requeridos de los datos experimentales.

Se debe establecer como diseño experimental útil aquel que permita realizar los análisis estadísticos que comprueben las hipótesis de trabajo para la fundamentación de conclusiones meramente significantes de acuerdo a los objetivos de la experimentación.

1.1.7.6 Propósito

Esta premisa se relaciona con el propósito fundamental de investigación, otorgando la mejor evaluación al diseño que permita contestar las preguntas de la investigación realizada en contra del diseño que solo permita establecer comparaciones paradójicas.

1.1.7.7 Efecto de la estadística

El proceso de inferencia estadística depende de que las suposiciones en las que se basa un análisis no sean violadas, ya que si ocurre una violación, esto podría dar lugar a un trastorno de la secuencia de rechazo o aprobación de la hipótesis alternativa. Por lo tanto, el diseño seleccionado debe cumplir con los requisitos supuestos en la metodología del diseño.

1.2 Diseño experimental en la Ingeniería Química

En la carrera de Ingeniería Química la aplicación del diseño experimental ayuda a determinar que variables pueden ser manipuladas, en condiciones rigurosamente controladas, para la obtención de resultados más confiables, congruentes y significativos en la experimentación.

Una metodología de un buen diseño experimental ayuda a contestar diferentes interrogantes del investigador, tales como, el número de muestra de datos que deben recolectarse para que los resultados tengan cierta exactitud y nivel de significación, qué magnitudes son posibles de manipular en una experimentación cualquiera sin que se incurra a desviaciones considerables en torno a los resultados que se pretenden alcanzar, qué método de análisis estadístico se adapta mejor a la naturaleza de los datos para poder comprobar las hipótesis y postulados.

Sin embargo, a lo largo de la preparación de los ingenieros químicos, en muchas ocasiones las experimentaciones realizadas en los diferentes laboratorios, son llevadas a cabo por el estudiante sin un previo diseño experimental con lo cual el estudiante obtiene datos basándose únicamente en el criterio cualitativos y postulando conclusiones sin ningún tipo de fundamento y en el peor de los casos toman decisiones deliberadas basadas en la obtención de datos experimentales poco significativos.

1.2.1 Experimentación en la Ingeniería Química

La experimentación es una herramienta básica en las investigaciones empíricas debido a la importancia que posee la demostración de las relaciones causales. Es por ello que en la Ingeniería Química, una disciplina basada en las investigaciones empíricas, la metodología de la experimentación se ha ido enriqueciendo desde diversos ángulos.

Mediante la experimentación se pueden utilizar mecanismos que posibiliten aislar el fenómeno estudiado, realizar las réplicas del mismo en curso a las condiciones fijadas y sometidas a control, y finalmente, variar y buscar diferentes combinaciones con el objetivo de obtener el resultado buscado. Por lo tanto un experimento en Ingeniería Química se puede definir como el método común de las ciencias y las tecnologías, consistente en el estudio de un fenómeno, reproducido generalmente en un laboratorio, en las condiciones particulares de estudio, eliminando o introduciendo aquellas variables que puedan influir en él.

De manera general, se puede decir que consiste en ejecutar una acción y observar las consecuencias. Así hablaríamos de experimentar cuando mezclamos sustancias químicas y observamos la reacción de este hecho. En esta idea de experimento observamos que hay una manipulación intencional de una acción para analizar las posibles consecuencias. De manera particular o científica, la experimentación se refiere a un estudio de investigación en el que se manipulan deliberadamente una o más variables independientes (supuestas causas) para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efecto), dentro de de condiciones controladas por el investigador.

1.2.2 Características

La experimentación en la Ingeniería Química se caracteriza por las siguientes propiedades:

1.2.2.1 Manipulación

La manipulación se refiere a que por lo menos a un grupo experimental, se le induce un cambio, mientras que a otro grupo llamado grupo de control no se le aplica ninguna modificación; esto con el objeto de establecer hasta que nivel la variable de cambio produce determinados efectos en el grupo. Es decir, es el experimentador quien induce los cambios en al menos algunos de los sujetos en estudio, para finalmente observar las consecuencias de dichos cambios sobre las variables o sujetos de observación.

1.2.2.2 Control

En este conjunto de experimentaciones se debe mantener un grado de observación o cautela, que eviten la introducción de sesgos como consecuencia de influencias o procesos naturales sobre la unidad experimental. Es decir el experimentador introduce controles a las situaciones de prueba, que incluyen el uso de testigos y control de comparaciones.

1.2.2.3 Distribución aleatoria

Cada miembro perteneciente a los grupos experimentales, deben ser equivalentes. Como no existe posibilidad real, la mayoría de las veces se realiza para asegurar que cada miembro tenga su igual en todas las características en el otro grupo. Para lograr esta característica se incurre a la aleatoriedad por medio del cual se tiende a distribuir con la misma probabilidad a los distintos miembros. En algunas ocasiones el experimentador utiliza sorteo de papeles, uso de números múltiples o uso de tablas de números aleatorios.

1.2.3 Clases de experimentos

1.2.3.1 Experimentos exploratorios

Este tipo de experimentos son aquellos en el cual el investigador está interesado en encontrar los factores que tienen influencia sobre la ejecución de cierto proceso. En este caso el procedimiento consiste en variar los niveles de esos factores y comparar la ejecución de las diferentes combinaciones de niveles.

Para ejecutar el experimento muchas decisiones deben tomarse, tales como: la selección de los factores y sus niveles, la selección de un subconjunto de todas las posibles combinaciones, la distribución experimental que generalmente es determinada por las condiciones físicas y las consideraciones, la escogencia de la medida de la respuesta y la selección del análisis estadístico más adecuado para extraer conclusiones de los objetivos propuestos.

Este tipo de investigación experimental es esencialmente de tipo secuencial, un experimento antecede a otro ganándose cierto conocimiento en el proceso y proponiendo nuevas interrogantes que pueden mejorar los resultados del proceso experimental. Después de un experimento de tipo exploratorio, generalmente sigue un experimento confirmatorio.

1.2.3.2 Experimentos confirmatorios

Son aquellos en los cuales se trata de comparar el mejor procedimiento encontrado en el experimento exploratorio con un procedimiento establecido, con el objeto de determinar que el procedimiento nuevo es mejor que el antiguo. En el experimento confirmatorio, se puede querer encontrar el mejor procedimiento para establecer procesos de control. Debido a que las condiciones pueden cambiar, es importante, establecer la medida de respuesta y la variabilidad asociada con el proceso.

1.2.3.3 Investigación no experimental

Este tipo de investigación se realiza sin manipular deliberadamente las variables independientes, se basa en variables que ya ocurrieron o se dieron en la realidad sin la intervención directa del investigador. La investigación no experimental es conocida como investigación ex post-facto.

1.2.3.3.1 Estudios transaccionales

Son aquellos estudios en los cuales se realizan observaciones en un momento único en el tiempo.

1.2.3.3.1.1 Estudios transaccionales descriptivos

Cuando se miden variables de manera individual y se reportan esas mediciones se trata de estudios transaccionales descriptivos.

1.2.3.3.1.2 Estudios transaccionales correlacionales

Cuando se describen las relaciones entre variables y se establecen procesos de casualidad entre variables se trata de estudios transaccionales correlacionales o casuales.

1.2.3.3.2 Estudios longitudinales

En este tipo de estudios se realizan observaciones en dos o más momentos o puntos en el tiempo.

1.2.3.3.2.1 Estudios longitudinales de tendencia

Son aquellos que estudian a una población de datos únicamente.

1.2.3.3.2.2 Estudios longitudinales de grupo

Son aquellos estudios que analizan una subpoblación o grupo específico de datos.

1.2.3.3.2.3 Estudios longitudinales de panel

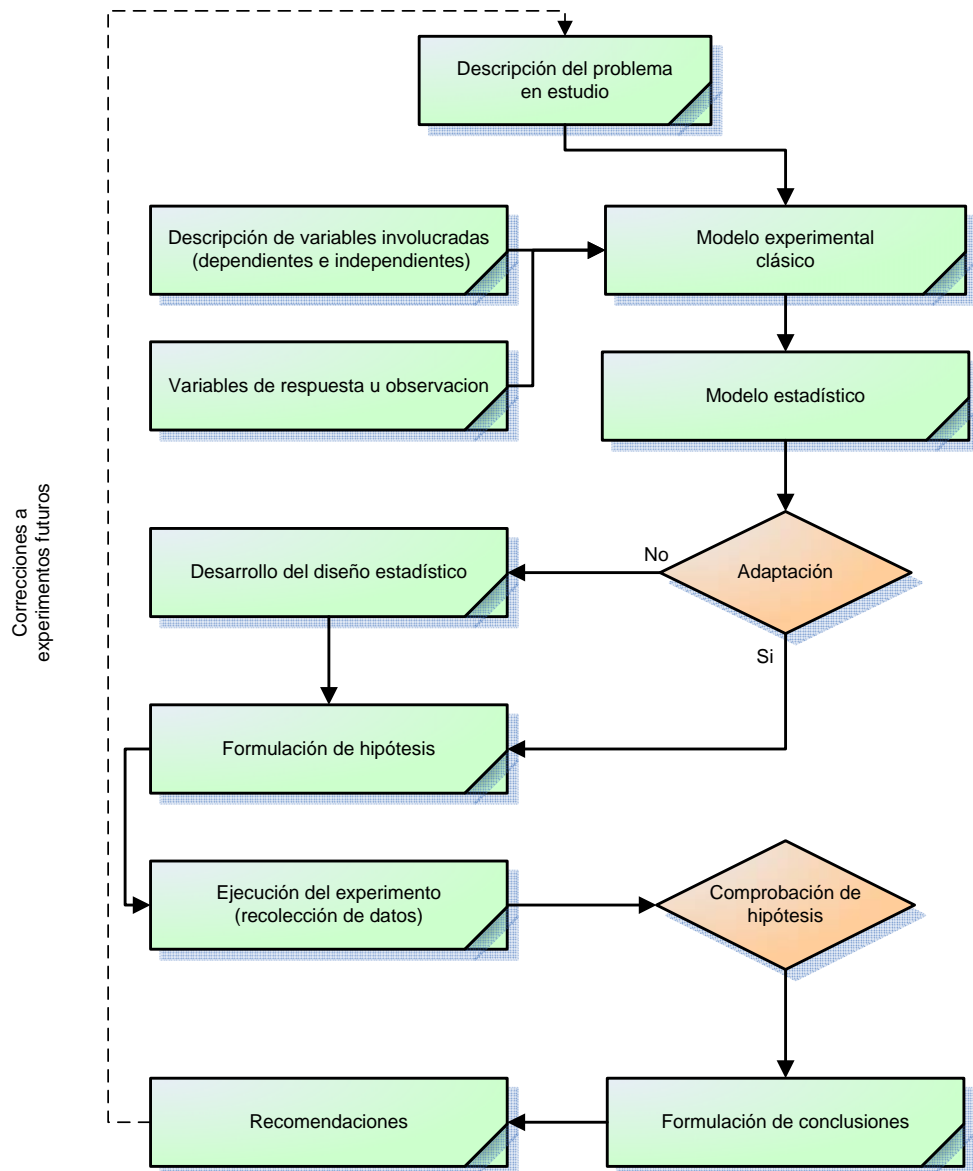
Son aquellos estudios que únicamente tratan a los sujetos de prueba.

1.2.4 Diseño de experimentos

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales; es fundamental conocer los factores que influyen realmente y cuantificar esta influencia, para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta. Del análisis y estudio de la información recogida se obtienen las conclusiones.

Para la utilización de un enfoque estadístico al diseñar un experimento, se requiere que el investigador posea una idea clara del sistema y los componentes del sistema que se encuentra en estudio, para que éste posea una lógica congruente en el desarrollo de las diferentes etapas que se incluyen en el diseño experimental, tales como: a) Definición del objeto fundamental de la experimentación determinada, b) Establecimiento de variables de operación involucradas para la elección de factores y niveles, c) Selección de las variables de salida para la obtención de datos experimentales, d) Elección del diseño experimental adecuado, e) Planteamiento de hipótesis de acuerdo a los resultados esperados, f) Realización del experimento, g) Análisis estadístico de datos, h) Formulación de Conclusiones y Recomendaciones mediante la comprobación de hipótesis.

Figura 2. “Modelo lógico del diseño experimental”



1.2.4.1 Ejecución del diseño experimental

La forma tradicional que se utiliza en la experimentación, para el estudio de estos problemas, se basa en estudiar los factores uno a uno, variando los niveles de un factor permaneciendo fijos los demás. A continuación se enumeran las etapas que deben seguirse para una correcta planificación de un diseño experimental, etapas que deben ser ejecutadas de forma secuencial.

1.2.4.1.1 Descripción del problema en estudio

Consiste en delimitar cual es la naturaleza de la investigación por la cual se lleva a cabo el experimento mediante el desarrollo de los siguientes apartados.

1.2.4.1.1.1 Definición de objetivos

En este apartado se desarrollan los objetos fundamentales por los cuales se lleva a cabo la experimentación, por medio de una descripción generalizada de los resultados que se pretenden obtener.

Normalmente la lista de objetivos es refinada o mejorada a medida que se van ejecutando las etapas del diseño de experimentos.

1.2.4.1.1.2 Preguntas referentes a la investigación

En este apartado se debe hacer una lista completa de las preguntas concretas a las que debe dar respuesta el experimento. Es importante indicar solamente cuestiones fundamentales, ya que tratar de abordar problemas colaterales puede complicar innecesariamente el experimento.

1.2.4.1.1.3 Justificación del procedimiento

En esta etapa, por medio de justificaciones se deben describir cuáles serán las variables que se manipularán y en qué forma para alcanzar los objetivos planteados, así como las diferentes combinaciones en las cuales se manipularan las variables de interés.

1.2.4.1.2 Descripción de las variables involucradas

Posteriormente, se debe realizar un análisis de todas las fuentes que puedan generar variabilidad en la o las variables de respuesta. Es recomendable hacer una lista de todas las posibles fuentes de variación del problema, distinguiendo aquellas que, a priori, generarán una mayor variabilidad. Se distinguen dos tipos.

Inicialmente se describen todas las variables como factores potenciales de diseños siendo estas aquellas variables que el experimentador podría estar interesado en variar y factores perturbadores como todas aquellas variables que contribuyan al aumento de la variabilidad de los datos.

Pero la clasificación general de todas estas variables puede cumplir con lo siguiente:

1.2.4.1.2.1 Factores tratamiento

Son aquellas fuentes cuyo efecto sobre la respuesta es de particular interés para el experimentador. Se describen como factores potenciales de diseño, ya que el experimentador podría estar interesado en su variación.

1.2.4.1.2.2 Factores nuisance

Son aquellas fuentes que no son de interés directo, pero que se contemplan en el diseño para reducir la variabilidad no planificada. Dentro de este tipo de factores se incluyen los factores bloques, factores ruido y covariables. Con el fin de controlar esta influencia pueden incluirse en el diseño nuevos factores que, atendiendo a su naturaleza, pueden ser de diversos tipos.

1.2.4.1.2.2.1 Factor bloque

En algunos casos el factor nuisance puede ser fijado en distintos niveles, de modo que es posible controlar su efecto a esos niveles. Entonces la forma de actuar es mantener constante el nivel del factor para un grupo de unidades experimentales, se cambia a otro nivel para otro grupo. Estos factores se denominan factores de bloqueo (factores-bloque) y las unidades experimentales evaluadas en un mismo nivel del bloqueo se dice que pertenecen al mismo bloque.

1.2.4.1.2.2 Factor ruido

Si el experimentador está interesado en la variabilidad de la respuesta cuando se modifican las condiciones experimentales, entonces los factores nuisance son incluidos deliberadamente en el experimento y no se aísla su efecto por medio de bloques. Se habla entonces de factores ruido.

1.2.4.1.2.3 Covariable

Si el factor nuisance es una propiedad cuantitativa de las unidades experimentales que puede ser medida antes de realizar el experimento, el factor se denomina covariable y juega un papel importante en el análisis estadístico.

1.2.4.1.3 Selección de las variables de respuesta o salida

De acuerdo a la manipulación de diferentes variables en la experimentación se obtendrán variables de respuesta, las cuales deben ser definidas y catalogadas para el establecimiento de resultados.

Los datos que se recogen en un experimento son medidas de una variable denominada variable respuesta o variable de interés. Naturalmente, la respuesta está condicionada por los objetivos del experimento. También se debe especificar con claridad la forma en que se realizarán las mediciones: instrumentos de medida, tiempo en el que se harán las mediciones, entre otros.

1.2.4.1.4 Elección del diseño experimental adecuado

De acuerdo a la naturaleza de los datos que se pretenden alcanzar se selecciona un diseño experimental que se adapte los resultados obtenidos y que permita el análisis de los mismos. Para ello existen diferentes modelos estadísticos de diseños experimentales que permiten la relación entre factores de interés, conocidos regularmente como diseños experimentales clásicos. Dentro de este inciso se debe desarrollar los siguientes apartados.

1.2.4.1.4.1 Diseño de tratamientos

Determina los tratamientos y los niveles a ser incluidos en el estudio. Los tratamientos corresponden a los niveles de un factor de tratamiento (grado de intensidad de un factor) o a la combinación de niveles de factores (estructura factorial) y son procedimientos, métodos, estímulos o condiciones, cuyos efectos se miden sobre la unidad experimental.

1.2.4.1.4.2 Diseño de control de error

El diseño de control de error, busca un arreglo de los tratamientos en un plan experimental utilizando una regla de asignación de los tratamientos a las unidades experimentales, de tal manera que se tengan grupos con buenas características de homogeneidad. La selección de un diseño de control de error depende de la disponibilidad de las unidades experimentales, la estructura de esas unidades y la precisión de la estimación deseada por el investigador. Además debe incluirse el plan para la reducción de errores experimentales.

1.2.4.1.4.3 Muestreo

Consiste en calcular el número de observaciones que se deben tomar para alcanzar los objetivos del experimento, número de observaciones que le permitan a los datos recabados encontrarse dentro de un intervalo significativo de confianza. Existen, dependiendo del modelo, algunas fórmulas para determinar este tamaño, todas ellas sin embargo requieren el conocimiento del tamaño de la variabilidad no planificada (no sistemática y sistemática, si es el caso) y estimarlo a priori no es fácil, siendo aconsejable sobreestimarla. Normalmente se estima a partir del experimento piloto y en base a experiencias previas en trabajos con diseños experimentales semejantes, o bien utilizando curvas características de operación.

1.2.4.1.4.4 Diseño de observaciones

Este determina a que nivel deben tomarse las observaciones y qué clase de observaciones se deben tomar; es decir, si las unidades observacionales son las mismas unidades experimentales o si se debe realizar un submuestreo de las unidades experimentales, también especifica si se deben tomar observaciones univariadas o multivariadas.

1.2.4.1.5 Planteamiento de hipótesis

Una hipótesis es un postulado no demostrado que se admite provisionalmente para orientar las investigaciones y experimentos, la cual será comprobada después de la ejecución de la misma investigación o experimento.

De acuerdo a los resultados que se pretenden alcanzar resulta beneficioso establecer supuestos comprobables que sirvan de fundamento para las conclusiones.

1.2.4.1.5.1 Hipótesis científica

Una hipótesis científica es aquella formulación que se apoya en un sistema de conocimientos organizados y sistematizados y que establece una relación entre dos o más variables para explicar y predecir, en la medida de lo posible, los fenómenos que le interesan en caso que se compruebe la relación establecida. Este tipo de hipótesis se comprueba mediante la observación y análisis de los resultados de la experimentación o investigación.

1.2.4.1.5.2 Hipótesis estadística

Una hipótesis estadística es un enunciado o afirmación acerca de los parámetros de una distribución de probabilidad o de los parámetros de un modelo, que refleja alguna conjetura acerca de la situación del problema.

1.2.4.1.5.2.1 Hipótesis nula

Este tipo de hipótesis indica que entre dos o más grupos determinados no hay diferencias significativas con respecto a alguna variable. Es decir con esta hipótesis se establece que no existe relación o dependencia de las variables en análisis basándose en la ausencia de diferencias entre las variables, estableciendo así que las variables son estadísticamente iguales.

1.2.4.1.5.2.2 Hipótesis alternativa

Este tipo de hipótesis indica que entre dos o más grupos determinados existen diferencias significativas con relación a alguna variable. Lo cual indica que existe algún tipo de dependencia o relación entre las variables comparadas basándose en las diferencias obtenidas con la ejecución de los diferentes tratamientos o grupos analizados.

1.2.4.1.6 Realización del experimento

Realizar el experimento final casi se reduce a llenar columnas, preparadas de antemano, con lecturas de las mediciones; para detectar cualquier anomalía que se presente durante el desarrollo del experimento y trazar las gráficas pertinentes o calcular el o los valores que darán respuesta al problema. La realización del experimento consiste en la aplicación de cada uno de los procesos de laboratorio o procedimientos (tratamientos) a las unidades experimentales de acuerdo al diseño experimental seleccionado. Es recomendable preparar un protocolo de ejecución y seguirlo cuidadosamente.

1.2.4.2 Análisis de los resultados

1.2.4.2.1 Análisis estadístico de datos

Se refiere a aplicar las herramientas estadísticas de análisis a los datos obtenidos en el laboratorio, para llegar a determinar los resultados del experimento y obtener conclusiones.

Después de obtener los datos se continúa con el análisis estadístico de acuerdo al diseño experimental seleccionado y al modelo asociado. Uno de los principales objetivos del análisis de los datos de un diseño experimental es cuantificar y evaluar la importancia de las fuentes de variación, esto puede ser obtenido a través del análisis de varianza (ANOVA) asociado.

El análisis de varianza es una técnica estadística, que permite analizar datos provenientes de un experimento aleatorio comparativo, fue ideado por R.A. Fisher, publicado en 1923.

El análisis de varianza es un procedimiento sistemático que particiona la variabilidad total de las observaciones en partes componentes que influyen en el modelo lineal; cada una de las cuales es asociada con una fuente de variación. Una de éstas es la variación entre las unidades experimentales tratadas en forma semejante, la cual es una medida del error experimental que provee la base para los estimados de intervalos y las pruebas de hipótesis. Otras fuentes de variación son las de los tratamientos, bloques, interacción.

Según el diseño experimental seleccionado así será el tipo de ANOVA utilizado, estos se describen como:

1.2.4.2.1.1 Según número de factores

1.2.4.2.1.1.1 Unifactorial

Cuando hay un solo factor de tratamientos se utiliza ANOVA de clasificación simple o de una vía como el caso de un diseño completamente al azar.

1.2.4.2.1.1.2 Multifactorial

Cuando existen varios factores de tratamientos se utiliza ANOVA de dos vías (dos factores) o tres vías (tres factores), etc., como en el caso de diseños de bloques (un factor y una variable de agrupación o clasificación), cuadrado latino (un factor y dos variables de agrupación).

1.2.4.2.1.2 Según número de repeticiones

1.2.4.2.1.2.1 Igual número de repeticiones

Se utiliza ANOVA con grupos iguales para diseños balanceados.

1.2.4.2.1.2.2 Desigual número de repeticiones

Se utiliza un ANOVA con grupos desiguales para diseños desbalanceados.

1.2.4.2.1.3 Según la forma de seleccionar los niveles de los factores

1.2.4.2.1.3.1 Modelo de efectos fijos

Si los niveles son fijos, se utiliza el modelo I de ANOVA, llamado también modelo de efectos fijos.

1.2.4.2.1.3.2 Modelo de componentes de varianza

Si los niveles son seleccionados al azar, se utiliza el modelo II de efectos aleatorios o modelos de componentes de varianza.

1.2.4.2.1.3.3 Modelo mixto

Si hay factores con niveles fijos y aleatorios, se utiliza el modelo III de ANOVA mixto.

1.2.4.2.2 Formulación de conclusiones y recomendaciones

Con base al análisis estadístico se logran comprobar o rechazar las hipótesis planteadas.

A partir de este fundamento se pueden redactar conclusiones que expresen los resultados obtenidos y posibles recomendaciones de la actividad experimental ejecutada. Las conclusiones son formuladas en base a las hipótesis comprobadas ya sean científicas o estadísticas. En el caso de la formulación de recomendaciones se refiere a todas aquellas recomendaciones pertinentes que permitan una mejor aplicación del diseño experimental a la experimentación o investigación determinada.

1.3 Modelos de diseños experimentales clásicos

Los modelos de diseños de experimentos son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es averiguar si determinados factores influyen en la variable de interés, así como cuantificar la influencia de algún factor.

La metodología de cada uno estudia cómo variar las condiciones habituales de realización de un proceso empírico para aumentar la probabilidad de detectar cambios significativos en la respuesta, de esta forma se obtiene un mayor conocimiento del comportamiento del proceso de interés. La utilización de los modelos de diseño de experimentos se basa en la experimentación y en el análisis de los resultados que se obtienen en un experimento bien planificado.

En muy pocas ocasiones es posible utilizar estos métodos a partir de datos disponibles o datos históricos.

1.3.1 Diseños comparativos

Este tipo de diseño experimental es utilizado en aquellos casos en los que se desea comparar dos condiciones o tratamientos. De tal manera que se logre establecer si se producen resultados iguales o diferentes con la aplicación de un tratamiento en particular. Dentro de los diseños comparativos simples se pueden realizar análisis estadísticos que permitan establecer si existe diferencia entre las medias de cada grupo, si esta diferencia es igual a un valor establecido o si las varianzas de cada grupo son iguales o no.

Figura 3. “Modelo del diseño experimental comparativo simple”

OBSERVACIONES (CORRIDAS)	TRATAMIENTOS	
	A	B
1	TA1	TB1
2	TA2	TB2
3	TA3	TB3
4	TA4	TB4
.
.
n	TAn	TBn

TAn = Variable observada para tratamiento A corrida n.

1.3.2 Diseños simples

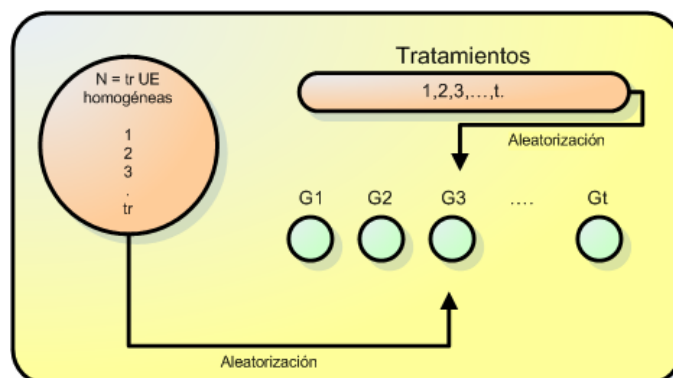
Este tipo de diseño experimental es uno de los más comunes ya que permite la comparación de los efectos de dos o más tratamientos de forma independiente o la comparación de los distintos niveles de un tratamiento.

El diseño más representativo dentro de esta clase, es el diseño completamente aleatorizado. El cual basa la asignación de las observaciones a la unidad experimental en una forma totalmente aleatorizada.

1.3.2.1 Diseño completamente aleatorizado

Este tipo de diseño se basa en la aleatorización que permite la validación del error experimental, evita sesgos y garantiza la independencia de los errores. Cuando el experimentador ha decidido arreglar el material experimental bajo un DCA con igual número de réplicas por tratamiento, se supone que se tienen $N = tr$ unidades experimentales homogéneas y t tratamientos. Las N unidades experimentales se dividen en t grupos de r unidades experimentales. Los t tratamientos son asignados al azar a los t grupos tales que el i -ésimo tratamiento es aplicado a cada una de las r unidades experimentales en el i -ésimo grupo ($i = 1, 2, \dots, t$).

Figura 4. “Procedimiento de aleatorización”



Fuente: Adaptado de <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000352/index.html>

1.3.2.2 Ventajas

Cuando en un experimento las unidades experimentales se arreglan bajo un diseño completamente al azar se tienen las siguientes ventajas:

1.3.2.2.1 Flexibilidad

Cualquier número de tratamientos y cualquier número de réplicas pueden ser usados, siempre y cuando se tengan suficientes unidades experimentales homogéneas.

1.3.2.2.2 Análisis estadístico simple

El análisis estadístico es simple ya sea cuando todos los tratamientos tengan igual número de réplicas (balanceado), diferente número de réplicas (desbalanceado) o pérdida de datos, caso en el cual se trata como un análisis desbalanceado.

1.3.2.2.3 Máximo número de grados de libertad para el error

Esto ocurre porque el diseño tiene solo dos fuentes de variación que son las variaciones por los tratamientos y las variaciones por el error.

1.3.2.2.4 Precisión

Es muy preciso si se tienen en cuenta unidades experimentales homogéneas.

1.3.2.3 Desventajas

Con la utilización de este diseño experimental, se puede obtener baja precisión cuando las unidades experimentales no sean muy homogéneas y así ser ineficiente.

Figura 5. “Modelo del diseño experimental completamente aleatorizado”

TRATAMIENTOS O NIVELES DE TRATAMIENTO	OBSERVACIONES O CORRIDAS				
	1	2	3	...	n
1	D11	D12	D13	...	D1n
2	D21	D22	D23	...	D2n
3	D31	D32	D33	...	D3n
4	D41	D42	D43	...	D4n
.
t	Dt1	Dt2	Dt3	...	Dtn

Dtn = Variable observada para tratamiento t corrida n.

1.3.3 Diseños en bloques

La variabilidad que surge de un factor perturbador puede afectar los resultados en cualquier experimento. En ocasiones un factor perturbador es conocido y puede controlarse por medio de una técnica de diseño llamada formación de bloques para limitar de manera sistemática su efecto sobre las comparaciones estadísticas entre los tratamientos.

La formación de bloques es una técnica de diseño en extremo importante que se utiliza ampliamente en la experimentación industrial, pero también puede ser útil en situaciones que no incluyen necesariamente factores perturbadores tal es el caso de la formación de un bloque por la combinación de cierto número de condiciones poco controlables. Bloques típicos serían las unidades de equipo o maquinaria de prueba, lotes de materia prima, personas o experimentadores, tiempo.

1.3.3.1 Ventajas

Con la aplicación del diseño experimental en bloques se logra una serie de ventajas que se pueden definir como:

1.3.3.1.1 Eficacia

Si la influencia de los bloques es relativamente significativa, con este diseño se logran mejores eficacias, ya que disminuye la variabilidad no explicada.

Por ello, es mejor estudiar primero el modelo de bloques aleatorizados y, si los bloques no influyen, se pasa fácilmente al modelo de un solo factor sumando en la tabla ANOVA la fila del factor bloque con la de la variabilidad residual.

1.3.3.1.2 Tratamiento estadístico

El tratamiento estadístico expuesto para el modelo de diseño de experimentos completamente aleatorizado con un factor tratamiento y un factor bloque es exactamente igual que el diseño de experimentos con dos factores tratamiento sin interacción.

1.3.3.2 Desventajas

Principalmente si la influencia o efecto de los bloques no es significativo es más eficaz el diseño completamente aleatorio. Ya que el denominador en la comparación de tratamientos tiene menos grados de libertad.

En un diseño en bloques, aunque las observaciones son también tomadas sobre todas las combinaciones de tratamientos y bloques, sólo los niveles del factor tratamiento son asignados aleatoriamente a las unidades experimentales. Al fin y al cabo, en el diseño que se está analizando los bloques representan fuentes de variación "*nuisance*", esto es, no existe interés alguno en la posible significación del efecto bloque. Más aún, es poco probable que sea factible utilizar los mismos bloques en una hipotética réplica del experimento.

Sin duda alguna bloquear sin ser necesario conduce a pruebas de hipótesis menos potentes y a intervalos de confianza más amplios que aquellos que se obtendrían mediante un diseño completamente aleatorizado.

1.3.3.3 Modalidades

1.3.3.3.1 Diseño en bloques al azar

El modelo de diseño de experimentos con bloques más sencillo es el diseño de bloques completamente aleatorizados, con este diseño se quiere estudiar la influencia de un factor tratamiento con determinados niveles en una variable de interés en presencia de una variable extraña, el factor bloque.

La forma de asignar los tratamientos dentro de cada bloque es de forma equilibrada porque cada tratamiento se utiliza exactamente una vez dentro de cada bloque.

El material experimental es dividido en b grupos de t unidades experimentales (UE) cada uno, donde t es el número de tratamientos. De modo que las UE dentro de cada grupo sean homogéneas y las diferencias entre las UE estén dadas únicamente por las diferencias en la asignación al grupo. Los conjuntos son llamados bloques.

Figura 6. “Modelo del diseño experimental en bloques al azar”

TRATAMIENTOS O NIVELES DE TRATAMIENTO	BLOQUES				
	1	2	3	....	b
1	D11	D12	D13	...	D1b
2	D21	D22	D23	...	D2b
3	D31	D32	D33	...	D3b
4	D41	D42	D43	...	D4b
.	
t	Dt1	Dt2	Dt3	...	Dtb

Dtb = Variable observada para tratamiento t bloque b.

1.3.3.3.2 Diseño cuadrado latino

Si un experimento estudia el efecto que tiene la aplicación de ciertos tratamientos o determinados niveles de un factor, sobre una variable de observación, pero tomando en cuenta la existencia de dos factores perturbadores, el diseño apropiado para esta investigación consiste en comparar cada tratamiento tomando en cuenta las restricciones debidas a los factores perturbadores, este diseño resultante se conoce como diseño cuadrado latino. Está constituido por un arreglo cuadrado en donde los tratamientos se denotan con letras latinas A, B, C, etc., y los dos factores de bloqueo son ortogonales a los tratamientos. Con este diseño se eliminan las dos fuentes de variabilidad perturbadora mediante la formación de bloques sistemáticos en dos direcciones. Siendo así las columnas y las filas las restricciones debidas a los dos bloques formados.

Cuando el número de columnas no es igual al número de filas se conoce como un cuadrado latino incompleto o cuadrado de Youden. Cuando el número de tratamientos es grande, se puede presentar un problema potencial debido a que el requerimiento de que el número de filas y columnas debe ser igual al número de tratamientos, lo cual es más difícil de obtener.

Figura 7. “Modelo del diseño experimental cuadrado latino”

FACTOR BLOQUE B	FACTOR BLOQUE A				
	1	2	3	...	yi
1	A = d11	B = d12	C = d13	...	X = d1yi
2	B = d21	C = d22	X = d23	...	A = d2yi
3	C = d31	X = d32	A = d33	...	B = d3yi
.	
yk	X = dyk1	A = dyk2	B = dyk3	...	C = dykyi

$C = dykyi$ = Variable observada para tratamiento C y bloques “yk” y “yi”

1.3.3.3 Diseño cuadrado grecolatino

Cuando a un cuadrado latino se le superpone un segundo cuadrado latino se forma un diseño grecolatino, ya que a los tratamientos correspondientes al segundo cuadrado latino se le asignan letras griegas (α , β , γ , δ , etc.). Al hacer la superposición de dos cuadrados se tiene la propiedad de que cada tratamiento asignado en un cuadrado se repite una sola vez a cada tratamiento asignado en el otro cuadro, debido a que los dos cuadrados son ortogonales entre si.

Es común utilizar este tipo de diseño experimental cuando se desea controlar sistemáticamente tres fuentes de variación extraña, mediante la formación de bloques en tres direcciones. Siendo los cuatro factores de permisión para este diseño los renglones, columnas, letras latinas y letras griegas, cada uno con sus respectivos niveles y corridas. El análisis de varianza para este diseño corresponde a una suma de cuadrados debida al factor de las letras griegas a partir de los totales de las letras griegas y el error experimental se reduce adicionalmente en esta cantidad.

Figura 8. “Modelo del diseño experimental cuadrado grecolatino”

FACTOR BLOQUE B	FACTOR BLOQUE A				
	1	2	3	....	yi
1	$A\alpha = d_{11}$	$B\beta = d_{12}$	$C\delta = d_{13}$	...	$X\gamma = d_{1yi}$
2	$B\beta = d_{21}$	$C\delta = d_{22}$	$X\gamma = d_{23}$	...	$A\alpha = d_{2yi}$
3	$C\delta = d_{31}$	$X\gamma = d_{32}$	$A\alpha = d_{33}$	...	$B\beta = d_{3yi}$
.	...				
yk	$X\gamma = dyk1$	$A\alpha = dyk2$	$B\beta = dyk3$	...	$C\delta = dykyi$

$C\delta = dykyi$ = Variable observada con la ejecución del tratamiento C y tratamiento δ con los bloques “yk” y “yi”

1.3.4 Diseños factoriales

Es un tipo de diseño experimental en el que hay más de una variable independiente.

Cada variable recibe el nombre de factor. Su principal acción es que sirven para valorar el efecto de la interacción, es decir, saber el efecto combinado de las distintas variables. Este diseño experimental es aplicable en aquellas condiciones en las que el experimentador está interesado en determinar el efecto de varias variables al mismo tiempo sobre una variable de respuesta u observación. Este tipo de diseño experimental es el más eficiente de los diseños experimentales, ya que en cada ensayo o réplica completa del experimento se investiga el efecto de la interacción de todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores. El efecto de un factor es el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor, llamado comúnmente efecto principal referido a los factores de interés primario.

Se utiliza este tipo de diseño experimental cuando se desea encontrar un modelo que describa el comportamiento general del fenómeno en estudio. Por ello son muy usados en experimentos exploratorios. También se utilizan para optimizar la respuesta o variable dependiente; es decir, encontrar la combinación de niveles que optimizan la variable dependiente.

1.3.4.1 Ventajas

1.3.4.1.1 Economía en material experimental

Con los diseños factoriales se logra una mejor economía en el material experimental, ya que se obtiene información sobre varios factores sin incrementar el tamaño del experimento.

1.3.4.1.2 Interacción entre todos los factores

Este tipo de diseños permiten el estudio de la interacción entre factores, o sea determinar el grado y la forma en la cual se modifica el efecto de un factor por los niveles de otro factor.

1.3.4.1.3 Control de error

Los experimentos factoriales se pueden ejecutar bajo cualquier tipo de diseño de control de error, submuestreo o con covariables.

1.3.4.2 Desventajas

Con la utilización de este tipo de diseño experimental se requiere un gran número de tratamientos, especialmente cuando se tienen muchos factores o muchos niveles de un mismo factor. Si se desean usar bloques completos es difícil encontrar grupos de unidades experimentales homogéneas para aplicar todos los tratamientos.

También se aumenta el costo del experimento al tener muchas unidades experimentales; esto se minimiza usando factoriales fraccionados donde se prueba una sola parte de todo el conjunto de tratamientos.

1.3.4.3 Modalidades

Los diseños factoriales son recomendados cuando se cree que existe alguna interacción entre factores analizados, evitando así la formulación de conclusiones incorrectas, estos diseños ofrecen varias ventajas y son aplicables de acuerdo al número de factores o niveles cuyos efectos de interacción se desean analizar.

1.3.4.3.1 Diseño factorial de dos factores

Constituye el tipo más simple de diseños factoriales en donde se incluyen únicamente dos factores o conjuntos de tratamientos. Es decir existen a niveles del factor A y b niveles del factor B, y cada réplica del experimento contiene todas las posibles combinaciones “ab” de los tratamientos. En este caso el experimentador está interesado en estudiar únicamente la influencia de dos factores tratamiento en particular, para ello se hace un diseño de filas por columnas. Esto quiere decir que únicamente se cree que el experimento es influenciado por la interacción de los dos factores particulares seleccionados.

Figura 9. “Modelo del diseño experimental factorial de dos factores”

FACTOR A	FACTOR B				
	1	2	3	....	b
1	y ₁₁₁ , y ₁₁₂ , ... y _{11n}	y ₁₂₁ , y ₁₂₂ , ... y _{12n}	y ₁₃₁ , y ₁₃₂ , ... y _{13n}		y _{1b1} , y _{1b2} , ... y _{1bn}
2	y ₂₁₁ , y ₂₁₂ , ... y _{21n}	y ₂₂₁ , y ₂₂₂ , ... y _{22n}	y ₂₃₁ , y ₂₃₂ , ... y _{23n}		y _{2b1} , y _{2b2} , ... y _{2bn}
-					
a	y _{a11} , y _{a12} , ... y _{a1n}	y _{a21} , y _{a22} , ... y _{a2n}	y _{a31} , y _{a32} , ... y _{a3n}		y _{ab1} , y _{ab2} , ... y _{abn}

y_{abn} = Variable de respuesta en la interacción entre los factores “a” y “b” en la n réplica

1.3.4.3.2 Diseño factorial general

Es posible generalizar los diseños factoriales a más de dos factores, en el caso en que se desea analizar la interacción en más de dos factores. En este caso se tendrían a niveles del factor A, b niveles del factor B, c niveles del factor C y así sucesivamente, dispuestos en un experimento donde habrán abc...n combinaciones diferentes. En el aspecto práctico tiene el inconveniente de que al aumentar el número de factores aumenta muy rápidamente el número de observaciones necesario. Un camino alternativo es utilizar fracciones factoriales que son diseños en los que se supone que muchas de las interacciones son nulas, esto permite estudiar el efecto de un número elevado de factores con un número relativamente pequeño de pruebas. Por ejemplo, el diseño en cuadrado latino, en el que se supone que todas las interacciones son nulas.

Figura 10. “Modelo del diseño experimental factorial de tres factores”

		FACTOR B									
		1			2			...	b		
		FACTOR C			FACTOR C				FACTOR C		
FACTOR A	1	...	c	1	...	c		1	...	c	
	1	y ₁₁₁₁ , y ₁₁₁₂ ,... y _{111n}		y _{11c1} , y _{11c2} ,... y _{11cn}	y ₁₂₁₁ , y ₁₂₁₂ ,... y _{121n}		y _{12c1} , y _{12c2} ,... y _{12cn}		y _{1b11} , y _{1b12} ,... y _{1b1n}		y _{1bc1} , y _{1bc2} ,... y _{1bcn}
2	y ₂₁₁₁ , y ₂₁₁₂ ,... y _{211n}		y _{21c1} , y _{21c2} ,... y _{21cn}	y ₂₂₁₁ , y ₂₂₁₂ ,... y _{221n}		y _{22c1} , y _{22c2} ,... y _{22cn}		y _{2b11} , y _{2b12} ,... y _{2b1n}		y _{2bc1} , y _{2bc2} ,... y _{2bcn}	
...											
a	y _{a111} , y _{a112} ,... y _{a11n}		y _{a1c1} , y _{a1c2} ,... y _{a1cn}	y _{a211} , y _{a212} ,... y _{a21n}		y _{a2c1} , y _{a2c2} ,... y _{a2cn}		y _{ab11} , y _{ab12} ,... y _{ab1n}		y _{abc1} , y _{abc2} ,... y _{abcn}	

y_{abcn} = Variable de respuesta en la interacción entre los factores “a”, “b” y “c” en la n réplica

1.3.4.3.3 Diseño factorial con bloqueo

En ocasiones no es factible o práctico la aleatorización completa de todas las corridas de un diseño factorial. La presencia de un factor perturbador puede hacer necesario que el experimento se corra en bloques. El modelo se trabaja de la misma forma que se trabajó para los diseños en bloques.

1.3.4.3.4 Diseño factorial 2^k

En el estudio sobre la mejora de procesos industriales, es usual trabajar en problemas en los que hay muchos factores que pueden influir en la variable de interés. La utilización de experimentos completos en estos problemas tiene el gran inconveniente de necesitar un número elevado de observaciones, además puede ser una estrategia ineficaz porque, por lo general, muchos de los factores en estudio no son influyentes y mucha información recogida no es relevante. En este caso una estrategia mejor es utilizar una técnica secuencial donde se comienza por trabajar con unos pocos factores y según los resultados que se obtienen se eligen los factores a estudiar en la segunda etapa. Los diseños factoriales 2^k son diseños en los que se trabaja con k factores, todos ellos con dos niveles (se suelen denotar + y -).

Estos diseños son adecuados para tratar el tipo de problemas descritos porque permiten trabajar con un número elevado de factores y son válidos para estrategias secuenciales. Si k es grande, el número de observaciones que necesita un diseño factorial 2^k es muy grande ($n = 2^k$).

Por este motivo, las fracciones factoriales 2^{k-p} son muy utilizadas, éstas son diseños con k factores a dos niveles, que mantienen la propiedad de ortogonalidad de los factores y donde se suponen nulas las interacciones de orden alto (se confunden con los efectos simples) por lo que para su estudio solo se necesitan 2^{k-p} observaciones (cuanto mayor sea p menor número de observaciones se necesita pero mayor confusión de efectos se supone).

En los últimos años, Taguchi ha propuesto la utilización de fracciones factoriales con factores a tres niveles en problemas de control de calidad industrial.

Figura 11. “Modelo del diseño experimental factorial tipo 2^k ”

FACTOR		Combinación de tratamientos	RÉPLICA		
A	B		I	II	III
-	-	ab	*	*	*
+	-	Ab	*	*	*
-	+	aB	*	*	*
+	+	AB	*	*	*

* = Variable de respuesta

AB = Combinación de tratamientos A y B en sus niveles respectivos.

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Recursos utilizados

2.1.1 Recursos humanos

Investigador: PC. Memphis Sofonias Reyes Mazariegos.

Asesor: Ing. Qco. José Manuel Tay Oroxom.

Estudiantes: Estudiantes del curso de Laboratorio de Ingeniería Química I (428), correspondiente al segundo semestre del 2008.

Otras asesorías: Ing. Qco. Mario José Mérida Meré.

2.1.2 Recursos físicos

Localización: Laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ingeniería, USAC.

Material experimental: Unidades experimentales pertenecientes a las prácticas del laboratorio de Ingeniería Química I.

2.2 Unidades experimentales involucradas

2.2.1 Intercambiador de calor de concha y tubos de cobre (ICCTCu)

Esta unidad comprende un equipo de intercambio de calor para un sistema cuyos fluidos involucrados son agua y vapor de agua.

La unidad se compone por un condensador que calienta el agua para el intercambio utilizando para ello vapor de agua proveniente de la caldera, así también por 5 diferentes intercambiadores de calor de concha y tubos de cobre armados en paralelo.

Cada intercambiador de calor tiene diferente número de deflectores (15, 13, 11, 10 y 16 deflectores) identificados de izquierda a derecha. Un medidor de flujo, medidor de orificio, permite evaluar el caudal de agua que circula en la unidad y un juego de termómetros informa las temperaturas de entrada y salida de los fluidos.

La unidad cuenta con un contador de agua que mide el paso de metros cúbicos utilizados, y una trampa de vapor elimina los condensados.

Figura 12. “Unidad experimental para (ICCTCu)”



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC.

2.2.2 Medidores de flujo de agua (MDF)

Constituye una unidad experimental que permite la medición del flujo de agua trasegado en la unidad por medio de 5 diferentes medidores de flujo: rotámetro, medidor de orificio, medidor venturi, medidor de ranura y vertedero. Para el rotámetro, el medidor de ranura y el vertedero, las lecturas se hacen directamente en la escala correspondiente de cada unidad; mientras que para el venturi y medidor de orificio se establecen caídas de presión en manómetros diferenciales especialmente acondicionados.

Los medidores de flujo se pueden utilizar en serie, para lo cual el fluido es impulsado por una bomba centrífuga y los diferentes caudales son regulados por medio de una válvula de globo.

Figura 13. “Unidad experimental para (MDF)”



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC.

2.2.3 Intercambiador de calor de tubos concéntricos (ICTC)

Esta unidad experimental cuenta con un equipo compuesto por 8 intercambiadores de calor de tubos concéntricos conectados en serie, equipo que permite evaluar el intercambio de calor entre un sistema de enfriamiento y un sistema de calentamiento.

En tres de los intercambiadores se transfiere calor entre el vapor de la caldera y un aceite que circula en el tubo interno de los intercambiadores (calentamiento); mientras que en los cinco restantes, se transfiere calor entre el aceite calentado con el vapor y agua fría que circula en el ánulo.

Para la medición de los flujos de aceite y agua se cuenta con dos rotámetros, en donde el flujo de aceite es impulsado por una bomba desde un depósito constituyendo así un sistema cerrado. La unida experimental se cuenta provista de una serie de puntos en donde se puede instalar termómetros para el establecimiento de las temperaturas de entrada y salida de los fluidos involucrados.

Figura 14. “Unidad experimental para (ICTC)”



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC.

2.2.4 Bomba centrífuga (BC)

Esta unidad comprende un sistema de flujo de agua impulsado por una bomba centrífuga acoplada directamente a un motor de velocidad variable. Las velocidades del motor son controladas manualmente por medio de un reóstato. El motor se encuentra apoyado sobre cojinetes, para medir el torque, logrando esta medida a partir de una balanza de resorte provista de un brazo de un pie de longitud. El sistema cuenta con manómetros para medir la presión de succión y la descarga. La velocidad de rotación del eje se mide directamente en un equipo externo y el caudal se mide con un venturi. El sistema es un sistema de circuito cerrado dispuesto con válvulas de control específicas.

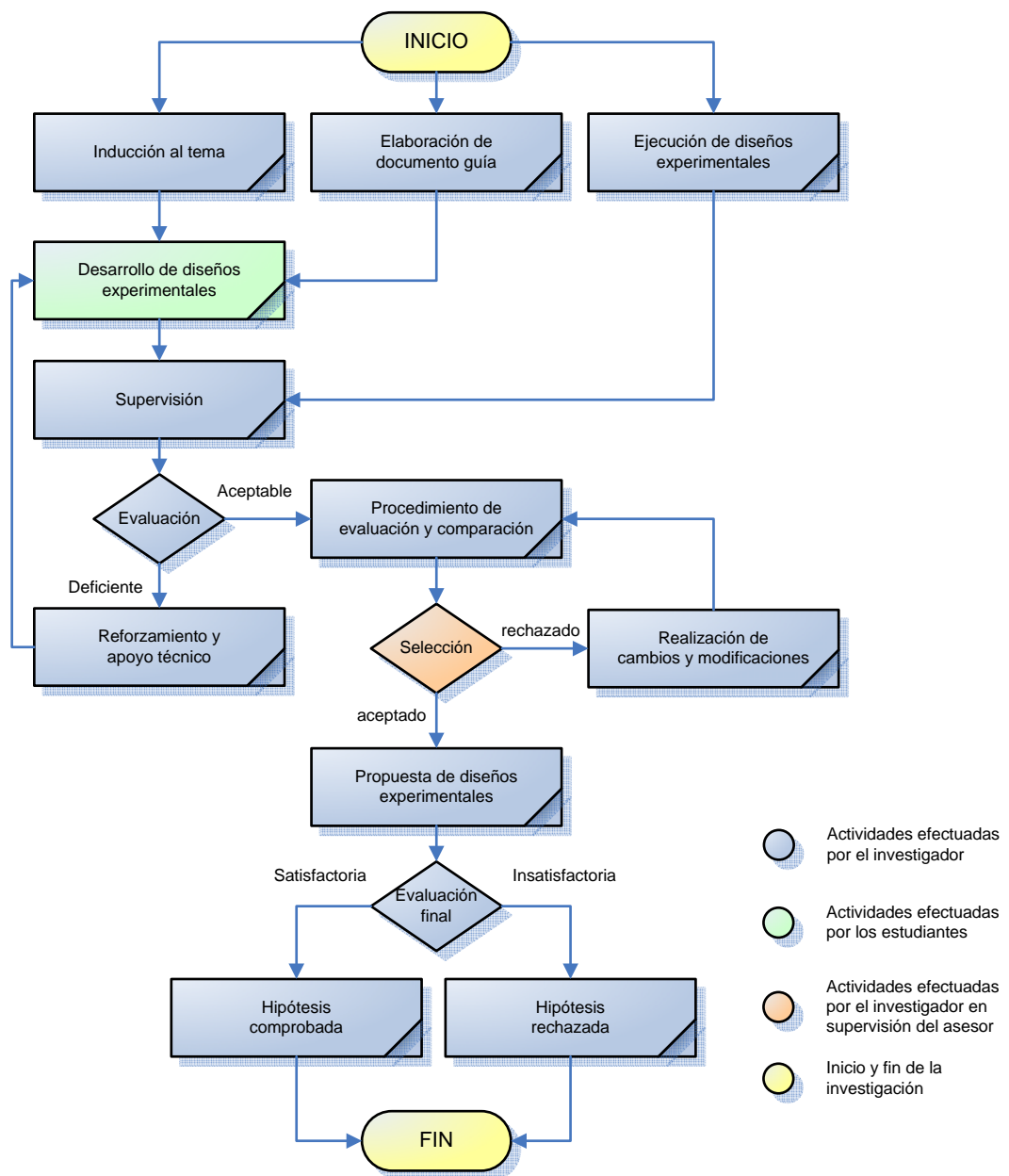
Figura 15. “Unidad experimental para (BC)”



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC.

2.3 Procedimiento de trabajo

Figura 16. “Flujograma del desarrollo de la investigación”

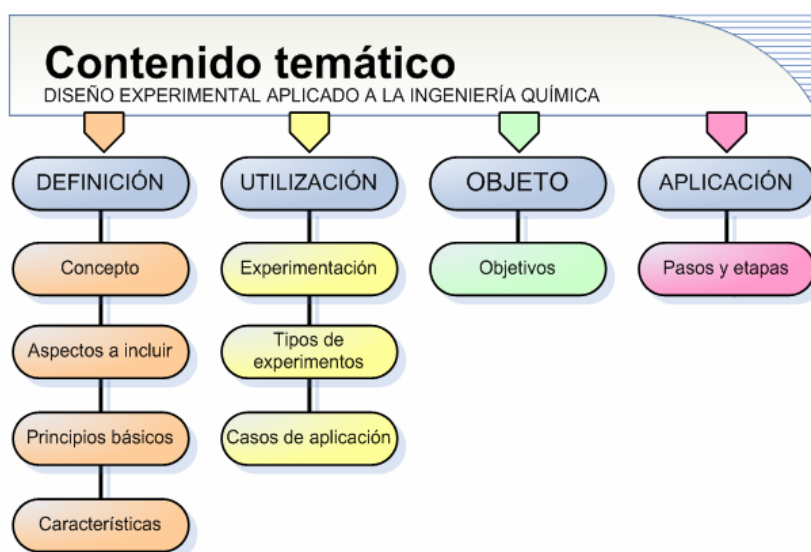


2.3.1 Inducción a los estudiantes del curso

Para lograr introducir al conocimiento del diseño experimental aplicado a la Ingeniería Química a los estudiantes del curso, se realizó una inducción al tema por parte del tesista. La inducción al tema tuvo el objetivo de otorgar los antecedentes y las directrices fundamentales del diseño experimental que describan la esencia que es aplicable y útil en el desarrollo de diseños experimentales en laboratorios de la carrera de Ingeniería Química específicamente de prácticas de laboratorio correspondientes al área de operaciones unitarias.

La presentación fue llevada a cabo por medio de una presentación – exposición del tema. Esta presentación se realizó al inicio del segundo semestre del 2008, realizada en el salón correspondiente asignado al curso, la cual tuvo una duración de una hora y cubrió los siguientes aspectos:

Figura 17. “Contenido temático cubierto en la presentación”



Para la elaboración de la presentación se utilizó el software Macromedia Flash MX, y con la ayuda de equipo audiovisual como cañonera y computadora se presentó a los estudiantes. La modalidad de presentación fue de 45 minutos de presentación del tema de tal forma que se cubrió con el contenido temático ya descrito, y 15 minutos restantes para resolución de dudas del tema.

Figura 18. “Esquema de la presentación realizada”

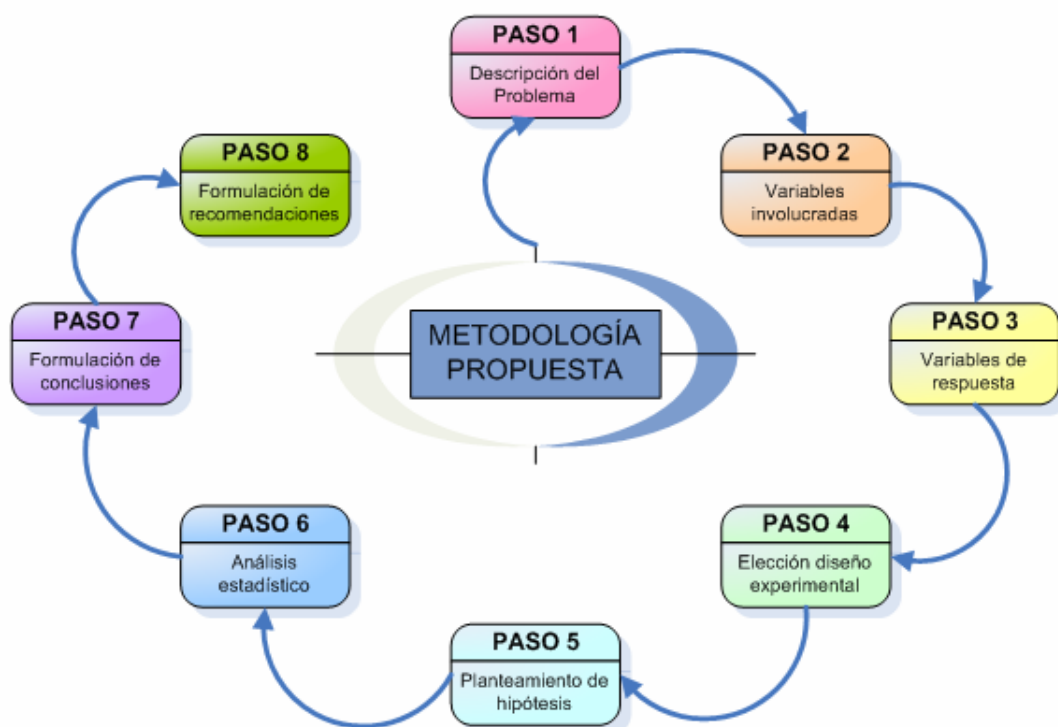


2.3.2 Elaboración de guía

Se elaboró un documento guía como ejemplo de un diseño experimental para que los estudiantes puedan tomarlo como referencia en la realización de los diseños experimentales del curso.

El ejemplo elaborado comprendió el desarrollo del diseño experimental correspondiente a una práctica de destilación, a partir de este ejemplo los estudiantes conocieron como se lleva a cabo el desarrollo de cada una de las etapas del diseño experimental (metodología propuesta) descritas en la inducción al tema y que a su vez corresponden a una experimentación aplicable al área de operaciones unitarias.

Figura 19. “Metodología propuesta para el desarrollo de diseños experimentales en Ingeniería Química”



A los estudiantes del curso se les exigió la documentación respectiva del diseño experimental de cada una de las prácticas de laboratorio que llevaron a cabo, de modo que ejercitaron la aplicación del diseño experimental, y así fueron adquiriendo la habilidad para poder realizar diseños experimentales en la experimentación de la carrera de Ingeniería Química, tomando el ejemplo de la guía entregada como base para el desarrollo de los diferentes diseños experimentales correspondientes a las prácticas del curso.

2.3.3 Ejecución de diseños experimentales

Se desarrollaron los diseños experimentales de cada una de las prácticas del laboratorio seleccionado, esto con el fin de contar con un parámetro de comparación al momento de supervisar los diseños experimentales elaborados por los estudiantes del curso. Para la elaboración de estos diseños experimentales se aplicaron los conocimientos adquiridos durante la investigación teórica realizada, así también se contó con la asesoría de los expertos ya mencionados. Cada uno de estos diseños experimentales, fueron utilizados como parámetro comparativo que cumple con los objetivos de la experimentación seleccionada, permitiendo así identificar las deficiencias en los diseños presentados por los estudiantes.

2.3.4 Desarrollo de diseños experimentales por parte de los estudiantes del curso

Los estudiantes del laboratorio elaboraron los diseños experimentales de las prácticas correspondientes al laboratorio citado, mediante la supervisión y apoyo del tesista.

De modo que el estudiante logró aclarar sus dudas en torno a la metodología de utilización de los diseños experimentales en la experimentación aplicada en el área de operaciones unitarias.

Así también se realizó la revisión de los diseños experimentales entregados por los estudiantes de modo de establecer las deficiencias en cada uno de éstos, anotando las correcciones y observaciones pertinentes.

2.3.5 Supervisión

A lo largo de los días de práctica correspondientes al laboratorio citado, se supervisó el trabajo de los estudiantes; de modo que se resolvió las dudas en torno al desarrollo de cada diseño experimental. Así los estudiantes llevaron a cabo el desarrollo de los diferentes diseños experimentales correspondientes a las prácticas de laboratorio, no solo con la ayuda de la guía anteriormente entregada sino que también con el apoyo del tesista investigador. Proporcionando así la correcta ejecución de los diseños experimentales.

La supervisión corrió únicamente a cargo del tesista, ya que como único interesado en introducir la metodología para la realización de diseños experimentales en Ingeniería Química y como autor de la misma, tenía la capacidad necesaria para ejecutar esta acción.

Figura 20. “Supervisión del trabajo de los estudiantes”



2.3.6 Evaluación

Utilizando como factor de comparación los diseños experimentales elaborados por el tesista, que fueron supervisados por expertos, el tesista procedió a evaluar cada uno de los diseños experimentales; estableciendo así las correcciones pertinentes a cada diseño, eliminando cualquier factor deficiente encontrado.

Se consideraron como factores deficientes aquellos factores contenidos en los diseños experimentales que no cumplieran con la metodología propuesta y que de alguna u otra manera no satisficieron el objeto y naturaleza fundamental de la experimentación seleccionada.

Como herramienta de evaluación se utilizó la hoja de calificación presentada en el apéndice A (pág. 137). Esta hoja de calificación fue diseñada de tal forma que se permitió evaluar de la misma forma cada diseño calificado. Esta hoja contenía el desglose de los factores de interés en la evaluación de diseños experimentales, cada uno de ellos con sus respectivos ítems. La forma de evaluación de cada uno de los factores de interés situados en la hoja de calificación consistió en la asignación de una ponderación de 1 a 5, siendo la ponderación más baja (1) y el nivel más alto (5); así se logró evaluar de acuerdo a la ponderación total obtenida si el diseño experimental se consideraba como aceptable o deficiente, siendo aceptable si superaba el 75% de la ponderación total. Con esta evaluación el tesista pudo establecer todos los aspectos deficientes así también identificó las posibles dudas en torno a la metodología de ejecución de diseños experimentales en Ingeniería Química que aún persistían en los estudiantes. Cada uno de los diseños experimentales que fueron evaluados por el tesista, contenía la serie de anotaciones y correcciones correspondientes, de tal modo que los estudiantes las tomaran en cuenta para no cometer los mismos errores nuevamente y así mejorar sus diseños experimentales a través de la práctica.

2.3.7 Reforzamiento y apoyo técnico

Cada uno de los aspectos de los diseños experimentales evaluados por el tesista que fueron catalogados como deficientes, de acuerdo a la hoja de evaluación presentada, se tomaron en cuenta para realizar reforzamiento y apoyo técnico metodológico al grupo de estudiantes respectivo, así el estudiante fue capaz de mejorar con la práctica sus diseños experimentales, y así cumplir con los objetivos de esta investigación.

Los reforzamientos sirvieron de retroalimentación para los estudiantes del curso de modo que se lograron mejores ponderaciones para cada ítem evaluado en los diseños experimentales.

Figura 21. “Reforzamiento otorgado a un grupo de estudiantes”



El reforzamiento se realizó trabajando en conjunto un diseño experimental, de tal manera que tanto el grupo de estudiantes como tesista desarrollaron las etapas correspondientes a la metodología propuesta, garantizando así que los estudiantes observaran los errores que cometidos.

2.3.8 Procedimiento de evaluación y comparación

Todos aquellos diseños experimentales que fueron catalogados en la evaluación como aceptables, se seleccionaron para someterlos a un proceso de comparación y evaluación que permitiera establecer el mejor diseño experimental que de acuerdo a sus características de capacidad informativa, costo, restricciones metodológicas, restricciones prácticas, propósito y efecto de la estadística sean los más factibles. Para llevar a cabo esta evaluación se utilizó la hoja de evaluación y comparación del diseño experimental contenido en el apéndice A (pág. 139 y 141).

Los diseños experimentales de interés fueron los diseños correspondientes a las prácticas de medidores de flujo de agua (MDF), bomba centrífuga (BC), Intercambiador de calor de tubos concéntricos (ICTC) e Intercambiador de concha y tubos de cobre (ICCTCu). Los mejores diseños que ya fueron validados por los estudiantes y que corresponden a estas cuatro prácticas se incluyeron en esta investigación como ejemplos para el desarrollo de diseños experimentales en el área de operaciones unitarias.

Utilizando la hoja de evaluación y comparación de diseños experimentales presentada, se permitió evaluar cada una de las características de los diseños experimentales utilizando la misma metodología que se describe para la hoja de calificación. Estableciendo así en conjunto si un diseño experimental superó o no en factibilidad a otro diseño experimental en comparación.

2.3.9 Selección

Una vez que los diseños experimentales fueron evaluados y comparados, logrando así el estableciendo del diseño de mayor factibilidad de aplicación, se seleccionó un diseño correspondiente a cada una de las cuatro prácticas ya descritas. Así se logró contar con cuatro diseños propuestos para las prácticas internas del área de operaciones unitarias, que no sólo ya han sido validados en su ejecución por parte de los estudiantes sino que han sido evaluados como factibles en su aplicación. Estos diseños seleccionados se describen en la sección de resultados.

2.3.10 Realización de cambios y modificaciones

Los diseños experimentales que fueron evaluados como poco factibles (rechazados) de acuerdo al proceso de evaluación y comparación realizado, fueron corregidos de acuerdo a la ejecución fundamental de la metodología de desarrollo de diseños experimentales en Ingeniería Química.

2.3.11 Propuesta de diseños experimentales

Ya establecidos los cuatro diseños experimentales evaluados como factibles correspondientes a cada práctica seleccionada, se incluyen en la presente investigación como diseños propuestos. Estos diseños tienen la característica que además de estar ya validados por los estudiantes, son diseños factibles en torno a su capacidad informativa, costo, restricciones metodológicas, restricciones prácticas, propósito y efecto de la estadística en su aplicación experimental.

2.3.12 Evaluación final

Al finalizar el trabajo experimental con los estudiantes del curso se procedió a realizar un cuestionario que permitió la evaluación final del contenido de la investigación, de modo que el tesista pudo dar validez al cumplimiento de los objetivos de la investigación. La evaluación fue realizada tanto a los estudiantes que participaron en la parte práctico-experimental de la investigación, así como también a los responsables del curso, de modo que se permitió valorar el alcance de los objetivos planteados por el tesista.

Los cuestionarios que se utilizaron para esta evaluación se presentan en el apéndice B (pág. 143 y 145) de esta investigación siendo la forma DE-E para la evaluación ejecutada a los estudiantes y la forma DE-A la evaluación ejecutada a los responsables del curso.

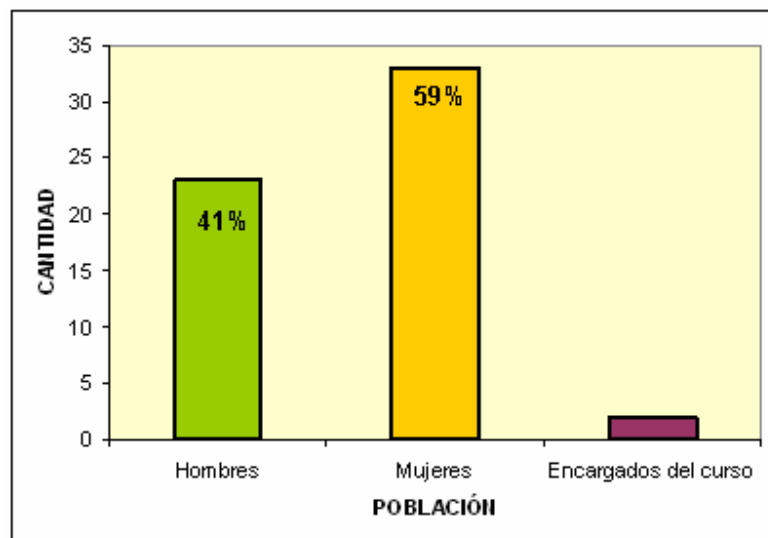
3. RESULTADOS

3.1 Metodología desarrollada

3.1.1 Población que ejecutó el programa

En el gráfico presentado a continuación se describe el conjunto poblacional de estudiantes que ejecutaron el programa, este programa comprende la metodología introducida para la ejecución de diseños experimentales en el área de operaciones unitarias.

Figura 22. “Descripción de la población que ejecutó el programa”



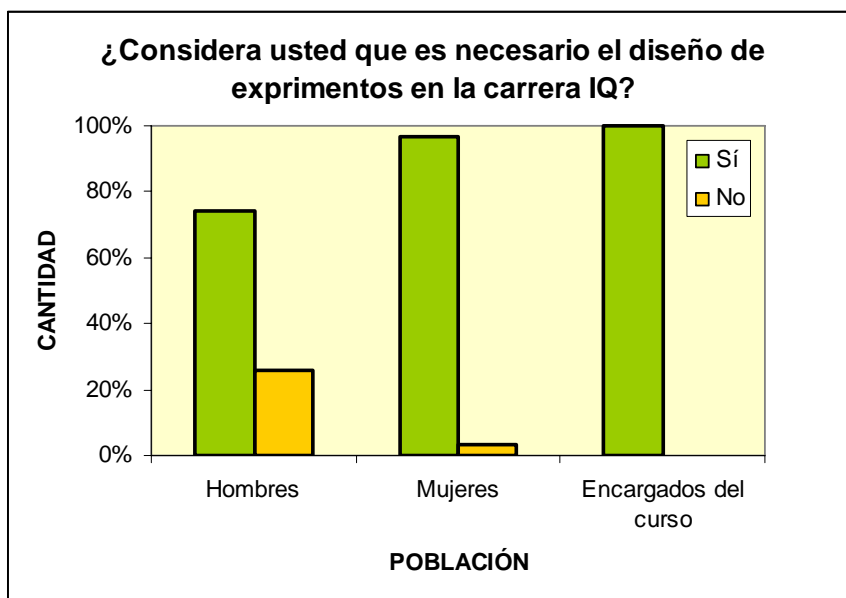
Fuente: Datos colectados.

3.1.2 Parámetros metodológicos que rigen el diseño experimental en la Ingeniería Química

3.1.2.1 Evaluación de la necesidad del diseño experimental en la carrera de Ingeniería Química

Este gráfico se refiere a que tan necesario se ha convertido el uso del diseño experimental en la carrera de Ingeniería Química, evaluado desde el punto de vista de los estudiantes que ejecutaron el programa, así como, por las personas encargadas del curso en estudio.

Figura 23. “Necesidad del DE en la carrera de IQ”

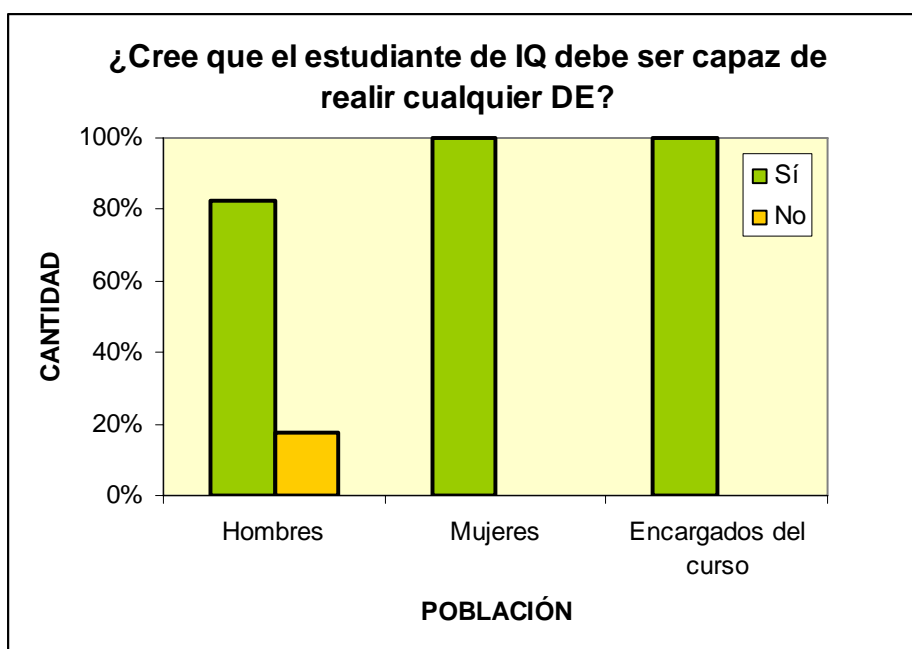


Fuente: Datos colectados.

3.1.2.2 Evaluación de la capacidad del estudiante de Ingeniería Química para realizar diseños experimentales

Este gráfico se refiere a que tan necesaria debe ser la existencia de la capacidad en el estudiante de Ingeniería Química para la realización de cualquier diseño experimental, evaluado desde el punto de vista de los estudiantes que ejecutaron el programa, así como por las personas encargadas del curso en estudio.

Figura 24. “Capacidad de ejecución del DE en el estudiante de IQ”

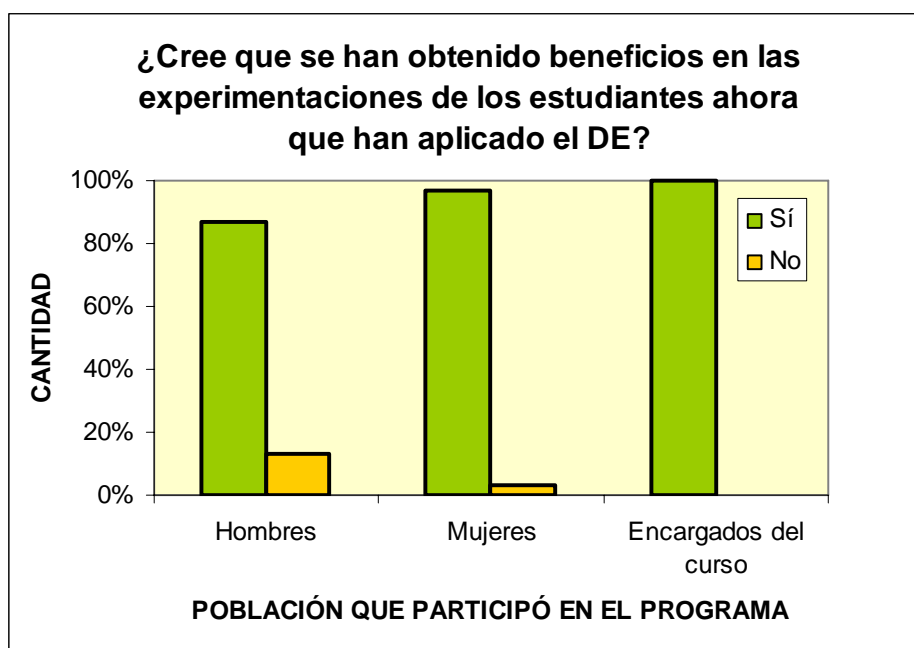


Fuente: Datos colectados.

3.1.2.3 Evaluación de la existencia de beneficios con la utilización del diseño experimental

En este gráfico se presenta la evaluación de la existencia de beneficios con la utilización del diseño experimental previo a la experimentación; evaluado desde el punto de vista de los estudiantes que ejecutaron el programa, así como por las personas encargadas del curso en estudio.

Figura 25. “Existencia de beneficios ejecutando el DE”

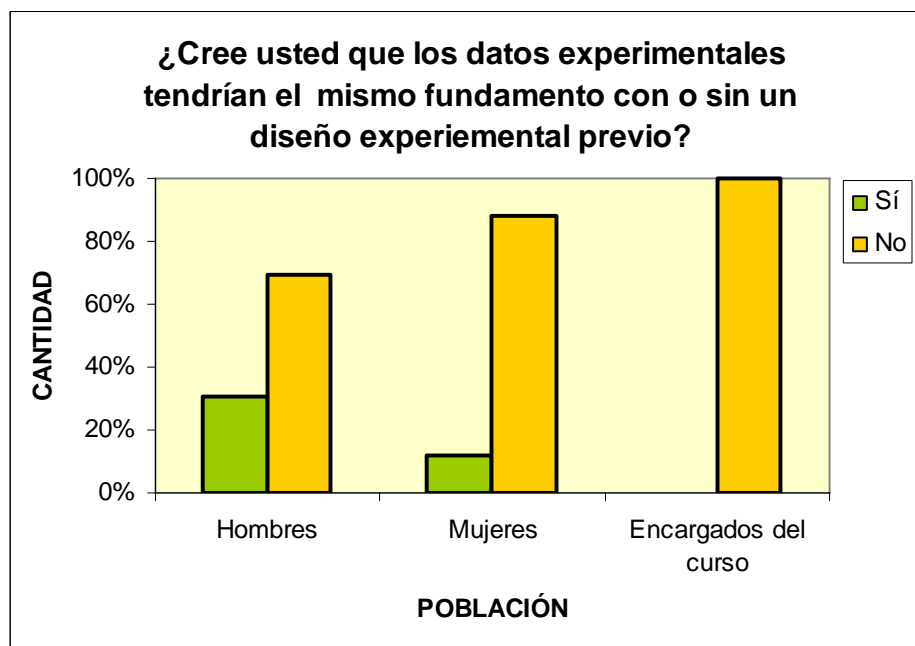


Fuente: Datos colectados.

3.1.2.4 Evaluación del fundamento de los datos experimentales y las conclusiones

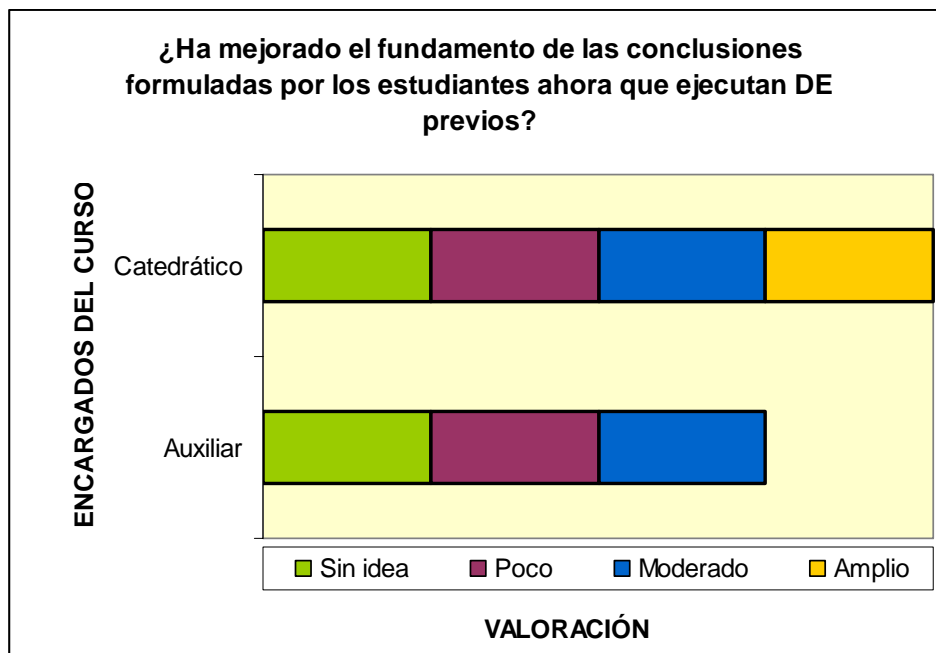
En estos gráficos, se muestra la evaluación realizada acerca del fundamento de los datos experimentales y las conclusiones, luego de haber incluido el diseño experimental previo a la experimentación; evaluado desde el punto de vista de los estudiantes que ejecutaron el programa, así como por las personas encargadas del curso en estudio.

Figura 26. “Fundamentación de datos experimentales con DE previo”



Fuente: Datos colectados.

Figura 27. “Fundamento de conclusiones, evaluado por encargados del curso donde se ejecutó el programa”



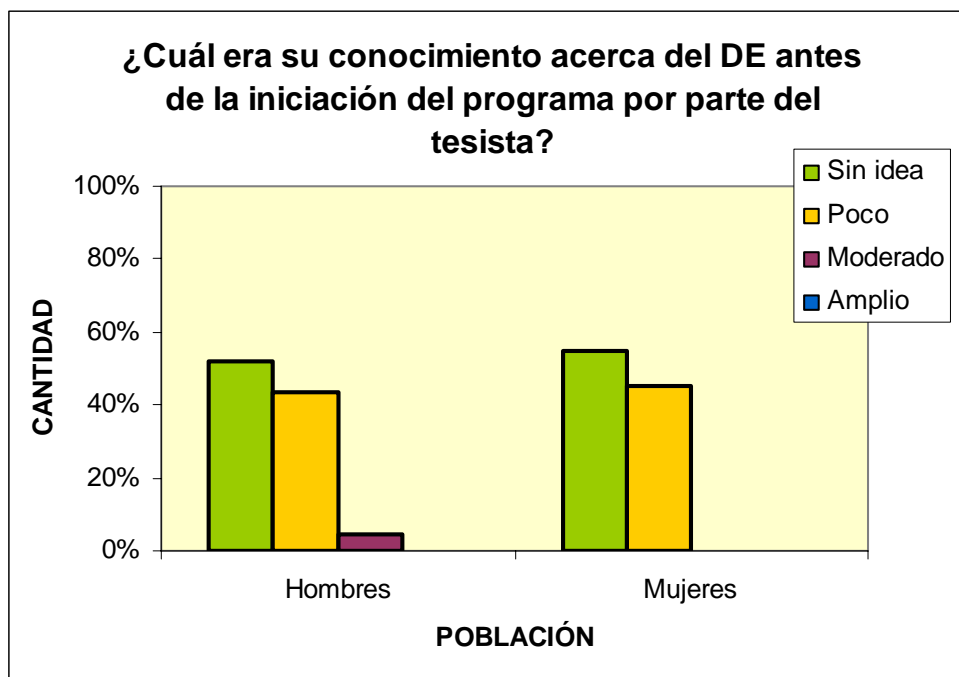
Fuente: Datos colectados.

3.1.3 Conocimiento adquirido para la realización del diseño experimental en operaciones unitarias

3.1.3.1 Evaluación del conocimiento del diseño experimental antes de la iniciación del programa

En este gráfico se muestra el nivel de conocimiento del diseño experimental antes de la iniciación del programa desarrollado por el tesista. Este conocimiento fue evaluado desde el punto de vista de los estudiantes que ejecutaron el programa.

Figura 28. “Conocimiento del DE antes del programa”

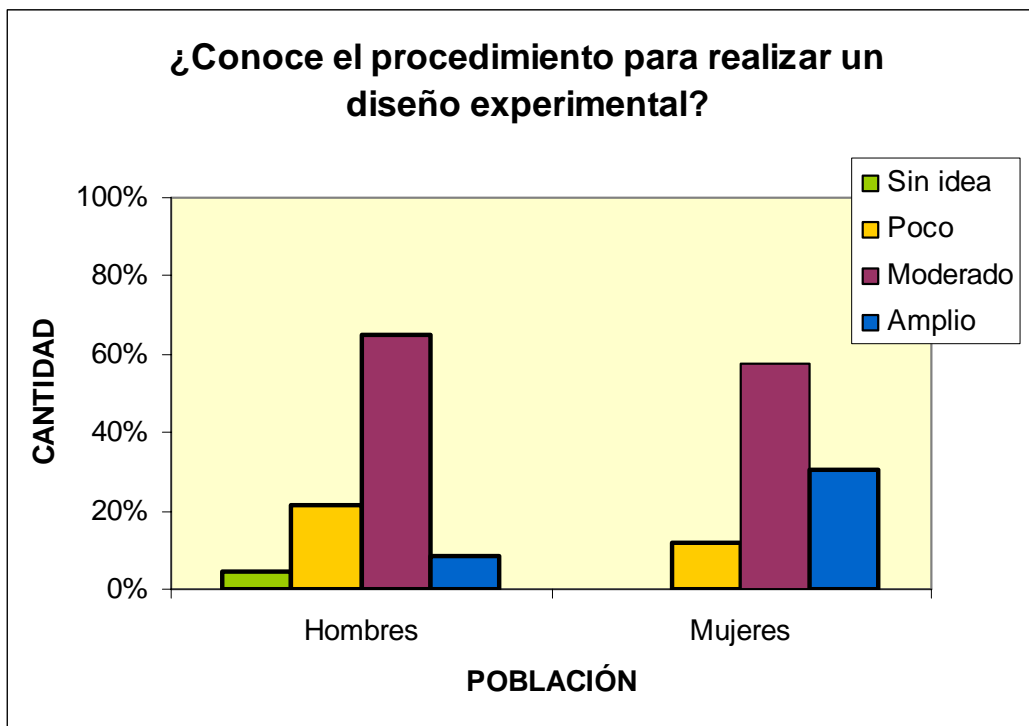


Fuente: Datos colectados.

3.1.3.2 Evaluación del aprendizaje de la metodología desarrollada

En estos gráficos se evalúa el aprendizaje de la metodología desarrollada por el tesista. Es decir, se evaluó el aprendizaje que se tuvo de la metodología propuesta por el tesista para ejecutar el diseño experimenta en el área de operaciones unitarias; evaluación que corrió a cargo de la población que ejecutó el programa.

Figura 29. “Conocimiento del procedimiento para la ejecución del DE”

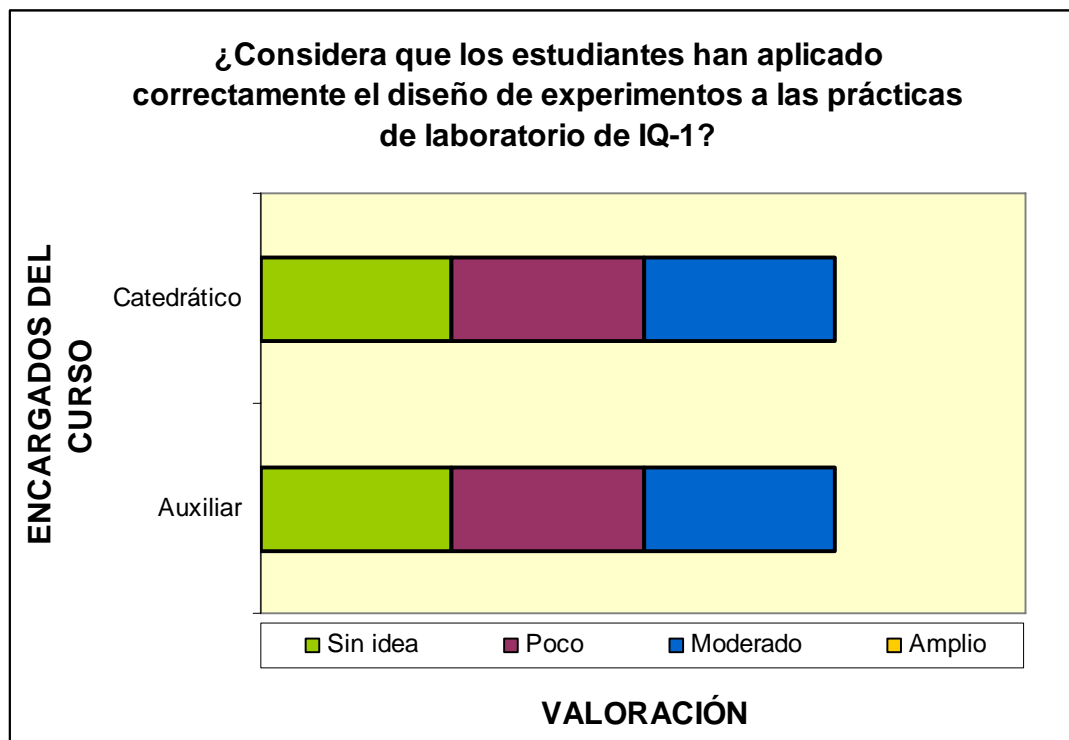


Fuente: Datos colectados.

3.1.3.3 Evaluación de la correcta utilización del diseño de experimentos

En este gráfico se muestra como los encargados del curso donde se ejecutó el programa evaluaron la ejecución de los diseños experimentales que elaboraron los estudiantes que ejecutaron el programa de aprendizaje del diseño experimental en operaciones unitarias.

Figura 30. “Evaluación de la correcta utilización del DE”

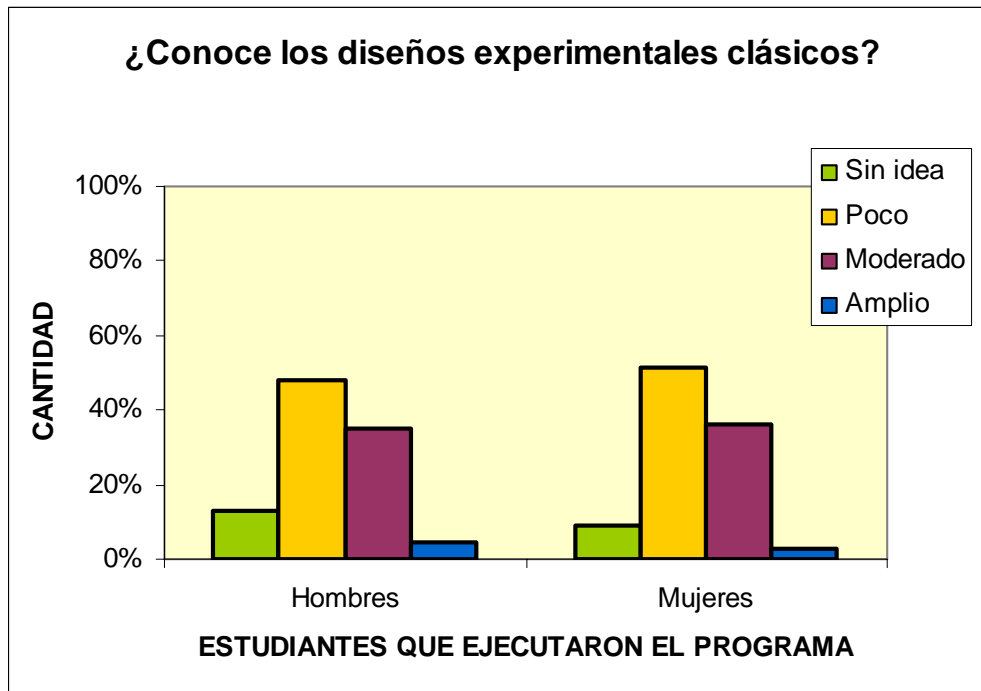


Fuente: Datos colectados.

3.1.3.4 Evaluación del conocimiento de los diseños experimentales estadísticos clásicos

Este gráfico muestra la habilidad adquirida posterior a la ejecución del programa para la utilización de los diferentes diseños estadísticos clásicos existentes, conocimiento que fue evaluado al finalizar el programa; desde el punto de vista de los estudiantes que ejecutaron el programa.

Figura 31. “Conocimiento de los diseños estadísticos clásicos”

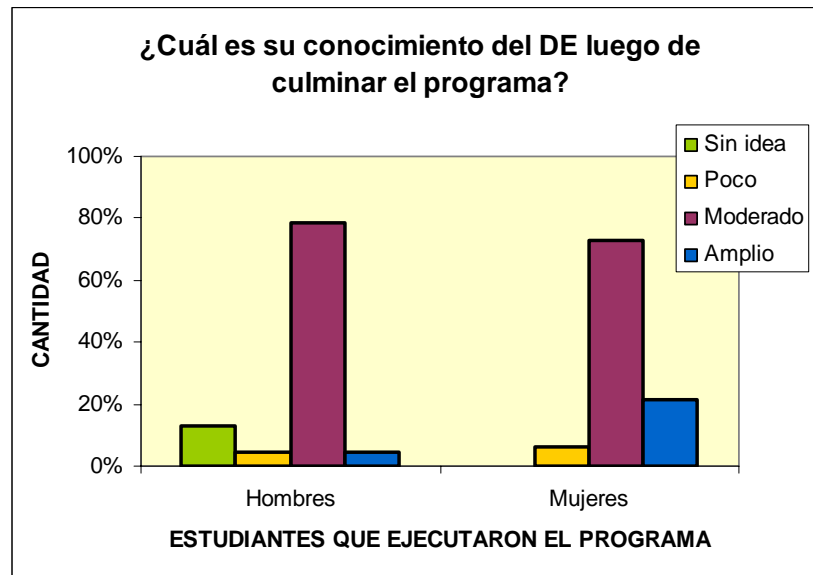


Fuente: Datos colectados.

3.1.3.5 Mejora del conocimiento del diseño experimental posteriormente a la ejecución del programa

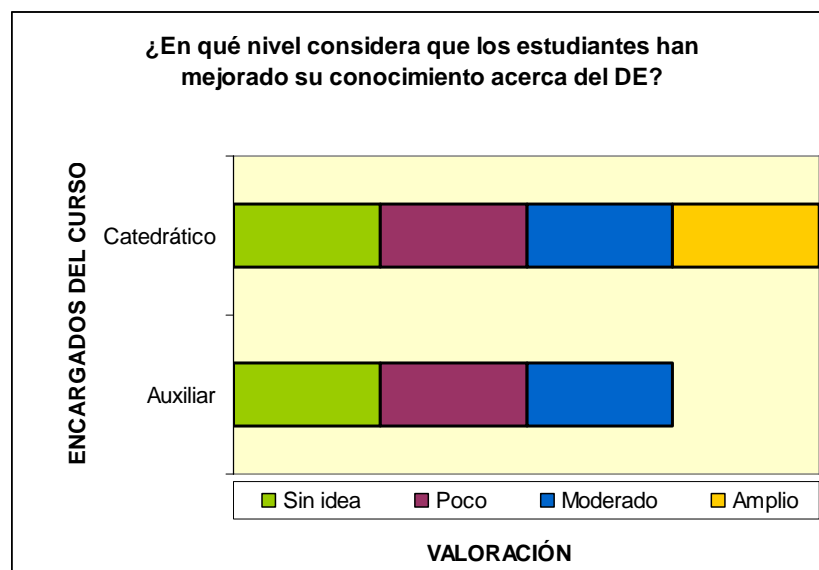
En estos gráficos se evalúa en que nivel se mejoró el conocimiento del diseño experimental, luego de haber culminado con el desarrollo del programa; evaluación que corrió a cargo de los estudiantes que ejecutaron el programa, así como por los encargados del curso en estudio.

Figura 32. “Conocimiento del DE posterior a la ejecución del programa desarrollado en esta investigación”



Fuente: Datos colectados.

Figura 33. “Conocimiento del DE posterior a la ejecución del programa desarrollado en esta investigación”

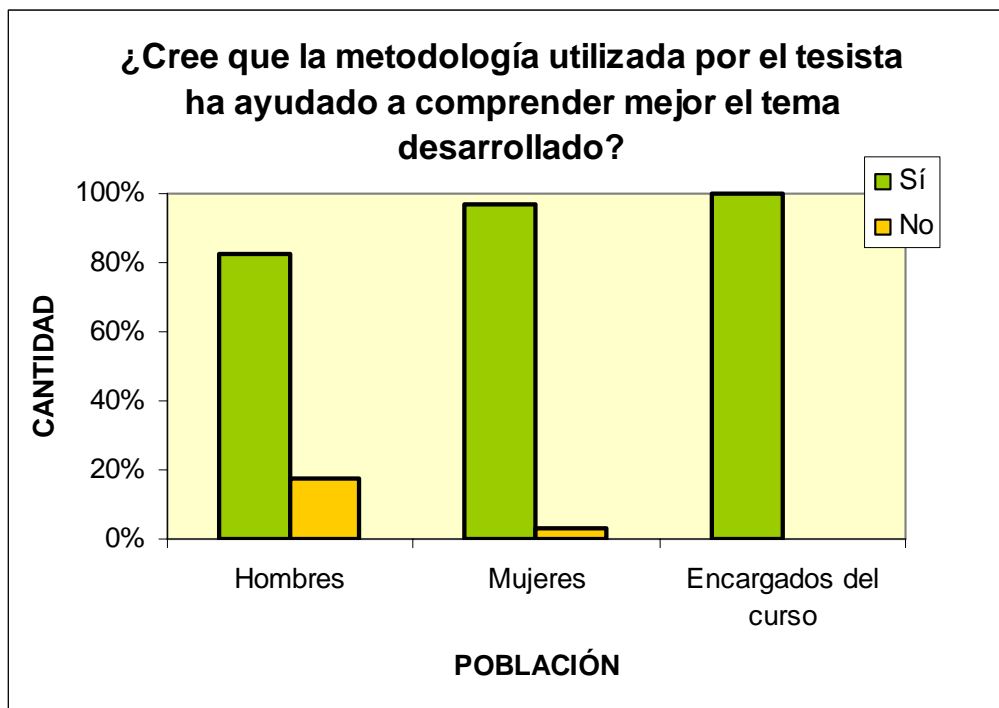


Fuente: Datos colectados.

3.1.3.6 Evaluación de la metodología desarrollada

Este gráfico muestra la evaluación de la metodología empleada por el tesista para la aplicación del diseño experimental en el área de operaciones unitarias, evaluado desde el punto de vista de los estudiantes que ejecutaron el programa, así como por las personas encargadas del curso en estudio.

Figura 34. “Evaluación de la metodología desarrollada”



Fuente: Datos colectados.

Tabla I. “Avance de la calificación de diseño experimentales evaluados por el tesista para el grupo del día martes”

Grupo	Práctica 1	Práctica 2	Práctica 3	Práctica 4	Práctica 5	Práctica 6
Grupo M1	MDF	ADMA	ICCTCu	ICTC	MCSR	BC
	SDE	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable
Grupo M2	BC	MDF	ADMA	ICCTCu	ICTC	MCSR
	SDE	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Deficiente
Grupo M3	MCSR	BC	MDF	ADMA	ICCTCu	ICTC
	SDE	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Deficiente
Grupo M4	ICTC	MCSR	BC	MDF	ADMA	ICCTCu
	SDE	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable
Grupo M5	ICCTCu	ICTC	MCSR	BC	MDF	ADMA
	SDE	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Grupo M6	ADMA	ICCTCu	ICTC	MCSR	BC	MDF
	SDE	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable

SDE: Sin diseño experimental.

Fuente: Evaluación realizada.

Tabla II. “Avance de la calificación de diseño experimentales evaluados por el tesista para el grupo del día jueves”

Grupo	Práctica 1	Práctica 2	Práctica 3	Práctica 4	Práctica 5	Práctica 6
Grupo J1	MDF	ADMA	ICCTCu	ICTC	MCSR	BC
	SDE	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Aceptable
Grupo J2	BC	MDF	ADMA	ICCTCu	ICTC	MCSR
	SDE	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Aceptable
Grupo J3	MCSR	BC	MDF	ADMA	ICCTCu	ICTC
	SDE	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable
Grupo J4	ICTC	MCSR	BC	MDF	ADMA	ICCTCu
	SDE	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable
Grupo J5	ICCTCu	ICTC	MCSR	BC	MDF	ADMA
	SDE	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Grupo J6	ADMA	ICCTCu	ICTC	MCSR	BC	MDF
	SDE	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable

SDE: Sin diseño experimental.

Fuente: Evaluación realizada.

3.2 Diseños experimentales en las prácticas internas de operaciones unitarias

3.2.1 Evaluación y comparación de los diseños para la selección del mejor diseño

Tabla III. “Evaluación y comparación de los diseños experimentales seleccionados para la práctica ICCTCu”

Aspecto Evaluado	Práctica seleccionada como aceptable				
	ICCTCu M1-3	ICCTCu M2-4	ICCTCu M3-5	ICCTCu M4-6	ICCTCu J4-6
Capacidad Informativa	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Costo	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Poder	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Deficiente	Deficiente
Restricciones Metodológicas	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Aceptable
Restricciones Prácticas	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Deficiente	Aceptable
Propósito	Deficiente	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Aceptable
Efecto De la estadística	Deficiente	Aceptable	Deficiente	Deficiente	Aceptable
Conclusión	Rechazado	Rechazado	Rechazado	Rechazado	Aceptado

Fuente: Evaluación y comparación realizada.

Tabla IV. “Evaluación y comparación de los diseños experimentales seleccionados para la práctica ICTC”

Práctica seleccionada como aceptable						
Aspecto Evaluado	ICTC M6-3	ICTC M1-4	ICTC M2-5	ICTC J6-3	ICTC J2-5	ICTC J3-6
Capacidad Informativa	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Deficiente	Deficiente	Aceptable
Costo	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Deficiente
Poder	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable
Restricciones Metodológicas	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Deficiente	Deficiente	Aceptable
Restricciones Prácticas	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Propósito	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Deficiente
Efecto de la Estadística	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Conclusión	Rechazado	Rechazado	Aceptado	Rechazado	Rechazado	Rechazado

Fuente: Evaluación y comparación realizada.

Tabla V. “Evaluación y comparación de los diseños experimentales seleccionados para la práctica BC”

Práctica seleccionada como aceptable							
Aspecto Evaluado	BC M4-3	BC M5-4	BC M1-6	BC J4-3	BC J5-4	BC J6-5	BC J1-6
Capacidad Informativa	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Deficiente	Aceptable
Costo	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Deficiente	Deficiente
Poder	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Deficiente
Restricciones Metodológicas	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Deficiente
Restricciones Prácticas	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Propósito	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Deficiente
Efecto de la Estadística	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Conclusión	Rechazado	Rechazado	Aceptado	Rechazado	Rechazado	Rechazado	Rechazado

Fuente: Evaluación y comparación realizada.

Tabla VI. “Evaluación y comparación de los diseños experimentales seleccionados para la práctica MDF”

Práctica seleccionada como aceptable							
Aspecto Evaluado	MDF M4-4	MDF M5-5	MDF M6-6	MDF J3-3	MDF J4-4	MDF J5-5	MDF J6-6
Capacidad Informativa	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Deficiente
Costo	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Poder	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Deficiente	Deficiente	Aceptable	Deficiente
Restricciones Metodológicas	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Aceptable
Restricciones Prácticas	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Propósito	Deficiente	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Deficiente	Aceptable	Deficiente
Efecto de la Estadística	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Conclusión	Rechazado	Rechazado	Rechazado	Rechazado	Rechazado	Aceptado	Rechazado

Fuente: Evaluación y comparación realizada.

3.2.2 Propuesta de diseños experimentales validados en las prácticas internas de operaciones unitarias

3.2.2.1 Diseño validado propuesto para la práctica intercambiador de calor de concha y tubos de cobre (ICCTCu)

EJEMPLO 1

Descripción del problema

Definición de objetivos

Cuantificar la relación existente entre el flujo másico y el coeficiente de transferencia de calor, así como la relación existente entre el número de Reynolds y el número de Prandtl. De modo que para el conjunto de relaciones se establezca las condiciones para las cuales se logran las mejores eficiencias.

Preguntas referentes a la investigación

1. ¿Cuáles son los datos requeridos para determinar el coeficiente de transferencia de calor en un intercambiador de calor?

R// Debe realizarse un análisis matemático que permita el establecimiento de los coeficientes convectivos de transferencia de calor en el intercambiador mediante utilización de parámetros como número de Reynolds, Prandtl y otros útiles.

2. ¿Cómo se puede establecer parámetros como número de Reynolds y número de Prandtl?

R// Se debe realizar una análisis ecuacional de variables tales como velocidad de flujo, diámetro equivalente, viscosidad, densidad, capacidad calorífica y conductividad térmica.

3. ¿Cómo se puede realizar el análisis de eficiencia de un intercambiador de calor de concha y tubos?

R// Estableciendo el valor del calor teórico necesario para el intercambiador, así como el calor real transferido para relacionar estos valores y establecer el valor de eficiencia.

4. ¿Qué datos son necesarios para establecer el valor del calor transferido al intercambiador de calor, tanto teórico como real?

R// El calor real se establece mediante la realización de un balance de energía en el equipo utilizando datos como la diferencia de temperaturas observadas, flujo másico y capacidad calorífica. Mientras que el calor teórico se puede establecer mediante manipulación ecuacional de las variables como coeficiente de transferencia de calor, área de transferencia y diferencias de temperatura.

Justificación

Para lograr el cumplimiento de los objetivos se realizará el proceso de transferencia de calor correspondiente a las unidades de intercambio de calor disponibles, estableciendo mediciones de temperaturas de entrada y salida de cada uno de los flujos involucrados en cada intercambiador.

Se realizarán observaciones a diferentes flujos másico de agua con el objeto de observar y analizar el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor en torno a variaciones de flujo másico. Posteriormente los diferentes flujos másicos trabajados serán comparados con el respectivo número de Prandtl.

Al finalizar se establecerá mediante manipulación de datos observados el comportamiento de las eficiencias para cada unidad de intercambio de calor.

Descripción de variables involucradas

No.	VARIABLE	DISENSIONAL	FACTOR POTENCIAL DE DISEÑO		FACTORES PERTURBADORES	
			Constantes	Variables	Controlables	De ruido
Análisis de Equipo						
1	P vapor Entrada	PSI	X			
2	Intercambiador			X		
3	T. E. fluido coraza	° C	X			
4	T. S. fluido coraza	° C		X		
5	T. E. fluido tubos	° C	X			
6	T. S. fluido tubos	° C		X		
7	Flujo más de agua	Kg/s		X		
Análisis de Ambiente externo:						
8	Temperatura amb.	° C				X
9	P atmosférica	atm				X
10	Humedad	%				SIE

SIE: Sin mayor influencia en la experimentación objetivo.

Descripción de variables a manipular

No.	VARIABLE	DISENSIONAL	Rango De Variación
1	No. de intercambiador D. C.		15, 13, 11, 10 y 16 deflect.
2	Flujo másico de agua	Kg/s	0.3 - 0.4

Selección de variables de respuesta o salida

Las variables con las cuales se establecerán los datos de interés son las lecturas realizadas en los termómetros que indicarán las temperaturas de entrada y salida, la caída de presión en el medidor de orificio que dará la información para evaluar el flujo másico de agua tanto en la coraza como en los tubos, el contador de agua que medirá el paso de metros cúbicos utilizados. De tal manera que se establezca el coeficiente de transferencia de calor, eficiencias, número de Reynolds, número de Prandtl.

Elección de diseño experimental

Diseño de tratamientos

Las condiciones o tratamientos que se evaluarán en esta unidad para el cumplimiento de los objetivos, consiste en la manipulación de diferentes flujos máxicos de agua en los diferentes intercambiadores que componen la unidad, siendo la variable de observación el coeficiente de transferencia de calor y la eficiencia lograda.

Así también se analizará con un análisis de regresión la relación existente entre el NRe y NPr tenido como variable dependiente el NPr y variable independiente NRe.

Diseño de control de error

Para el procesamiento de datos de instrumentos de medición tales como termómetro, manómetros diferenciales, balanzas, serán realizadas 3 lecturas y se tomará como medida respectiva el promedio de estas cuatro lecturas, con el objeto de mejorar la precisión de los datos medidos.

Muestreo

Se decide que la hipótesis nula deberá rechazarse con una alta probabilidad si la diferencia en el coeficiente de transferencia de calor entre dos intercambiadores de diferentes deflectores sea hasta de 20 KW/m² °K. Y de datos históricos se sabe que la desviación estándar entre los coeficientes observados se puede aproximar a 11.

$$\Phi^2 = \frac{naD^2}{2b\sigma^2} = \frac{n(5)(20)^2}{2(5)(11)^2} = 1.65n$$

n	Φ^2	Φ	$\nu_1 = \text{Grados}$ <i>de libertad numerador</i>	$\nu_2 = \text{Grados}$ <i>de libertad error</i>	β
2	3.30	1.81	4	25	0.13
3	4.95	2.22	4	50	0.025

Fuente: Datos obtenidos utilizando curvas de operación del apéndice F.

Con la realización de 3 réplicas se obtiene un riesgo β de cerca de 0.025, o una probabilidad aproximada de 0.975 %, de rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto se realizarán 3 réplicas de la experimentación.

Diseño de observaciones

Para mejorar la eficiencia en la toma de datos de la unidad experimental, las 25 réplicas del experimento se llevarán a cabo en un orden lógico partiendo del flujo másico de agua más bajo al flujo más alto, del intercambiador de 16 deflectores hasta el intercambiador de 10 deflectores.

De acuerdo al desarrollo de los incisos anteriores, se desea establecer el efecto de la manipulación del flujo másico de agua y el número de deflectores en los intercambiadores sobre el coeficiente de transferencia de calor y la eficiencia, por ello el diseño a utilizar será un diseño factorial de dos factores.

Flujo másico de agua	Coeficiente de transferencia de calor				
	1 (16 deflect)	2 (15 deflect)	3 (13 deflect)	4 (11 deflect)	5 (10 deflect)
1		D ₁			
2		D ₂			
3		D ₃			
4					
5					

D = Variable de observación para cada intercambiador y para cada flujo másico, en la réplica n. Ya sea coeficiente de transferencia de calor o eficiencia.

Planteamiento de hipótesis

Hipótesis científica

1. "El coeficiente de transferencia de calor y las eficiencias se mejoran a mayores flujos máxicos y a mayor número de deflectores".
2. "Existe una relación lineal entre el número de Reynolds y el número de Prandtl".

Hipótesis estadística

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots \tau_a = 0 \quad \text{ó} \quad \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_b = 0$$
$$H_1: \tau_i \neq 0 \quad \text{ó} \quad \beta_j \neq 0$$

Ho: "El coeficiente de transferencia de calor así como la eficiencia es independiente de la variación del flujo máxico y de los deflectores del sistema de intercambio"

Ha: "El coeficiente de transferencia de calor así como la eficiencia es dependiente de la variación del flujo máxico y de los deflectores del sistema de intercambio"

Ho: "Ninguno de los regresores contribuye de manera significativa al modelo de regresión lineal establecido"

Ha: "Al menos uno de los regresores contribuye de forma significativa al modelo de regresión lineal propuesto"

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$$

$$H_1: \text{al menos una } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

Ho: "No existe interacción entre los factores flujo máxico y cantidad de deflectores en un intercambiador de calor"

Ha: "Al menos existe una interacción entre los factores flujo máxico y cantidad de deflectores en un intercambiador de calor"

Resultados obtenidos

Coefficiente de transferencia de calor para el sistema ICCTCu

Flujo másico de agua Kg/s	Coefficiente de transferencia de calor (KW/m ² °K)				
	1	2	3	4	5
	(16 deflect)	(15 deflect)	(13 deflect)	(11 deflect)	(10 deflect)
0.300	539.190	426.170	417.140	408.110	400.48
	533.399	431.170	415.891	410.392	395.239
	547.336	421.473	420.147	405.691	404.958
0.320	545.816	433.708	427.856	422.004	409.556
	553.962	429.011	429.174	420.351	404.876
	540.025	438.708	430.916	425.961	414.589
0.330	549.129	437.477	433.214	428.951	414.094
	557.275	442.477	432.179	425.984	418.143
	543.338	432.780	435.698	430.123	410.489
0.350	555.755	445.015	443.930	442.845	423.17
	549.964	440.318	445.198	440.198	425.871
	563.901	450.015	451.691	445.136	420.693
0.360	559.068	448.784	449.288	449.792	427.708
	567.214	453.784	452.319	450.198	425.179
	553.277	444.087	447.134	447.361	436.289

Análisis de la eficiencia para el sistema ICCTCu

Flujo másico de agua Kg/s	Eficiencia (%)				
	1	2	3	4	5
	(16 deflect)	(15 deflect)	(13 deflect)	(11 deflect)	(10 deflect)
0.3	61.29	61.29	53.27	45.24	26.79
	63.77	63.77	55.75	47.72	29.27
	55.28	55.28	47.26	39.23	20.78
0.32	82.26	82.26	65.82	49.38	29.37
	84.74	84.74	68.30	51.86	31.85
	76.25	76.25	59.81	43.37	23.36
0.33	90.10	71.30	60.27	49.24	27.51
	92.58	73.78	62.75	51.72	29.99
	84.09	65.29	54.26	43.23	21.50
0.35	92.30	80.30	71.63	62.96	38.62
	94.78	82.78	74.11	65.44	41.10
	86.29	74.29	65.62	56.95	32.61
0.36	63.71	63.71	64.36	65.00	41.80
	66.19	66.19	66.835	67.48	44.28
	57.70	57.70	58.35	58.99	35.79

Análisis de regresión entre NRe y NPr

Flujo másico de agua (Kg/s)	NRe/NPr		
0.30	322.20	335.46	330.09
0.32	343.68	348.57	351.14
0.33	354.42	359.24	349.53
0.35	375.90	380.72	367.71
0.36	386.64	391.46	384.68

Análisis estadístico de datos

Análisis del coeficiente de transferencia de calor, salida de Minitab

Diseño factorial de múltiples niveles

Factores: 2 Réplicas: 3
Corridas base: 25 Total de corridas: 75
Bloques base: 1 Total de bloques: 1

Número de niveles: 5, 5

Modelo lineal general: Ut vs. Flujo másico, No. Deflec

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Flujo másico	fijo	5	0.30, 0.32, 0.33, 0.35, 0.36
No. Deflec	fijo	5	10, 11, 13, 15, 16

Análisis de varianza para Ut, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Flujo másico	4	8011.8	8011.8	2003.0	95.09	0.000
No. Deflec	4	179564.2	179564.2	44891.0	2131.14	0.000
Interacción	16	553.6	553.6	34.6	1.64	0.092
Error	50	1053.2	1053.2	21.1		
Total	74	189182.8				

S = 4.58959 R-cuad. = 99.44% R-cuad.(ajustado) = 99.18%

Como los valores de P son menores a 0.05 se puede considerar que si existen diferencias significativas en la aplicación del tratamiento Flujo másico y No. de deflectores en torno al comportamiento del coeficiente de transferencia de calor, es decir se acepta la hipótesis alternativa. Sin embargo no hay significación estadística en el efecto de interacción entre los dos tratamientos o factores analizados.

Análisis de la eficiencia, salida de Minitab

Modelo lineal general: Ef vs. Flujo másico, No. Deflec

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Flujo másico	fijo	5	0.30, 0.32, 0.33, 0.35, 0.36
No. Deflec	fijo	5	10, 11, 13, 15, 16

Análisis de varianza para Ef, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Flujo másico	4	2941.3	2941.3	735.3	38.58	0.000
No. Deflec	4	18602.8	18602.8	4650.7	244.03	0.000
Flujo másico*No. Deflec	16	2784.9	2784.9	174.1	9.13	0.000
Error	50	952.9	952.9	19.1		
Total	74	25281.9				

S = 4.36551 R-cuad. = 96.23% R-cuad.(ajustado) = 94.42%

Como los valores de P son menores a 0.05 se puede considerar que si existen diferencias significativas en la aplicación del tratamiento Flujo másico y No. de deflectores en torno al comportamiento de la eficiencia, es decir se acepta la hipótesis alternativa. Así también existe efecto de interacción entre los dos tratamientos o factores analizados para el comportamiento de la eficiencia en la unidad experimental.

Análisis de regresión, salida de Minitab

Análisis de regresión: NRe/NPr vs. Flujo másico

La ecuación de regresión es
 $NRe/NPr = 41.3 + 956 \text{ Flujo másico}$

Predictor	Coef	Coef.		
		de EE	T	P
Constante	41.29	19.80	2.08	0.057
Flujo másico	956.25	59.53	16.06	0.000

S = 4.92308 R-cuad. = 95.2% R-cuad.(ajustado) = 94.8%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	6254.5	6254.5	258.06	0.000
Error residual	13	315.1	24.2		
Total	14	6569.6			

Formulación de conclusiones

1. El coeficiente de transferencia de calor así como la eficiencia es dependiente significativamente de la variación del flujo másico y de los deflectores del sistema de intercambio de calor.
 2. Al menos existe una interacción entre los factores flujo másico y cantidad de deflectores en un intercambiador de calor cuando se analiza la eficiencia.
 3. Al menos uno de los regresores contribuye de manera significativa al modelo de regresión lineal.
-

3.2.2.2 Diseño validado propuesto para la práctica medidores de flujo de agua (MDF)

EJEMPLO 2

Descripción del problema

Definición de objetivos

Conocer el comportamiento entre la recuperación de presión, pérdida de presión y coeficientes de descarga para medidores venturi y orificio, en torno al comportamiento del número de Reynolds.

Así también establecer la calibración respectiva de cada uno de los medidores de flujo que componen la unidad experimental (Orificio, vertedero, ranura, venturi y rotámetro).

Preguntas referentes a la investigación

1. ¿Cómo se establece la recuperación de presión de un medidor de flujo?

R// Se establece mediante la comparación de la cantidad de presión en la tubería luego del medidor de flujo con la cantidad de presión perdida por el medidor de flujo, los cuales son valores que se obtienen directamente de la observación de equipo de medición situado en puntos específicos, tales como manómetros diferenciales.

2. ¿Cómo se establece la pérdida de presión en un medidor de flujo?

R// Se establece comparando los valores de la presión antes del medidor de flujo y la presión posterior, mediante observación directa de equipo de medición situado en puntos específicos, tales como manómetros diferenciales.

3. ¿Cómo se establecen los coeficientes de descarga de los medidores de flujo?

R// Se establece mediante el desarrollo de balances de energía mecánica en cada dispositivo de interés. Que pueden ser obtenidos de la manipulación de variables en la ecuación resultante.

4. ¿Cómo se logra la calibración de los medidores de flujo?

R// Se logra mediante la comparación de un flujo másico conocido medido directamente con las unidades respectivas de cada medidor.

Justificación

Para lograr el cumplimiento de los objetivos se cuenta con una unidad experimental asignada con 5 diferentes medidores de flujo, medidor de ranura, vertedero, orificio, venturi y rotámetro. Para la colección de los datos experimentales de interés se establecerá un flujo respectivo en la unidad experimental mediante su determinación directa, a partir del cual se procederá a calibrar el medidor rotámetro.

Posteriormente para realizar las calibraciones respectivas de cada medidor en estudio, se realizarán comparaciones de los flujos medidos con el rotámetro y las unidades de los demás medidores, realizando la observación de las variables de interés que permitan conocer el valor de las variables de comparación.

Descripción de variables involucradas

No.	VARIABLE	DISENSIONAL	FACTOR POTENCIAL DE DISEÑO		FACTORES PERTURBADORES	
			constantes	variables	controlables	de ruido
Análisis de Equipo						
1	Medidor seleccionado			X		
2	Flujo másico de agua	Kg./s		X		
3	Presión del equipo	PSI		X		
4	Temperatura del fluido	° C			X	
Análisis de Ambiente externo:						
5	Temperatura ambiente	° C				X
6	Presión atmosférica	atm				X
7	Humedad	%				SIE

SIE: Sin mayor influencia en la experimentación objetivo.

Descripción de variables a manipular

No.	VARIABLE	DISENSIONAL	Rango de Variación
1	Flujo másico de agua	U. de rot.	50 - 150 unidades del rotámetro
2	Medidor de flujo seleccionado		5 diferentes

Selección de variables de respuesta o salida

Las variables con las cuales se establecerán los datos de interés son las lecturas realizadas en los instrumentos de medición de masa, tiempo, flujo másico, manómetros diferenciales. De tal manera que se establezca el coeficiente de transferencia de calor, eficiencias, número de Reynolds, número de Prandtl.

Elección de diseño experimental

Diseño de tratamientos

Las condiciones o tratamientos que se evaluarán en esta unidad para el cumplimiento de los objetivos, son los diferentes medidores de flujo calibrados siendo las variables de observación el coeficiente de descarga, pérdida de presión, recuperación de presión y los datos respectivos de la calibración de cada medidor utilizando como factor o tratamiento el flujo másico real comparado.

Diseño de control de error

Dado que los niveles de flujo son constantemente variables, se tomarán tres lecturas del dato correspondiente en cada unidad de medición, trabajando así con el dato promedio de estas lecturas para cada réplica del experimento.

Muestreo

Se decide que la hipótesis nula sea rechazada con una alta probabilidad (90%). Para ello se realiza un análisis de datos históricos en donde se tiene:

Flujo másico seleccionado (Kg./s)	Unidades del rotámetro					Totales	Promedio
	1	2	3	4	5		
0.12	56	54	58	54	54	276	55.2
0.17	80	80	74	80	78	392	78.4
0.23	100	102	102	102	102	508	101.6
0.32	122	122	120	122	122	608	121.6
0.34	140	140	140	140	142	702	140.4

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, Unidad de Medidores de Flujo USAC. Segundo semestre 2006.

Si las medias de los 5 tratamientos son :

$$\mu_1 = 55.2 \quad \mu_2 = 78.4 \quad \mu_3 = 101.6 \quad \mu_4 = 121.6 \quad \mu_5 = 140.4 \quad \bar{\mu} = 497.2/5 = 99.44$$

$$\tau_1 = \mu_1 - \bar{\mu} = 55.2 - 99.44 = -44.24$$

$$\tau_2 = \mu_2 - \bar{\mu} = 78.4 - 99.44 = -21.04$$

$$\tau_3 = \mu_3 - \bar{\mu} = 101.6 - 99.44 = 2.16$$

$$\tau_4 = \mu_4 - \bar{\mu} = 121.6 - 99.44 = 22.16$$

$$\tau_5 = \mu_5 - \bar{\mu} = 140.4 - 99.44 = 40.96$$

$$\sum_{i=1}^5 \tau_i^2 = (-44.24)^2 + \dots + (22.16)^2 = 4573.31$$

$$\sigma = 33.81$$

$$\Phi^2 = \frac{n \sum_{i=1}^5 \tau_i^2}{a \sigma^2}$$

Donde:
 $\Phi^2 = \text{factor}$
 $n = \text{factor}$
 $a = \text{numero de tratamientos}$
 $\sigma = \text{desviación estándar}$

$$\Phi^2 = \frac{4573.31n}{(5)(33.81)^2} = 0.80n$$

Utilizando la curva de operación característica para $a - 1 = 5 - 1 = 4$ grados de libertad del numerador y con $N - a = a(n - 1) = 5(n - 1)$ grados de libertad del error y alfa de 0.05 de acuerdo al apéndice F.

n	Φ^2	Φ	$a(n-1)$	β	Potencia $(1-\beta)$
4	3.2	1.788	15	0.15	0.85
5	4	2	20	0.095	0.905
6	4.8	2.19	25	0.035	0.965

De acuerdo a esta tabla se tiene que para un número de réplicas de 5 se alcanza la probabilidad deseada (0.90). Por lo tanto son necesarias 5 réplicas del experimento.

Diseño de observaciones

Para evitar fluctuaciones del flujo el orden de corridas se llevará del flujo más pequeño al flujo más grande incurriendo a la aleatorización únicamente en el orden de corridas por flujo, tal como se muestra a continuación:

		UNIDADES DEL MEDIDOR DE FLUJO				
		I	II	III	IV	V
FLUJO MÁSSICO	1	2	5	1	4	3
	2	6	9	10	7	8
	3	14	12	11	13	15
	4	19	16	18	17	20
	5	25	21	23	22	24

De acuerdo al desarrollo de los incisos anteriores, se desea establecer si hay diferencia significativa en los datos observados para la calibración de cada medidor de flujo, así como la diferencia existente en el comportamiento de variables como coeficiente de descarga, pérdida de presión y recuperación de presión en medidores de orificio y venturi. Por ello el diseño que mejor se adapta a la investigación es un diseño completamente al azar y un diseño factorial de 2 factores estructurados como se muestra.

Diseño completamente al azar

Unidades de rotámetro	Corridas o réplicas				
	1	2	3	4	5
1	D_1				
2					
3					
4					
5					

D_1 = Flujo másico observado para la primer réplica.

Diseño factorial de 2 factores

	Medidor de flujo	
	Venturi	Orificio
NÚMERO DE REYNOLDS	1	D_1
	2	
	3	
	4	
	5	

D = Variable de observación para el flujo 1, ya sea coeficiente de descarga, recuperación de presión o pérdida de presión.

Planteamiento de hipótesis

Hipótesis científica

1. "A mayor número de Reynolds, se observa mayor coeficiente de descarga para el venturímetro y el medidor de orificio, lo cual reduce el efecto de la fricción".
2. "Las calibraciones de los cinco medidores de flujo estudiados siguen un modelo lineal".

Hipótesis estadística

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ para al menos una } i$$

H₀: "Los medidores de flujo no se pueden describir de acuerdo al comportamiento del flujo másico trabajado ya que tanto las unidades del medidor como el flujo son significativamente independientes entre si".

Ha: "Los medidores de flujo si se pueden describir de acuerdo al comportamiento del flujo másico trabajado ya que tanto las unidades del medidor como el flujo son significativamente dependientes entre si".

Ho: "No existe influencia en el coeficiente de descarga, pérdida de presión y recuperación de presión para los medidores de orificio y venturi con la variación del número de Reynolds y el medidor en estudio".

Ha: "Existe influencia en el coeficiente de descarga, pérdida de presión y recuperación de presión para los medidores de orificio y venturi con la variación del número de Reynolds y el medidor en estudio".

Resultados obtenidos

Análisis de variables de observación para medidores de orificio y venturi

		Coef. De descarga	
		Venturi	Orificio
NÚMERO DE REYNOLDS	11461.764	0.197	0.147
	16462.924	0.198	0.164
	22196.065	0.200	0.162
	27406.736	0.208	0.170
	32080.683	0.215	0.163
		Perd. De presión (%)	
		Venturi	Orificio
NÚMERO DE REYNOLDS	11461.764	43.330	57.110
	16462.924	28.670	43.570
	22196.065	28.420	46.830
	27406.736	15.650	47.770
	32080.683	17.800	44.620
		Recup. De presión (%)	
		Venturi	Orificio
NÚMERO DE REYNOLDS	11461.764	56.670	42.880
	16462.924	71.330	56.430
	22196.065	71.580	53.170
	27406.736	84.350	52.230
	32080.683	82.200	55.380

Análisis de las calibraciones de cada medidor de flujo

Medidor Rotámetro

Unidades del Rotámetro	Flujo másico Kg/s				
	1	2	3	4	5
55	0.0179	0.0185	0.0172	0.0185	0.0185
78	0.0250	0.0250	0.0270	0.0250	0.0256
102	0.0300	0.0294	0.0294	0.0294	0.0294
121	0.0328	0.0333	0.0328	0.0328	0.0333
140	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0352

Medidor de Ranura

Unidades del Rotámetro	Unidades del medidor mm				
	1	2	3	4	5
55	61	62	62	61	62
78	73	74	74	72	74
102	92	91	91	91	92
121	102	102	103	103	103
140	119	118	119	116	115

Medidor de vertedero

Unidades del Rotámetro	Unidades del medidor mm				
	1	2	3	4	5
55	38	37	36	38	40
78	45	44	45	45	43
102	53	54	54	54	56
121	59	58	59	59	58
140	68	66	64	68	65

Medidor venturi

Unidades del Rotámetro	Unidades del medidor mmHg				
	1	2	3	4	5
55	2	3	3	3	3
78	5	6	6	5	6
102	11	11	9	10	9
121	14	15	14	13	14
140	17	18	19	18	18

Medidor orificio

Unidades del Rotámetro	Unidades del medidor mmHg				
	1	2	3	4	5
	55	5	4.5	4	5	5
78	8	8	8	7	8
102	14	14	14	15	16
121	22	21	18	21	19
140	31	29	30	30	30

Análisis estadístico de datos**Análisis del coeficiente de descarga, salida de Minitab****ANOVA de dos factores: Coef. Desc. vs. No. Reynolds, Medidor**

Fuente	GL	SC	MC	F	P
No. Reynolds	4	0.0003984	0.0000996	3.07	0.151
Medidor	1	0.0044944	0.0044944	138.72	0.000
Error	4	0.0001296	0.0000324		
Total	9	0.0050224			

S = 0.005692 R-cuad. = 97.42% R-cuad.(ajustado) = 94.19%

De acuerdo a los valores de P se puede establecer que el factor número de Reynolds no contribuye de manera significativa al comportamiento del coeficiente de descarga, mientras que el factor medidor si influencia significativamente con los valores obtenidos. Por lo tanto se aceptan y rechazan las hipótesis respectivas.

Análisis de la pérdida de presión, salida de Minitab**ANOVA de dos factores: Perd. Presión vs. No. Reynolds, Medidor**

Fuente	GL	SC	MC	F	P
No. Reynolds	4	473.46	118.37	3.74	0.115
Medidor	1	1124.24	1124.24	35.50	0.004
Error	4	126.68	31.67		
Total	9	1724.38			

S = 5.628 R-cuad. = 92.65% R-cuad.(ajustado) = 83.47%

De acuerdo a los valores de P se puede establecer que el factor número de Reynolds no contribuye de manera significativa al comportamiento de la pérdida de presión, mientras que el factor medidor si influencia significativamente con los valores obtenidos. Por lo tanto se aceptan y rechazan las hipótesis respectivas.

Análisis de la recuperación de presión, salida de Minitab

ANOVA de dos factores: Rec. Presión vs. No. Reynolds, Medidor

Fuente	GL	SC	MC	F	P
No. Reynolds	4	473.72	118.43	3.74	0.115
Medidor	1	1124.45	1124.45	35.53	0.004
Error	4	126.61	31.65		
Total	9	1724.77			

S = 5.626 R-cuad. = 92.66% R-cuad.(ajustado) = 83.48%

De acuerdo a los valores de P se puede establecer que el factor número de Reynolds no contribuye de manera significativa al comportamiento de la recuperación de presión, mientras que el factor medidor si influencia significativamente con los valores obtenidos. Por lo tanto se aceptan y rechazan las hipótesis respectivas.

Análisis de la calibración del rotámetro, salida de Minitab

ANOVA unidireccional: Flujo másico vs. U Rot.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
U Rot.	4	0.0009411	0.0002353	918.30	0.000
Error	20	0.0000051	0.0000003		
Total	24	0.0009462			

S = 0.0005062 R-cuad. = 99.46% R-cuad.(ajustado) = 99.35%

Análisis de la calibración del medidor de ranura, salida de Minitab

ANOVA unidireccional: U. M. Ranura vs. U Rot.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
U Rot.	4	9955.04	2488.76	2488.76	0.000
Error	20	20.00	1.00		
Total	24	9975.04			

S = 1 R-cuad. = 99.80% R-cuad.(ajustado) = 99.76%

Análisis de la calibración del medidor de vertedero, salida de Minitab

ANOVA unidireccional: U. M. Vertedero vs. U Rot.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
U Rot.	4	2545.76	636.44	413.27	0.000
Error	20	30.80	1.54		
Total	24	2576.56			

S = 1.241 R-cuad. = 98.80% R-cuad.(ajustado) = 98.57%

Análisis de la calibración del medidor venturi, salida de Minitab

ANOVA unidireccional: U. M. Venturi vs. U Rot.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
U Rot.	4	755.840	188.960	377.92	0.000
Error	20	10.000	0.500		
Total	24	765.840			

S = 0.7071 R-cuad. = 98.69% R-cuad.(ajustado) = 98.43%

Análisis de la calibración del medidor orificio, salida de Minitab

ANOVA unidireccional: U. M. Orificio vs. U Rot.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
U Rot.	4	2045.360	511.340	581.07	0.000
Error	20	17.600	0.880		
Total	24	2062.960			

S = 0.9381 R-cuad. = 99.15% R-cuad.(ajustado) = 98.98%

De acuerdo al valor de P menor que 0.05, se aceptan las hipótesis alternativas.

Formulación de conclusiones

1. Los medidores de flujo sí se pueden describir de acuerdo al comportamiento del flujo másico trabajado ya que tanto las unidades del medidor como el flujo son significativamente dependientes entre si.

2. Existe influencia significativa del tipo de medidor de flujo en estudio, sobre el coeficiente de descarga, pérdida de presión y recuperación de presión para los medidores de orificio y venturi.
 3. No existe influencia significativa del número de Reynolds, sobre el coeficiente de descarga, pérdida de presión y recuperación de presión para los medidores de orificio y venturi.
-

3.2.2.3 Diseño validado propuesto para la práctica intercambiador de calor de tubos concéntricos (ICTC)

EJEMPLO 3

Descripción del problema

Definición de objetivos

Establecer el comportamiento existente entre el coeficiente de condensación para el conjunto de fluidos involucrados en el proceso de intercambio de calor en el área de calentamiento.

Así también establecer la influencia del coeficiente de transferencia de calor en los fluidos involucrados para el sistema de transferencia de calor en el área de enfriamiento.

Preguntas referentes a la investigación

1. ¿Cómo se establece el coeficiente de transferencia de calor?

R// Es necesario realizar un análisis de la cantidad de calor transferida en el sistema a partir de los perfiles de temperatura identificados, para que por medio de este valor se establezca el coeficiente total de transferencia de calor según el análisis de la ecuación de Fourier, contando con las variables respectivas del sistema.

2. ¿Cómo se establece el coeficiente de condensación?

R// Se establece mediante el análisis ecuacional de variables del sistema como los perfiles de temperatura, número de Reynolds, número de Prandtl y propiedades de los fluidos.

Justificación

Se estudiará un sistema de transferencia de calor compuesto por 8 intercambiadores de tubos concéntricos.

Esta unidad se divide en dos áreas, el área de calentamiento en donde se eleva la temperatura de un flujo específico de aceite utilizando para ello un flujo de vapor saturado de agua; y un área de enfriamiento en donde se descende la temperatura del flujo de aceite utilizando para ello agua de enfriamiento.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos se establecerá un flujo respectivo de vapor de agua o agua según sea el caso y se procederá a observar los perfiles de temperatura obtenidos a diferentes números de Reynolds de aceite y diferentes números de Prandtl del fluido aceite, y así obtener los datos de las combinaciones deseadas.

Descripción de variables involucradas

No.	VARIABLE	DISENSIONAL	FACTOR POTENCIAL DE DISEÑO		FACTORES PERTURBADORES	
			constantes	variables	controlables	de ruido
Análisis de Equipo						
1	Flujo másico de agua	m ³ /seg	X			
2	Flujo másico de aceite	m ³ /seg		X		
3	Presión E. de vapor	PSI	X			
4	Temperatura E de vapor	° C		X		
5	Temperatura E aceite	° C		X		
6	Temperatura E agua	° C		X		
7	Temperatura S de vapor	° C	X			
8	Temperatura S aceite	° C	X			
9	Temperatura S agua	° C	X			
10	Presión total del equipo	PSI				X
Análisis de Ambiente externo:						
11	Temperatura ambiente	° C				SIE
13	Presión atmosférica	atm			X	SIE
	Humedad	%				SIE

SIE: Sin mayor influencia en la experimentación objetivo.

Descripción de variables a manipular

No.	VARIABLE	DISENSIONAL	Rango De Variación
1	Flujo másico de aceite	UR	10 - 25

Selección de variables de respuesta o salida

Las variables con las cuales se establecerán los datos de interés son las lecturas realizadas en los rotámetros respectivos, termómetros ubicados en los puntos adecuados, y manómetros respectivos. De tal manera que se establezca como variable de observación el coeficiente de transferencia de calor, y el coeficiente de condensación.

Elección de diseño experimental

Diseño de tratamientos

Las condiciones o tratamientos que se evaluarán en esta unidad para el cumplimiento de los objetivos, son las características del flujo de aceite evaluadas como número de Reynolds y número de Prandtl, siendo las variables de observación el coeficiente de transferencia de calor para el área de enfriamiento y el coeficiente de condensación para el área de calentamiento.

De esta forma se logrará ver el efecto que tiene el número de Reynolds y el número de Prandtl sobre los coeficientes respectivos. Cada factor contará con 5 niveles respectivos.

Se incluirá como factor de bloqueo cada una de las observaciones respectivas de cada experimentador, así como los diferentes niveles del número de Reynolds, quedando como único tratamiento el número de Prandtl.

Diseño de control de error

Dado que los niveles de flujo son constantemente variables, se tomarán tres lecturas del dato correspondiente en cada unidad de medición tomando como valor respectivo el promedio de las lecturas realizadas.

Muestreo

De acuerdo al diseño seleccionado se cuentan con 5 niveles del factor y 5 bloques formados por los experimentadores por lo tanto se tendrán $5 \times 5 = 25$ réplicas del experimento.

Diseño de observaciones

El orden en que se realizarán las corridas y la asignación de los tratamientos será como se muestra a continuación.

		Experimentadores				
		I	II	III	IV	V
No. Reynolds	1	A	B	E	D	C
	2	D	C	A	E	B
	3	E	D	B	C	A
	4	B	E	C	A	D
	5	C	A	D	B	E

	No. Prandtl
A	1
B	2
C	3
D	4
E	5

De acuerdo al desarrollo de los incisos anteriores, se desea establecer si hay efecto sobre el coeficiente de transferencia de calor en torno a la variación del número de Reynolds y el número de Prandtl, estableciendo como factor de bloqueo las réplicas de cada combinación para cada experimentador. Por ello el diseño que mejor se adapta a la investigación es un diseño en cuadrado latino donde los factores de bloqueo son las observaciones de cada experimentador y el número de Reynolds, y el tratamiento en estudio es la variabilidad del número de Prandtl.

Diseño en cuadrado latino

		Experimentadores				
		I	II	III	IV	V
No. de Reynolds	1	A	B	E	D	C
	2	D	C	A	E	B
	3	E	D	B	C	A
	4	B	E	C	A	D
	5	C	A	D	B	E

	No. Prandtl
A	1.895
B	1.901
C	1.908
D	1.914
E	1.957

Planteamiento de hipótesis

Hipótesis científica

1. "El coeficiente de transferencia de calor y el coeficiente de condensación varía de acuerdo al incremento de la turbulencia de los fluidos".

Hipótesis estadística

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para al menos una } i$$

Ho: "El coeficiente de transferencia de calor y el coeficiente de condensación es independiente de la variación del número de Reynolds y del número de Prandtl".

Ha: "El coeficiente de transferencia de calor y el coeficiente de condensación es dependiente de la variación del número de Reynolds y del número de Prandtl".

Resultados obtenidos

Análisis de variables de observación para el calentamiento

No. Reynolds del Aceite	Coeficiente de condensación Btu/ h ft ² °F				
	Experimentador				
	1	2	3	4	5
11587.893	3.2782610	2.4022167	2.4066593	2.4109288	2.4390878
13374.116	3.3885855	2.5513434	2.5556129	2.5837719	2.5429954
14692.453	3.6280114	2.6623982	2.6905571	2.6497807	2.6536861
15988.600	3.6573439	2.7955451	2.7547686	2.7586740	2.7631166
16446.251	3.7741815	2.7918383	2.7957437	2.8001863	2.8044558

Análisis de variables de observación para el enfriamiento

No. Reynolds del Aceite	Coeficiente de transferencia de calor Btu/ h ft ² °F				
	Experimentador				
	1	2	3	4	5
11587.893	5.182137	6.3681961	6.373595	6.3787837	6.4130044
13374.116	5.4684406	7.0880844	7.093273	7.1274937	7.0756168
14692.453	5.782544	7.6206078	7.6548285	7.6029515	7.6100202
15988.600	5.8502506	8.1732873	8.1214104	8.128479	8.133878
16446.251	6.0062908	8.3044708	8.3115394	8.3169383	8.322127

Análisis estadístico de datos

Análisis del sistema de calentamiento, salida de Minitab

Modelo lineal general: Ut vs. Bloques, No. Re, No. Pr

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Bloques	fijo	5	1, 2, 3, 4, 5
No. Re	fijo	5	11587.9, 13374.1, 14692.5, 15988.6, 16446.3
No. Pr	fijo	5	A, B, C, D, E

ANOVA: Coef. Condensación. vs. No. Prandtl, No. Reynolds, Bloques

Fuente	GL	SC	MC	F	P
No. Prandtl	4	0.0105492	0.0026373	5.07	0.012
No. Reynolds	4	0.5521928	0.1380482		
Bloques	4	3.2732649	0.8183162		
Error	12	0.0062452	0.0005204		
Total	24	3.8422520			

S = 0.4056 R-cuad. = 14.37% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

Análisis del sistema de enfriamiento, salida de Minitab

Modelo lineal general: Ut vs. Bloques, No. Re, No. Pr

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Bloques	fijo	5	1, 2, 3, 4, 5
No. Re	fijo	5	11587.9, 13374.1, 14692.5, 15988.6, 16446.3
No. Pr	fijo	5	A, B, C, D, E

ANOVA: Coef. Transferencia de Calor. vs. No. Prandtl, No. Reynolds, Bloques

Fuente	GL	SC	MC	F	P
No. Prandtl	4	0.1347635	0.0336908	3.55	0.03
No. Reynolds	4	9.7187273	2.4296818		
Bloques	4	13.734387	3.4335966		
Error	12	0.5692194	0.0094869		
Total	24	24.157097			

S = 0.8497 R-cuad. = 40.23% R-cuad.(ajustado) = 28.28%

De acuerdo a los valores de P se puede establecer que el factor número de Reynolds y número de Prandtl contribuye de manera significativa al comportamiento del coeficiente de condensación y al coeficiente de transferencia de calor. Por lo tanto se aceptan y rechazan las hipótesis respectivas.

Formulación de conclusiones

1. El coeficiente de transferencia de calor y el coeficiente de condensación es dependiente de la variación del número de Reynolds y del número de Prandtl.
-

3.2.2.4 Diseño validado propuesto para la práctica bomba centrífuga (BC)

EJEMPLO 4

Descripción del problema

Definición de objetivos

Conocer el comportamiento de las variables que describen las curvas características de un sistema de flujo impulsado por una bomba centrífuga de potencia variable.

Preguntas referentes a la investigación

1. ¿Cuáles son las variables que describen las curvas características de una bomba?

R// Carga desarrollada, potencia de bomba, eficiencia y cabeza de succión positiva.

2. ¿Cómo se establece la carga desarrollada?

R// Se establece mediante la comparación de la carga de succión y la carga de descarga, las cuales son variables directamente observadas en manómetros respectivos.

3. ¿Cómo se establece la potencia?

R// Se establece mediante la comparación de la carga de succión y la carga de descarga.

4. ¿Cómo se establecen la eficiencia de una bomba centrífuga?

R// Se establece mediante la comparación entre la potencia proporcionada al fluido por la bomba y la potencia eléctrica que se dirige a la bomba.

5. ¿Cómo se establecen la cabeza de succión positiva de la bomba centrífuga?

R// Se establece mediante un balance de energía mecánica dentro de la unidad experimental, considerando parámetros como la presión de vapor, atmosférica, cabeza de fricción y alturas respectivas.

Justificación

Para lograr los objetivos planteados se utilizará un sistema que comprende una bomba centrífuga dispuesta de un reóstato que permite controlar la potencia de la bomba. Se analizará la unidad experimental a distintos flujos máscicos controlados por la potencia de la bomba con el objeto de establecer las curvas características a distintos flujos máscicos. La potencia otorgada por la bomba se variará mediante un reóstato que permite establecer RPM específicas para la bomba, logrando así las distintas potencias de la bomba.

Descripción de variables involucradas

No.	VARIABLE	DISENSIONAL	FACTOR POTENCIAL DE DISEÑO		FACTORES PERTURBADORES	
			constantes	variables	controlables	de ruido
Análisis de Equipo						
1	Presión de succión	PSI		X		
2	RPM	RPM		X		
3	Lectura de reóstato			X		
4	Presión de descarga	PSI		X		
5	Flujo máscico de agua	Kg./s		X		
6	Temperatura del fluido	° C	X			
Análisis de Ambiente externo:						
7	Temperatura ambiente	° C				X
8	Presión atmosférica	atm				X
9	Humedad	%				SIE

SIE: Sin mayor influencia en la experimentación objetivo.

Descripción de variables a manipular

No.	VARIABLE	DISENSIONAL	Rango De Variación
1	Lectura de reóstato		30 - 100

Selección de variables de respuesta o salida

Las variables con las cuales se establecerán los datos de interés son las lecturas realizadas en los instrumentos de medición de en los instrumentos de medición de masa, tiempo, flujo másico, manómetros diferenciales, dinamómetro, voltímetro, tacómetro. De tal manera que se establezcan las variables que describen las curvas características de una bomba, eficiencia, potencia desarrollada, NPSH, carga desarrollada.

Elección de diseño experimental

Diseño de tratamientos

Las condiciones o tratamientos que se evaluarán en esta unidad para el cumplimiento de los objetivos, son los diferentes flujos másicos, siendo el dato de interés u observación el NPSH, potencia de freno, carga desarrollada, y eficiencia. El tratamiento de interés es el flujo másico el cual tendrá 5 niveles diferentes.

Diseño de control de error

Para el procesamiento de datos de instrumentos de medición tales como lecturas en el tacómetro, reóstato, vacuómetro, dinamómetro y manómetros diferenciales se realizarán 5 corridas diferentes para el mismo tratamiento situadas como bloques, así como 3 lecturas de cada corrida, tomando el promedio de estas.

Muestreo

Se desea rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza de 95% y se espera un error en los resultados menor de 20%.

También se desea que al menos el 75% de los datos sean aceptados como correctos o certeros.

$$n = \frac{z^2 pq}{e^2}$$

$$z = nc + \alpha/2 \quad \alpha = 1 - 0.95 = 0.05$$

$$z = 0.95 + 0.05/2 = 0.975$$

$$n = \frac{(0.975)^2 (0.75)(0.25)}{(0.20)^2} = 4.45 \approx 5$$

Son necesarias 5 réplicas del experimento.

Diseño de observaciones

Para eliminar cualquier afección causada por factores externos a la unidad experimental cada una de las réplicas del experimento serán realizadas en orden completamente aleatorizado, por lo tanto se tendrá:

Caudal	Corrida (bloques)				
	I	II	III	IV	V
1	8	9	16	11	2
2	13	19	21	6	7
3	17	4	1	15	20
4	22	12	10	24	25
5	3	5	18	23	14

De acuerdo al desarrollo de los incisos anteriores, se desea establecer si hay diferencia significativa en los datos observados para cada tratamiento de comparación, pero se eliminará cualquier imprecisión en cada corrida bloqueándolas como corridas por cada experimentador. Por ello el diseño que mejor se adapta a la investigación es un diseño en bloques completamente al azar.

Planteamiento de hipótesis

Hipótesis científica

1. "En general puede afirmarse que en la bomba centrífuga del experimento, la eficiencia de la misma disminuye a medida que se aumenta el flujo másico"

Hipótesis estadística

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para al menos una } i$$

Ho: "No existe diferencia significativa en el NPSH, la potencia de freno, la carga desarrollada y la eficiencia para el sistema de bombeo en estudio, es decir estas variables son independientes del flujo másico".

Ha: "Existe diferencia significativa en el NPSH, la potencia de freno, la carga desarrollada y la eficiencia para el sistema de bombeo en estudio, es decir estas variables son dependientes del flujo másico".

Resultados obtenidos

Análisis de potencia de freno

CAUDAL ft ³ /s	Potencia de freno (HP)				
	I	II	III	IV	V
0.028	12.798	10.125	11.235	8.034	9.417
0.034	19.603	20.248	18.891	23.568	22.589
0.039	27.965	30.241	25.154	20.536	24.165
0.046	36.809	35.243	32.021	34.025	38.479
0.054	50.317	55.891	45.235	50.144	53.145
0.060	62.550	60.451	59.478	65.021	64.236

Análisis de eficiencias

CAUDAL ft ³ /s	Eficiencia (%)				
	I	II	III	IV	V
0.028	50.753	49.893	49.127	51.691	52.328
0.034	55.898	52.369	52.124	52.369	56.234
0.039	51.174	55.289	50.326	48.697	49.875
0.046	56.864	58.691	54.128	55.146	57.269
0.054	73.277	70.169	75.189	72.699	77.215
0.059	71.367	70.496	72.369	74.892	65.025

Análisis de NPSH

CAUDAL ft ³ /s	NPSH				
	I	II	III	IV	V
0.028	25.72096	26.33061	25.96482	26.08675	26.08675
0.034	24.98938	24.50166	25.11131	25.47710	24.74552
0.039	24.37973	23.64815	24.25780	24.62359	24.01394
0.046	23.52622	23.28236	23.77008	24.01394	23.28236
0.054	22.55078	21.81920	22.18499	22.30692	21.94113
0.059	21.94113	19.86832	20.35604	21.81920	19.38060

Carga desarrollada

Caudal ft ³ /s	Experimentador (lb/ft ²)				
	I	II	III	IV	V
0.028	0.042	0.048	0.045	0.032	0.041
0.034	0.059	0.060	0.064	0.064	0.059
0.039	0.077	0.089	0.071	0.085	0.072
0.046	0.109	0.122	0.102	0.106	0.109
0.054	0.132	0.136	0.128	0.125	0.131
0.059	0.134	0.130	0.136	0.140	0.132

Análisis estadístico de datos

Análisis de potencia de freno, salida de Minitab

ANOVA de dos factores: P. F. vs. Caudal, Bloque

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Caudal	5	9463.13	1892.63	264.29	0.000
Bloque	4	51.24	12.81		
Error	20	143.23	7.16		
Total	29	9657.59			

S = 2.676 R-cuad. = 98.52% R-cuad.(ajustado) = 97.85%

Análisis de eficiencias, salida de Minitab

ANOVA de dos factores: Ef vs. Caudal, Bloque

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Caudal	5	2598.45	519.691	74.29	0.000
Bloque	4	3.62	0.906		
Error	20	139.91	6.996		
Total	29	2741.99			

S = 2.645 R-cuad. = 94.90% R-cuad.(ajustado) = 92.60%

Análisis de NPSH, salida de Minitab

ANOVA de dos factores: NPSH vs. Caudal, Bloque

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Caudal	5	93.941	18.7882	89.04	0.000
Bloque	4	3.160	0.7899		
Error	20	4.220	0.2110		
Total	29	101.321			

S = 0.4594 R-cuad. = 95.83% R-cuad.(ajustado) = 93.96%

Análisis de carga desarrollada, salida de Minitab

ANOVA de dos factores: H vs. Caudal, Bloque

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Caudal	5	0.0362123	0.0072425	244.10	0.000
Bloque	4	0.0001850	0.0000462		
Error	20	0.0005934	0.0000297		
Total	29	0.0369907			

S = 0.005447 R-cuad. = 98.40% R-cuad.(ajustado) = 97.67%

De acuerdo a los valores de P se puede establecer que el factor caudal si contribuye de manera significativa al comportamiento de la potencia de freno, eficiencia, recuperación de presión, NPSH y carga desarrollada. Por lo tanto se aceptan y rechazan las hipótesis respectivas.

Formulación de conclusiones

1. Existe diferencia significativa en el NPSH, la potencia de freno, la carga desarrollada y la eficiencia para el sistema de bombeo en estudio, es decir estas variables son dependientes del flujo másico.
-

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Siendo el diseño experimental una de las disciplinas más importantes y fundamentales al momento de cualquier investigación experimental, resulta de drástica importancia su inclusión en el ámbito de la Ingeniería Química, una disciplina que basa la obtención del conocimiento en la experimentación propiamente dicha. Surge entonces la aspiración de poder introducir al estudiante de la carrera de Ingeniería Química al conocimiento y aplicación del diseño experimental.

Con la presente investigación se procuró desarrollar los contenidos teóricos acerca del diseño experimental que son funcionales en la carrera de Ingeniería Química, para ello se introdujo una metodología para la utilización del diseño experimental en el área de operaciones unitarias con el objeto de dictar las directrices que hacen aplicable el diseño experimental en cualquier área de la carrera de Ingeniería Química; de tal manera que el conocimiento de esta disciplina fue fijado y perfeccionado para beneficio de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química.

Inicialmente se trabajó con la población total de estudiantes del curso de laboratorio de Ingeniería Química I, compuesta por el 59% de mujeres y 41% de hombres, a quienes se les indujo en la metodología para poder incluir el diseño experimental en las experimentaciones del laboratorio.

Una vez ejecutado el programa se logró evaluar cada uno de los diferentes conocimientos adquiridos por parte de los estudiantes, así también se revelaron las perspectivas que los estudiantes obtuvieron luego de adentrarse al conocimiento del diseño experimental y descubrir las consecuencias de su utilización, previo a la experimentación.

Con la culminación del programa desarrollado, claramente se puede observar una mejor apreciación del diseño experimental por parte de los estudiantes que ejecutaron la metodología, apreciación que se puede evaluar principalmente en el descubrimiento de beneficios en los datos experimentales obtenidos; beneficios que son claramente marcados y que otorgan a las investigaciones experimentales una mayor fundamentación de los datos obtenidos y por ende, mayor fundamentación de las conclusiones postuladas. Esto es comprobado principalmente con la evaluación realizada por los encargados del curso, cuya apreciación radica en el mejoramiento de la fundamentación de las conclusiones formuladas por los estudiantes luego de la inclusión de un diseño experimental previo, postulación que puede evaluarse mediante el análisis de los gráficos presentados.

En la Figura 25 se puede observar que 93% de los estudiantes que ejecutaron el programa así como el 100% de los encargados del curso, notaron la existencia de una serie de beneficios obtenidos luego de haber incluido el diseño experimental en las prácticas internas desarrolladas. Así también en la Figura 23 se observa que más del 85% de la población de estudiantes evaluaron como necesaria la inclusión del diseño experimental en la carrera de Ingeniería Química, apreciación que fue evaluada de la misma manera por parte de los encargados del curso, tanto catedrático como auxiliar.

De acuerdo a la apreciación anterior, el estudiante de Ingeniería Química debe poseer la capacidad necesaria para realizar cualquier diseño experimental relacionado con la Ingeniería Química, esta apreciación puede ser evaluada en la Figura 24 en donde tanto el 93% de los estudiantes como el 100% de los encargados del curso, la consideraron como necesaria.

Finalmente la adquisición de mayor fundamento en los datos experimentales derivados de investigaciones avaladas con diseños experimentales previos así como el mayor fundamento de las conclusiones postuladas, se puede evaluar correctamente con el análisis de la Figura 26 y Figura 27, el alto porcentaje de aprobación (80% de los estudiantes y 100% de los encargados del curso) así como la apreciación satisfactoria realizada por parte de los encargados del curso, fundamentan la aseveración. De acuerdo a esto se pudo establecer los parámetros metodológicos que rigen al diseño experimental en la Ingeniería Química, que son válidos al conjunto de experimentaciones llevadas a cabo a lo largo de la carrera.

Respecto a la evaluación del conocimiento adquirido por parte de los estudiantes, se puede afirmar que este ha mejorado notoriamente; ya que antes de iniciar el programa metodológico de esta investigación los estudiantes del curso tenían un nivel muy bajo de conocimiento acerca del diseño experimental y su aplicación. Sin embargo al concluir con el programa el conocimiento mejoró tal como se puede observar en las Figuras 28 y 32. El aumento de este conocimiento radica principalmente en que más del 60% de los estudiantes aprendieron a ejecutar correctamente el diseño experimental y mejoraron el conocimiento de los diseños experimentales clásicos, apreciaciones que también fueron evaluadas como correctas por los encargados del curso.

De acuerdo a la evaluación de los diseños experimentales ejecutados por los estudiantes, se puede observar un progreso notorio de la calificación de los mismos a lo largo de las practicas ejecutadas tal como se señala en la tablas I y II en donde inicialmente los diseños ejecutados por un grupo determinado no eran evaluados como aceptables, sino hasta prácticas posteriores en donde la evaluación mejoró.

En lo que respecta a la metodología que fue desarrollada para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación puede catalogarse como efectiva, evaluación que puede fundamentarse de acuerdo a la Figura 34 en donde más del 85% de la población que ejecutó el programa la evaluaron como efectiva. Por lo tanto, la metodología descrita en esta investigación permitirá que el estudiante de Ingeniería Química cuente con un documento que podrá adentrarlo al conocimiento del diseño experimental, que le permitirá ser capaz de realizar diseños experimentales previos a la experimentación contribuyendo a mejorar el aprendizaje, la obtención de resultados más representativos y la postulación de conclusiones bien fundamentadas.

CONCLUSIONES

1. El diseño experimental debe ser aplicado en la carrera de Ingeniería Química, ya que con este se otorgan resultados más consistentes y de mayor significación, capaces de servir de buen fundamento para la formulación de conclusiones en la investigación experimental.
2. El conjunto de parámetros metodológicos que rigen el diseño experimental en la Ingeniería Química se ven reflejados en los beneficios generados en su utilización, beneficios que fueron mejor apreciados por parte de los estudiantes que ejecutaron la metodología, evaluados principalmente en el mejoramiento del aprendizaje, mayor fundamentación de los datos obtenidos y por ende, mayor fundamentación de las conclusiones postuladas.
3. Con la elaboración de diseños experimentales de prácticas de laboratorio, se logró mejorar notoriamente el conocimiento de los estudiantes del curso, radicando principalmente en que más del 60% de los estudiantes aprendieron a ejecutar correctamente el diseño experimental y mejoraron el conocimiento de los diseños experimentales clásicos.

4. Mediante la propuesta de diseños experimentales previamente validados, se logró establecer un parámetro de demostración para la ejecución de diseños experimentales en la Ingeniería Química.

5. La metodología descrita en esta investigación, permitió que el estudiante de Ingeniería Química contara con las bases suficientes para adentrarlo al conocimiento del diseño experimental, perfeccionar la utilización del mismo y generación de las expectativas para la utilización del diseño experimental en la carrera de Ingeniería Química.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario el desarrollo de un curso de diseño experimental en el currículo de estudios de la carrera de Ingeniería Química, que prepare a los estudiantes de Ingeniería Química para realizar cualquier diseño experimental aplicable en la investigación científica de carácter físico y químico, el análisis y control de calidad, investigaciones experimentales de laboratorio, investigaciones de planta piloto y cualquier investigación experimental de Ingeniería Química.
2. Cada uno de los diferentes laboratorios de la carrera de Ingeniería Química deberían exigir los diseños experimentales de cada experimentación realizada, de modo que el estudiante de Ingeniería Química encuentre familiarización de las implicaciones satisfactorias obtenidas con la utilización del mismo en diferentes áreas de la carrera.
3. De no ser factible la apertura de un curso acerca del diseño experimental dentro del pensum de estudios, es necesario realizar una inducción a los estudiantes acerca del diseño experimental en cada área de la carrera de Ingeniería Química, inducción que cubra lecciones magistrales con las cuales se abarquen los fundamentos teóricos necesarios, y resolución de casos de aplicación como ejemplos, para lograr la correcta aplicación del diseño experimental en los respectivos laboratorios.

4. Es necesaria la actualización tecnológica entorno a la aplicación del diseño experimental, de modo que el estudiante de la carrera de Ingeniería Química sea capaz de utilizar software computacionales que permitan la realización del diseño experimental de forma mas sencilla.

5. El estudiante de Ingeniería Química debe poner mayor interés acerca del conocimiento y aplicación del diseño experimental, interés que obtendrá únicamente si descubre los beneficios implicados con su utilización.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

1. Montgomery Douglas. **Diseño y análisis de experimentos.** (Segunda Edición. México: Editorial Limusa Wiley, 2007) pp 1 – 59
2. Box G.E.P. y K.G. Wilson. **On the experimental attainment of Optimum conditions.** (Volumen 13. Estados Unidos de América: Journal of the royal statistical society) pp 1 – 45.
3. Fisher, R.A. **El diseño de experimentos.** (Octava Edición. Nueva York: Hafner Publishing Company) pp 23 – 40.
4. Castro, Luís. **Diseño Experimental sin Estadística.** (Primera Edición. México: Editorial Trillas, 1975) pp 75 – 80.
5. Beltrán, Anna. **El experimento científico.**
<http://www.monografias.com/trabajos43/experimento-cientifico/experimento-cientifico.shtml> (4 abril 2002.)
6. Universidad Nacional de Colombia. **Diseños experimentales.**
http://normalista.ilce.edu.mx/normalista/r_n_plan_prog/primaria/5semes/2org.htm (10 marzo 2008.)
7. Roberto Hernández Sampieri y otros. **Metodología de la investigación.** (México: McGraw-Hill, 1998) pp 124 - 142
8. Monzón García Samuel Alfredo. **Introducción al proceso de la investigación científica.** (Tercera edición, Guatemala: Editorial Oscar de León, 2003) pp 80 - 103

BIBLIOGRAFÍA

1. Brioso Díez, Ángeles y otros. **Diseños Experimentales y Diseños Cuasi experimentales.** (Segunda Edición. España: Editorial IMPRESA GETAFE, 1997).
2. Chen Hong, Christina Yun-Ju El método de diseño experimental Taguchi y el método de diseño experimental de Fisher, una comparación. Aplicación a la reacción de saponificación. Trabajo de graduación Ing. Qca. Guatemala, Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1993.
3. Cochran, W:G. y G.M Cox. **Diseños experimentales.** (Segunda edición. Nueva York: Wiley, 2000).
4. González Campos, Maribel. **La experimentación científica.** <http://es.wikipedia.org/wiki/Experimentaci%C3%B3n.html> (4 sep 2008).
5. Little, M. Thomas y F. Jackson Hills. **Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura.** (Primera Edición. México: Editorial Trillas, 1987).
6. Monzón García Samuel Alfredo. **Introducción al proceso de la investigación científica.** (Tercera edición, Guatemala: Editorial Oscar de León, 2003).
7. Ostle, Bernard. **Estadística aplicada.** (México: Editorial Limusa-Wiley, S. A, 1973).

Paquetes computacionales

Minitab 15.1.20.0. © 2007 Minitab Inc.

APÉNDICE

A	Instrumentos de evaluación, calificación y comparación de diseños experimentales en la carrera de Ingeniería Química	137
B	Cuestionario de evaluación de la metodología desarrollada por el tesista, formas DE-A y DE-E	143
C	Ecuaciones para el desarrollo de análisis de varianza y tabla de puntos porcentuales de la distribución F	147
D	Curvas de operación característica para el establecimiento de número de réplicas.	157
E	Diagrama del procedimiento para iniciar trabajo de graduación en la carrera de Ingeniería Química	165

Hoja de Evaluación

DISEÑO EXPERIMENTAL

TESISTA: MENPHIS REYES M.

GRUPO:

PRÁCTICA:

FECHA:

ASPECTOS Y FACTORES CONSIDERADOS

1. EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

	PONDERACIÓN
1.1 Utiliza la metodología propuesta en la elaboración del informe de diseño experimental	<input type="text"/>
1.2 Desarrolla correctamente en el diseño experimental cada una de las etapas correspondientes	<input type="text"/>
1.3 Aplica correctamente la metodología a la experimentación objetivo	<input type="text"/>
1.4 Las hipótesis de trabajo son consistentes para la formulación de conclusiones	<input type="text"/>

CONCLUSIÓN:

ACEPTABLE

DEFICIENTE

TOTAL

2. EVALUACIÓN DE LA NATURALEZA DE LA INVESTIGACIÓN

	PONDERACIÓN
2.1 Utiliza los objetivos correspondientes a la experimentación	<input type="text"/>
2.2 Evalúa las restricciones de la naturaleza de la unidad experimental	<input type="text"/>

CONCLUSIÓN:

ACEPTABLE

DEFICIENTE

TOTAL

3. DISEÑO EXPERIMENTAL PROPIAMENTE DICHO

	PONDERACIÓN
3.1 El diseño experimental permite el cumplimiento de los objetivos de forma directa o indirecta	<input type="text"/>
3.2 El diseño experimental presenta características de factibilidad (funcionalidad, eficiencia, costo)	<input type="text"/>
1.3 El análisis estadístico planteado permite la comprobación de las hipótesis	<input type="text"/>

CONCLUSIÓN:

ACEPTABLE

DEFICIENTE

TOTAL

CONCLUSIÓN FINAL:

ACEPTABLE

DEFICIENTE

PRÁCTICA:

ASPECTOS Y FACTORES CONSIDERADOS

1. CAPACIDAD INFORMATIVA

1.1 El diseño experimental permite obtener suficiente información útil para el cumplimiento de los objetivos experimentales

PONDERACIÓN

1.2 El diseño experimental permite realizar todas las comparaciones posibles de la información recabada o analizada

1.3 El diseño experimental permite realizar la cantidad de observaciones estadísticas necesarias para mejorar la precisión de los datos obtenidos

CONCLUSIÓN:

ACEPTABLE

DEFICIENTE

TOTAL:

2. COSTO

2.1 Para la colección de los datos respectivos en necesario el consumo de pequeñas cantidades de recursos cuantificables (tiempo, material experimental, dinero)

PONDERACIÓN

2.2 Únicamente toma en cuenta la evaluación de las condiciones que generan información útil, obviando las condiciones que no generan información útil.

2.3 El procedimiento experimental seleccionado para recabar los datos requeridos en el diseño experimental requieren poco esfuerzo físico y económico

CONCLUSIÓN:

ACEPTABLE

DEFICIENTE

TOTAL:

3. PODER

3.1 Este diseño genera por el mismo costo mayor cantidad de información útil

PONDERACIÓN

CONCLUSIÓN:

ACEPTABLE

DEFICIENTE

TOTAL:

4. RESTRICCIONES METODOLÓGICAS

4.1 La metodología del diseño experimental seleccionado, toma en cuenta todas aquellas limitaciones tales como uso de factores y niveles, comparaciones entre tratamientos, replicabilidad

PONDERACIÓN

4.2 El diseño experimental se adapta a las condiciones requeridas en la experimentación.

CONCLUSIÓN:

ACEPTABLE

DEFICIENTE

TOTAL:

5. RESTRICCIONES PRÁCTICAS

5.1 El diseño experimental permite realizar los análisis estadísticos necesarios para la comprobación de las hipótesis de trabajo

PONDERACIÓN

CONCLUSIÓN:

ACEPTABLE

DEFICIENTE

TOTAL:

6. PROPÓSITO

6.1 Este diseño experimental permite contestar las preguntas de la investigación realizada es decir no solo permita establecer comparaciones paradójicas.

PONDERACIÓN

CONCLUSIÓN:

ACEPTABLE

DEFICIENTE

TOTAL:

7. EFECTO DE LA ESTADÍSTICA

7.1 En este diseño no existe violación de que las suposiciones estadísticas en la que se basa un diseño específico, es decir todas las suposiciones estadísticas son válidas para esta situación en particular

PONDERACIÓN

CONCLUSIÓN:

ACEPTABLE

DEFICIENTE

TOTAL:

CONCLUSIÓN FINAL:

ACEPTADO

RECHAZADO

SEXO: (M) (F)

FORMA: DE-E

CUESTIONARIO

INSTRUCCIONES: Conteste cada una de las siguientes preguntas con la mayor certeza posible, seleccionando la opción que crea que es la más adecuada.

1 ¿Cuál era su conocimiento del diseño experimental antes de la iniciación del programa por parte del tesista?

Sin idea Poco Moderado Amplio

2 ¿Cuál es su conocimiento actual del diseño experimental?

Sin idea Poco Moderado Amplio

3 ¿Conoce qué beneficios le trae la utilización del diseño experimental en sus experimentaciones?

Si No

4 ¿Conoce el procedimiento para realizar un diseño experimental?

Sin idea Poco Moderado Amplio

5 ¿Conoce los diseños experimentales clásicos?

Sin idea Poco Moderado Amplio

6 ¿Cree usted que los datos experimentales tendrían el mismo fundamento con o sin un diseño experimental previo?

Si No

7 ¿Considera usted que es necesario el diseño de experimentos en la ingeniería química?

Si No

8 ¿Cree que el estudiante de ingeniería química debe ser capaz de realizar cualquier diseño experimental ?

Si No

9 ¿Cree que la metodología utilizada por el tesista le ha ayudado a comprender mejor el tema?

Si No

10 ¿Cómo cree que podría mejorar su conocimiento del diseño experimental?

CUESTIONARIO

INSTRUCCIONES: Conteste cada una de las siguientes preguntas con la mayor certeza posible, seleccionando la opción que crea que es la más adecuada.

- 1 ¿En qué nivel considera que los estudiantes han mejorado su conocimiento acerca del diseño de experimentos?

Sin idea Poco Moderado Amplio
- 2 ¿Considera que los estudiantes han aplicado correctamente el diseño de experimentos a las prácticas de laboratorio de IQ-1?

Sin idea Poco Moderado Amplio
- 3 ¿Cree que se han obtenido beneficios en las experimentaciones de los estudiantes ahora que han aplicado el diseño experimental?

Si No
- 4 ¿Ha mejorado el fundamento de las conclusiones formuladas por los estudiantes?

Sin idea Poco Moderado Amplio
- 5 ¿Considera que debería plantearse un curso de diseño experimental dentro del pensum de estudios del ingeniero químico?

Si No
- 6 ¿Cree usted que los datos experimentales tendrían el mismo fundamento con o sin un diseño experimental previo?

Si No
- 7 ¿Considera usted que es necesario el diseño de experimentos en la ingeniería química?

Si No
- 8 ¿Cree que el estudiante de ingeniería química debe ser capaz de realizar cualquier diseño experimental ?

Si No
- 9 ¿Cree que la metodología utilizada por el tesista le ha ayudado a comprender mejor el tema?

Si No
- 10 ¿Cómo cree que podría mejorar su conocimiento del diseño experimental?

Tabla de análisis de varianza para el modelo con un solo factor y efectos fijos, balanceado

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamientos	$SS_{Tratamientos} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \bar{y}_i^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$a - 1$	$MS_{Tratamientos} = \frac{SS_{Tratamientos}}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E}$
Error	$SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos}$	$N - a$	$MS_E = \frac{SS_E}{N - a}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$N - 1$		

147

Tabla de análisis de varianza para el modelo con un solo factor y efectos fijos, no balanceado

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamientos	$SS_{Tratamientos} = \sum_{i=1}^a \frac{\bar{y}_i^2}{n_i} - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$a - 1$	$MS_{Tratamientos} = \frac{SS_{Tratamientos}}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E}$
Error	$SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos}$	$N - a$	$MS_E = \frac{SS_E}{N - a}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$N - 1$		

Tabla de análisis de varianza de un modelo de bloques completos aleatorizados

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamientos	$SS_{Tratamientos} = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^a \bar{y}_i^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$a - 1$	$MS_{Tratamientos} = \frac{SS_{Tratamientos}}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E}$
Bloques	$SS_{Bloques} = \frac{1}{a} \sum_{j=1}^b \bar{y}_j^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$b - 1$	$MS_{Bloques} = \frac{SS_{Bloques}}{b - 1}$	
Error	$SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos} - SS_{Bloques}$	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{(a - 1)(b - 1)}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{N}$	$N - 1$		

Tabla de análisis de varianza del diseño cuadrado latino

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamientos	$SS_{Tratamientos} = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \bar{y}_j^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$p - 1$	$MS_{Tratamientos} = \frac{SS_{Tratamientos}}{p - 1}$	$F_0 = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E}$
Renglones	$SS_{Renglones} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \bar{y}_i^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$p - 1$	$MS_{Renglones} = \frac{SS_{Renglones}}{p - 1}$	
Columnas	$SS_{Columnas} = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \bar{y}_k^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$p - 1$	$MS_{Renglones} = \frac{SS_{Columnas}}{p - 1}$	
Error	$SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos} - SS_{Renglones} - SS_{Columnas}$	$(p - 2)(p - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{(p - 2)(p - 1)}$	
Total	$SS_T = \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{N}$	$p^2 - 1$	p	

Tabla de análisis de varianza del diseño cuadrado latino con réplicas

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamientos	$SS_{Tratamientos} = \frac{1}{np} \sum_{j=1}^p \bar{y}_j^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$p - 1$	$\frac{SS_{Tratamientos}}{p - 1}$	$\frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E}$
Renglones	$SS_{Renglones} = \frac{1}{np} \sum_{k=1}^p \bar{y}_i^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$p - 1$	$\frac{SS_{Renglones}}{p - 1}$	
Columnas	$SS_{Columnas} = \frac{1}{np} \sum_{j=1}^p \bar{y}_k^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$p - 1$	$\frac{SS_{Columnas}}{p - 1}$	
Réplicas	$SS_{Réplicas} = \frac{1}{p^2} \sum_{l=1}^n \bar{y}_l^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$n - 1$	$\frac{SS_{Réplicas}}{n - 1}$	
Error	$SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos} - SS_{Renglones} - SS_{Columnas} - SS_{Réplicas}$	$(p - 1)[n(p + 1) - 3]$	$\frac{SS_E}{(p - 1)[n(p + 1) - 3]}$	
Total	$SS_T = \sum \sum \sum \sum y_{ijkl}^2 - \frac{y_{...}^2}{N}$	$np^2 - 1$		

Tabla de análisis de varianza del diseño cuadrado grecolatino

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad
Tratamientos letras latinas	$SS = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \bar{y}_j^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$p - 1$
Tratamientos letras griegas	$SS = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \bar{y}_k^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$p - 1$
Renglones	$SS_{Renglones} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \bar{y}_i^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$p - 1$
Columnas	$SS_{Columnas} = \frac{1}{p} \sum_{l=1}^p \bar{y}_l^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$p - 1$
Error	SS_E (por sustracción)	$(p - 3)(p - 1)$
Total	$SS_T = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l y_{ijkl}^2 - \frac{y_{...}^2}{N}$	$p^2 - 1$

Tabla de análisis de varianza de bloques incompletos

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamientos (ajustados)	$\frac{k \sum Q_i^2}{\lambda a}$	$a - 1$	$\frac{SS_{Tratamientos}}{a - 1}$	$\frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E}$
Bloques	$\frac{1}{k} \sum_{k=1}^p \bar{y}_j^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	$b - 1$	$\frac{SS_{Bloques}}{b - 1}$	
Error	SS_E (por sustracción)	$N - a - b + 1$	$\frac{SS_E}{N - a - b + 1}$	
Total	$SS_T = \sum \sum y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{N}$	$N - 1$		

Tabla de análisis de varianza del diseño factorial de dos factores

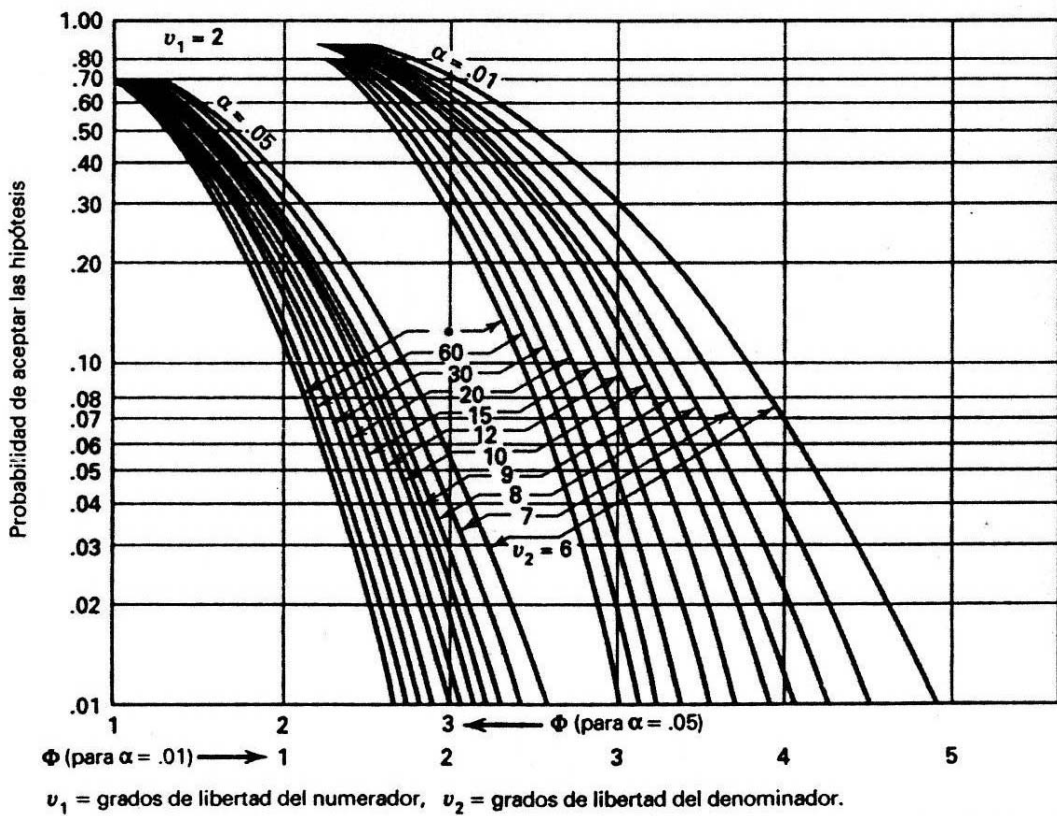
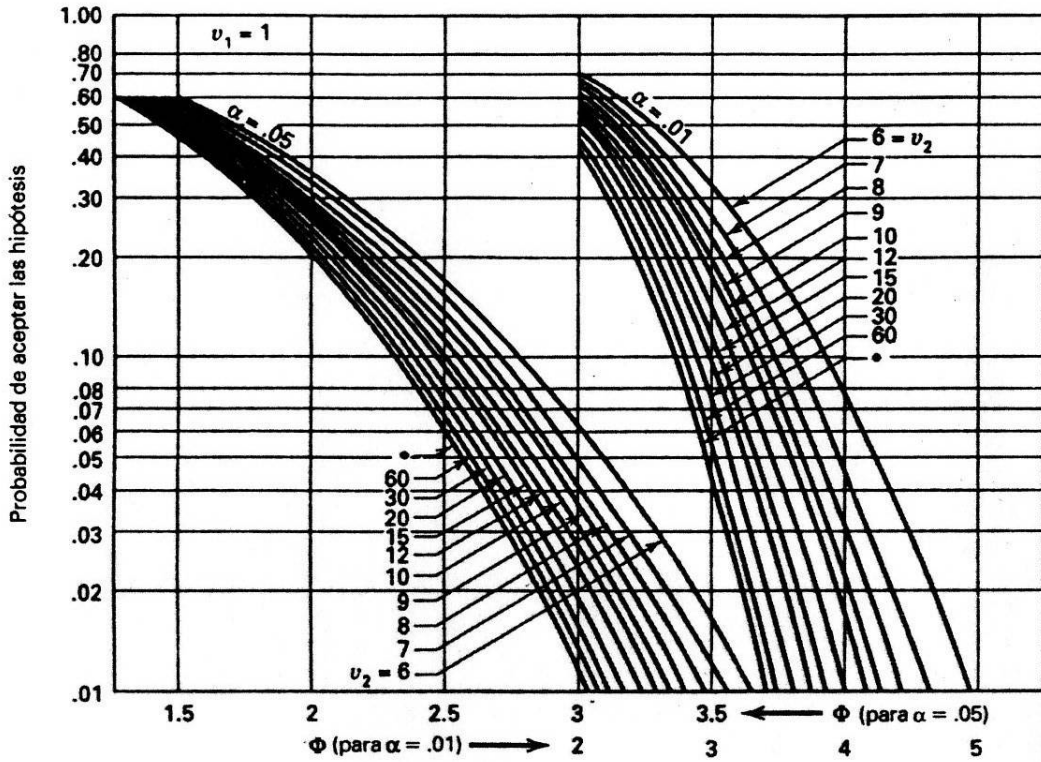
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamientos A	$\frac{1}{bn} \sum_{k=1}^a \bar{y}_j^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{abn}$	$a - 1$	$\frac{SS_A}{a - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Tratamientos B	$\frac{1}{an} \sum_{k=1}^b \bar{y}_j^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{abn}$	$b - 1$	$\frac{SS_B}{b - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Interacción	$SS_E = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^a \sum_{j=1}^b \bar{y}_{ij}^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B$	$(a - 1)(b - 1)$	$\frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E (por sustracción)	$ab(n - 1)$	$\frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$	$abn - 1$		

Tabla de puntos porcentuales de la distribución F para $\alpha = 0.05$

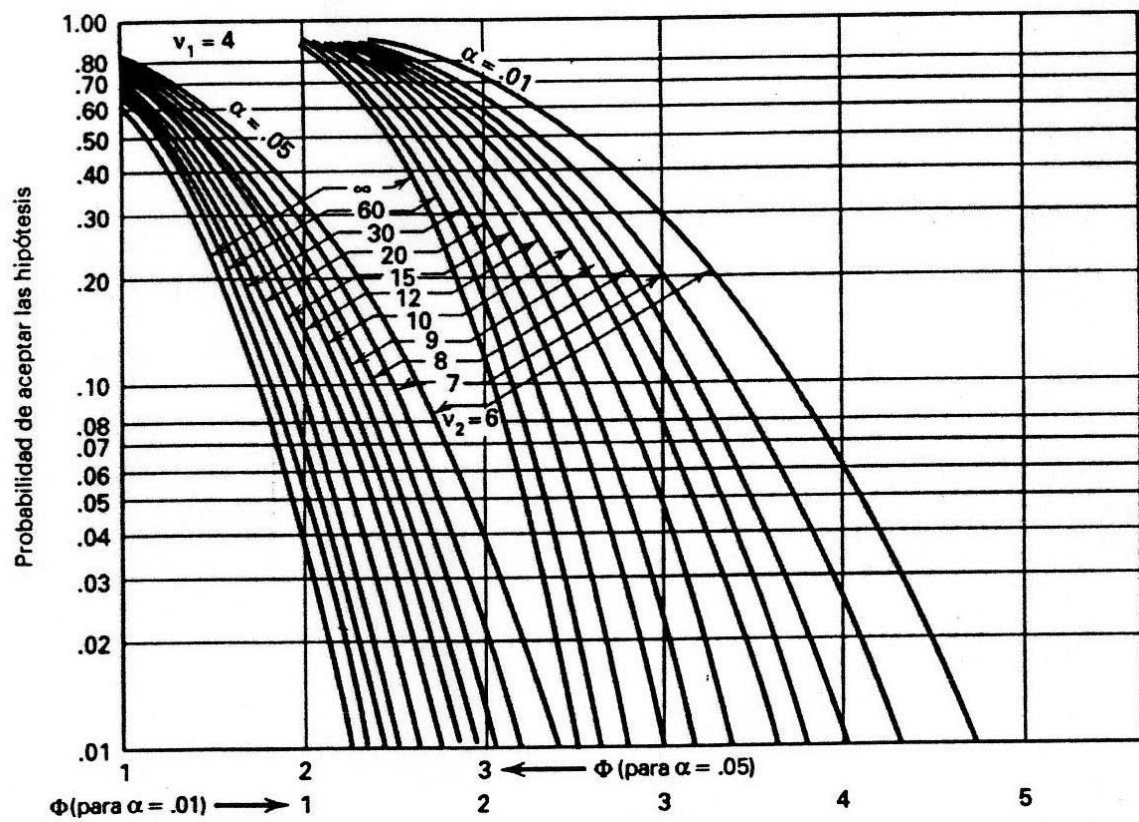
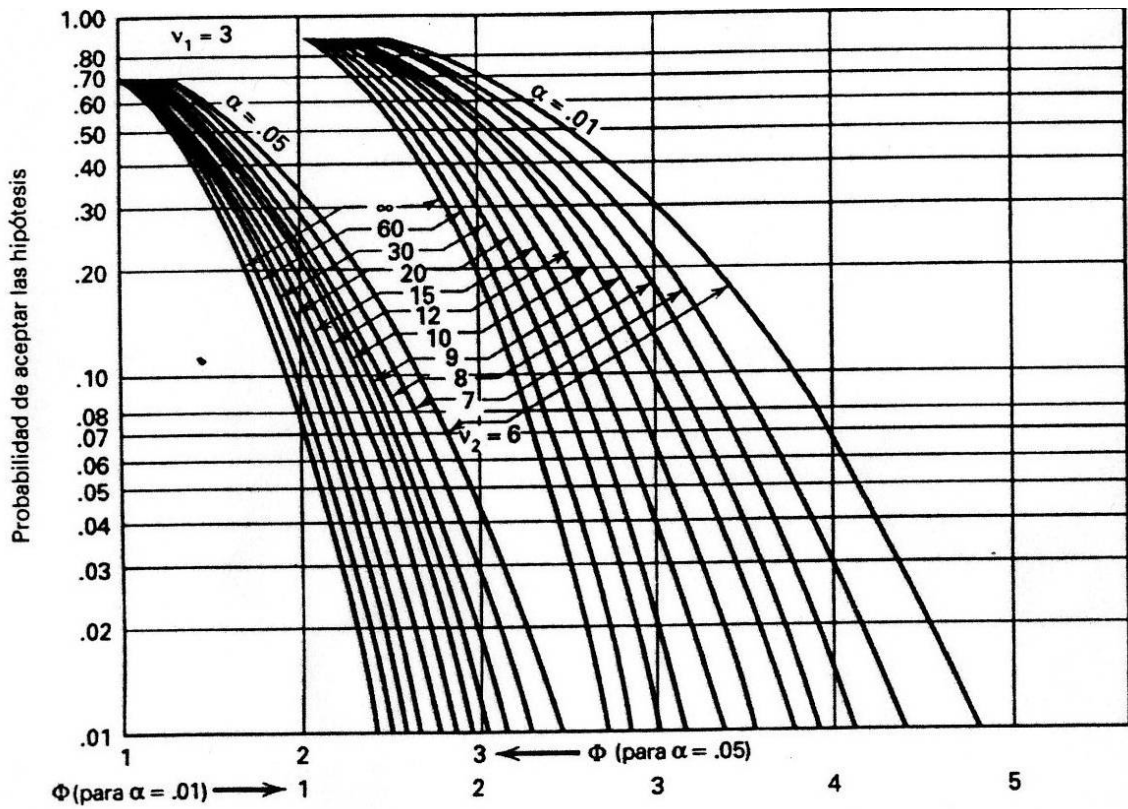
ν_2	ν_1	Grados de libertad del numerador (ν_1)																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
Grados de libertad del denominador (ν_2)	2	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
	3	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
	4	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
	5	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
	6	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
	7	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
	8	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
	9	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
	10	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
	11	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
	12	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
	13	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
	14	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
	15	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
	16	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
	17	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
	18	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
	19	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
	20	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
	21	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
	22	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
	23	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
	24	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
	25	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
	26	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
	27	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
	28	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
	29	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
	30	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
40	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	
60	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	
120	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39	
∞	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.55	1.43	1.35	1.25	
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00	

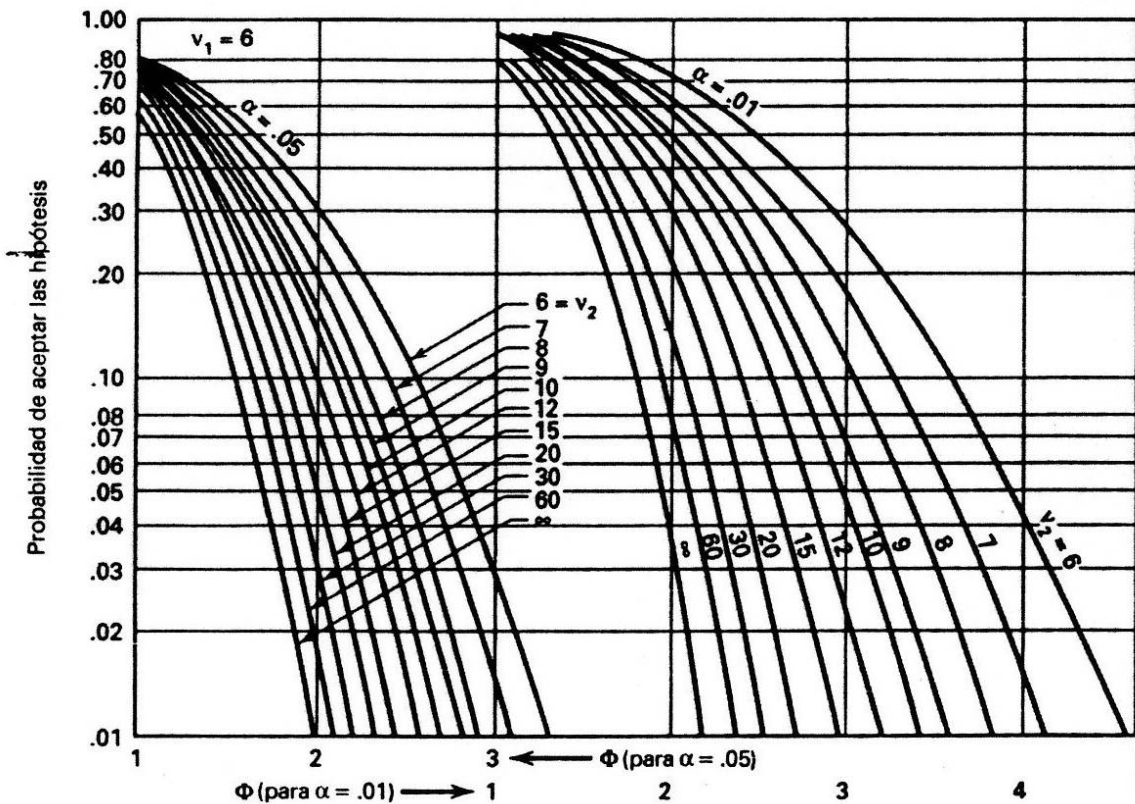
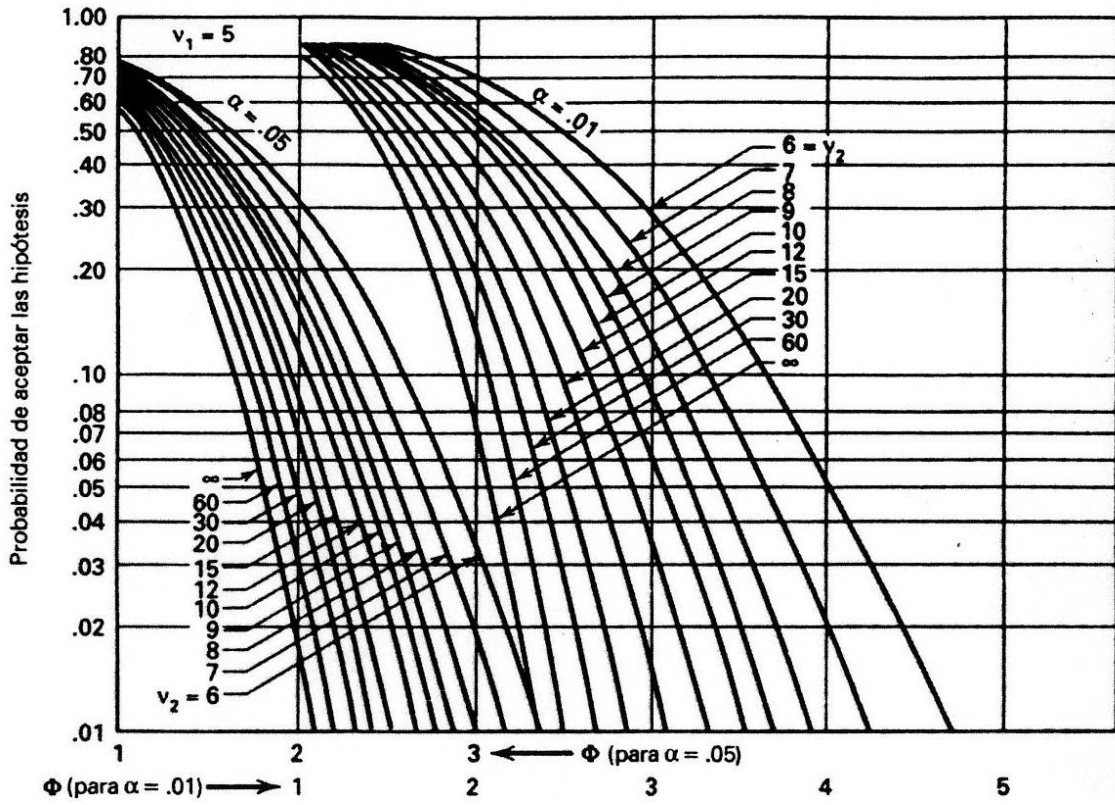
Curvas de operación características para el análisis de varianza con efectos fijos

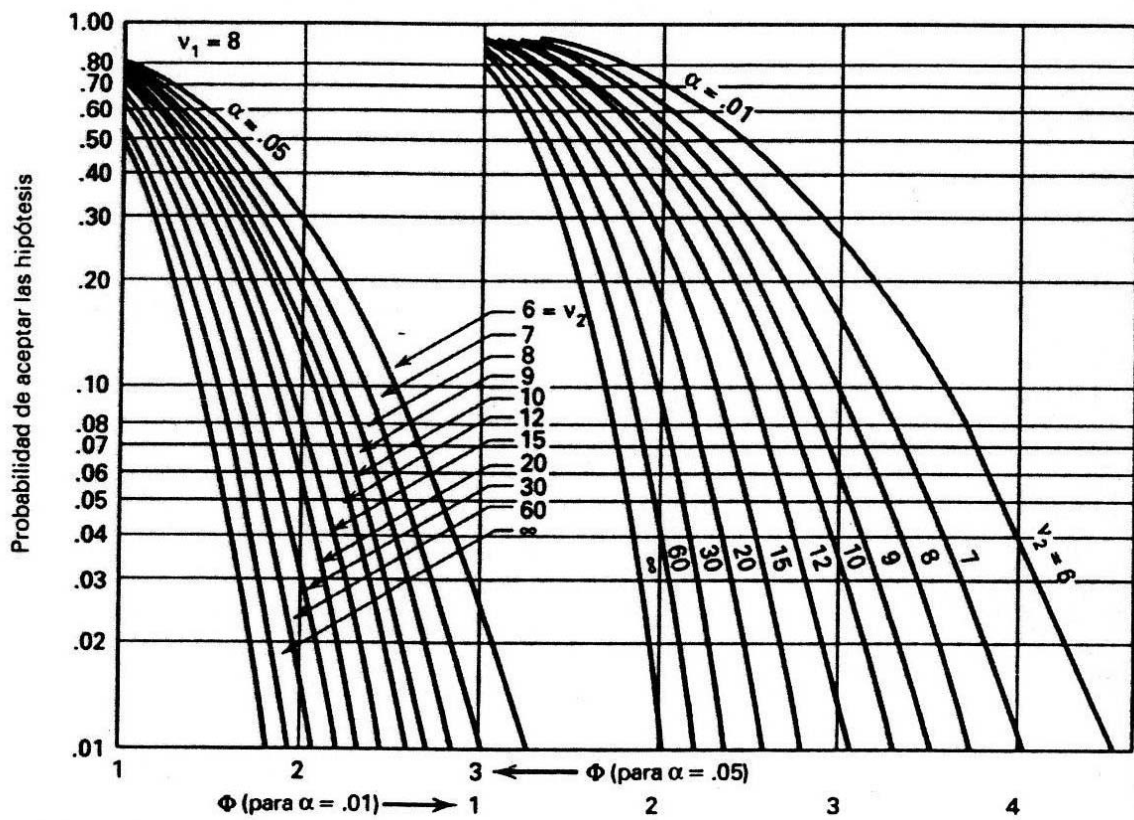
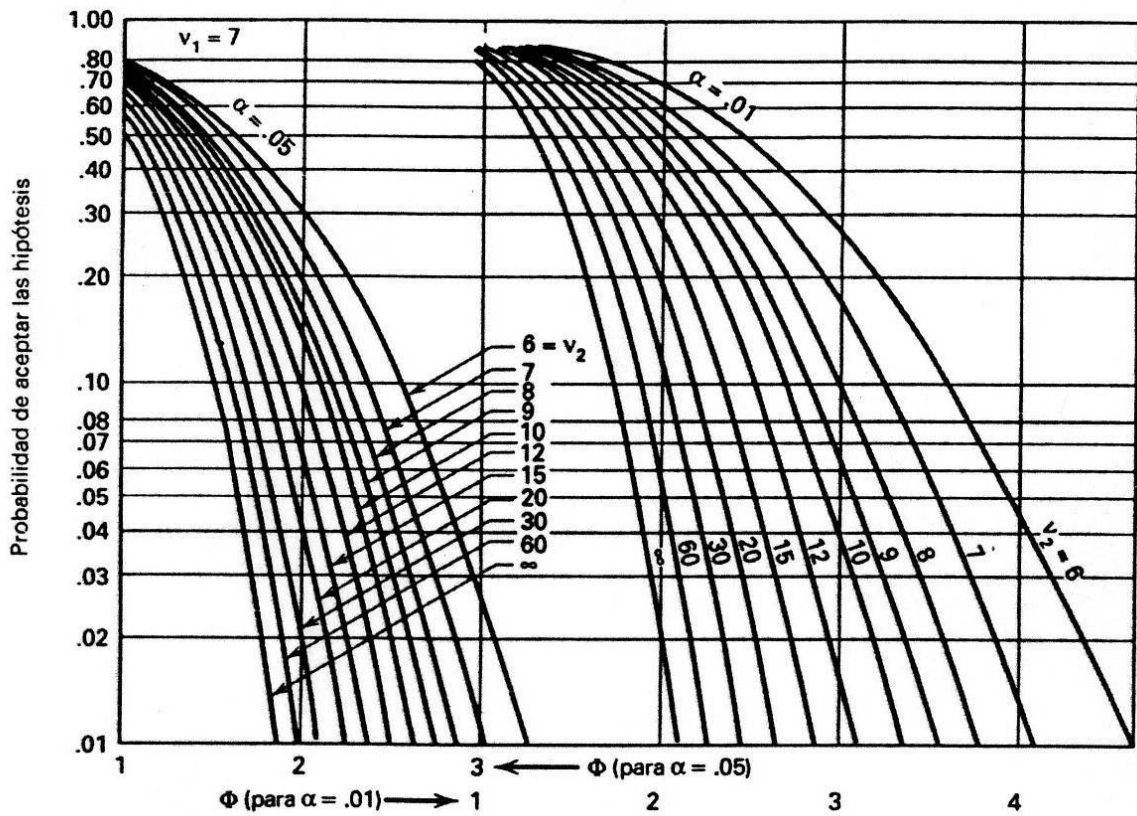
Extraído de Montgomery Douglas. Diseño y análisis de experimentos. (Segunda Edición. México: Editorial Limusa Wiley, 2007. Apéndice V)



v_1 = grados de libertad del numerador, v_2 = grados de libertad del denominador.

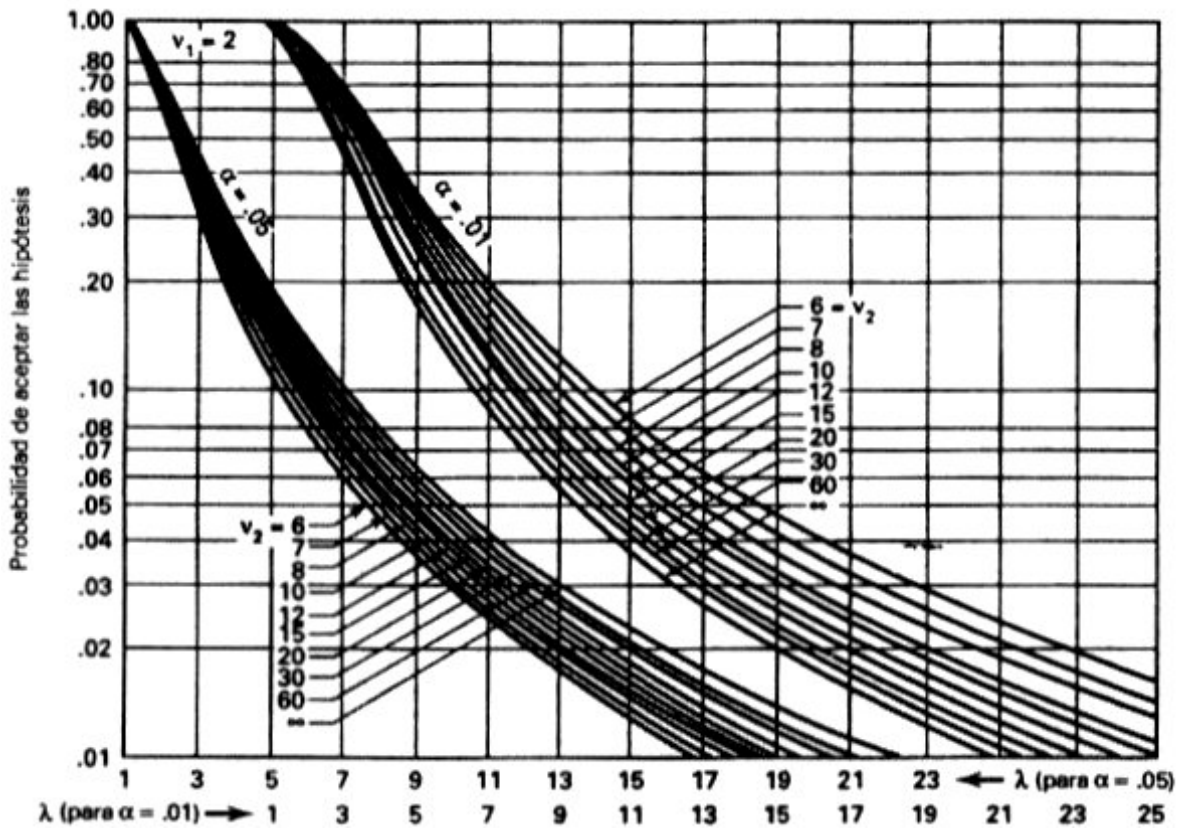
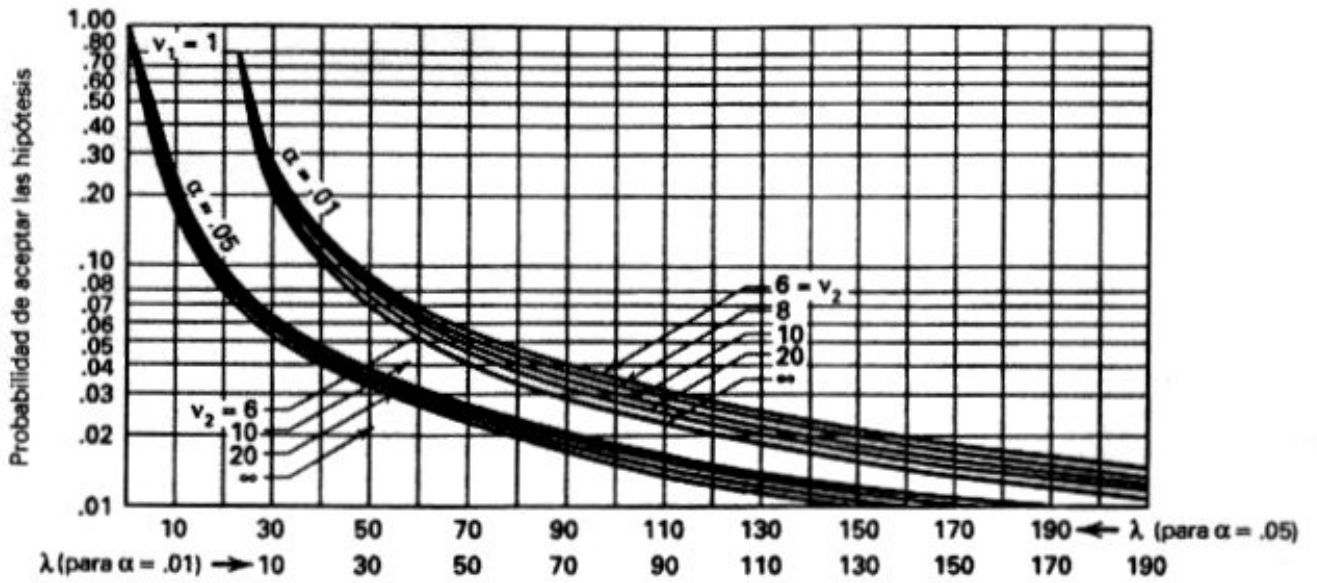


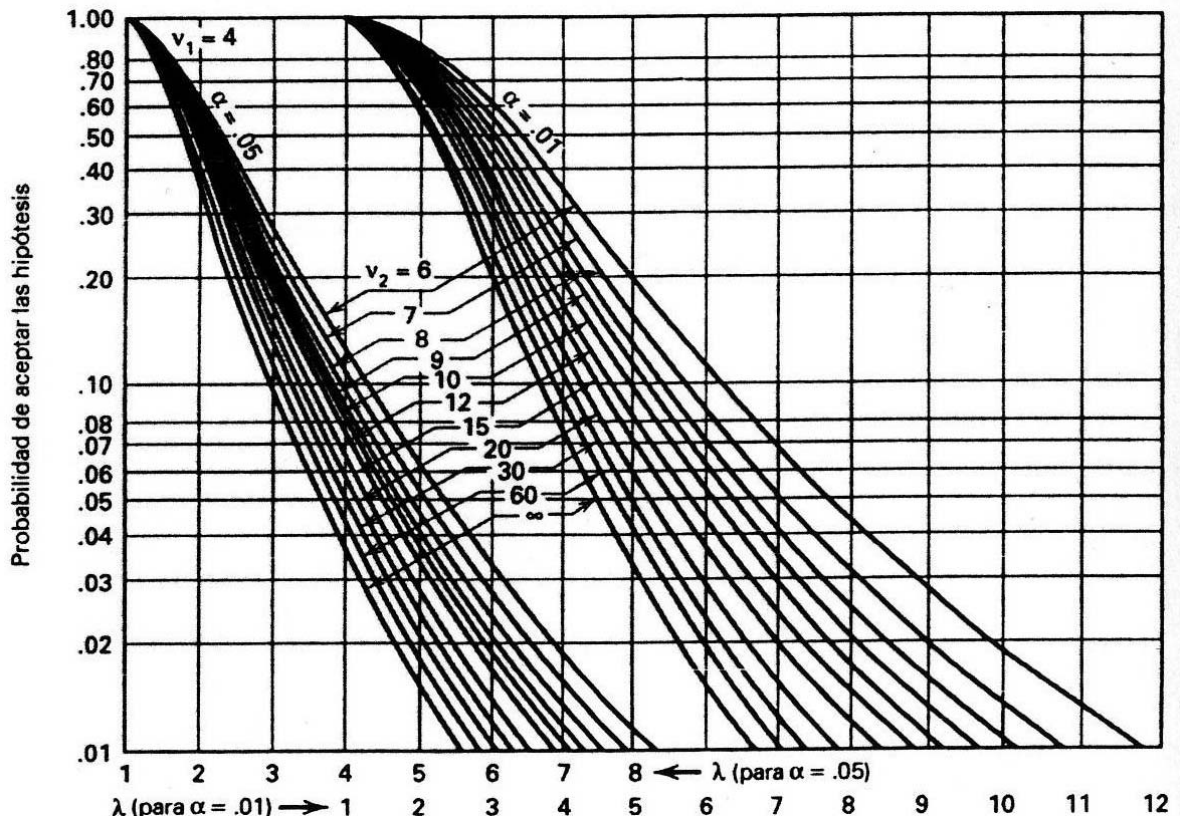
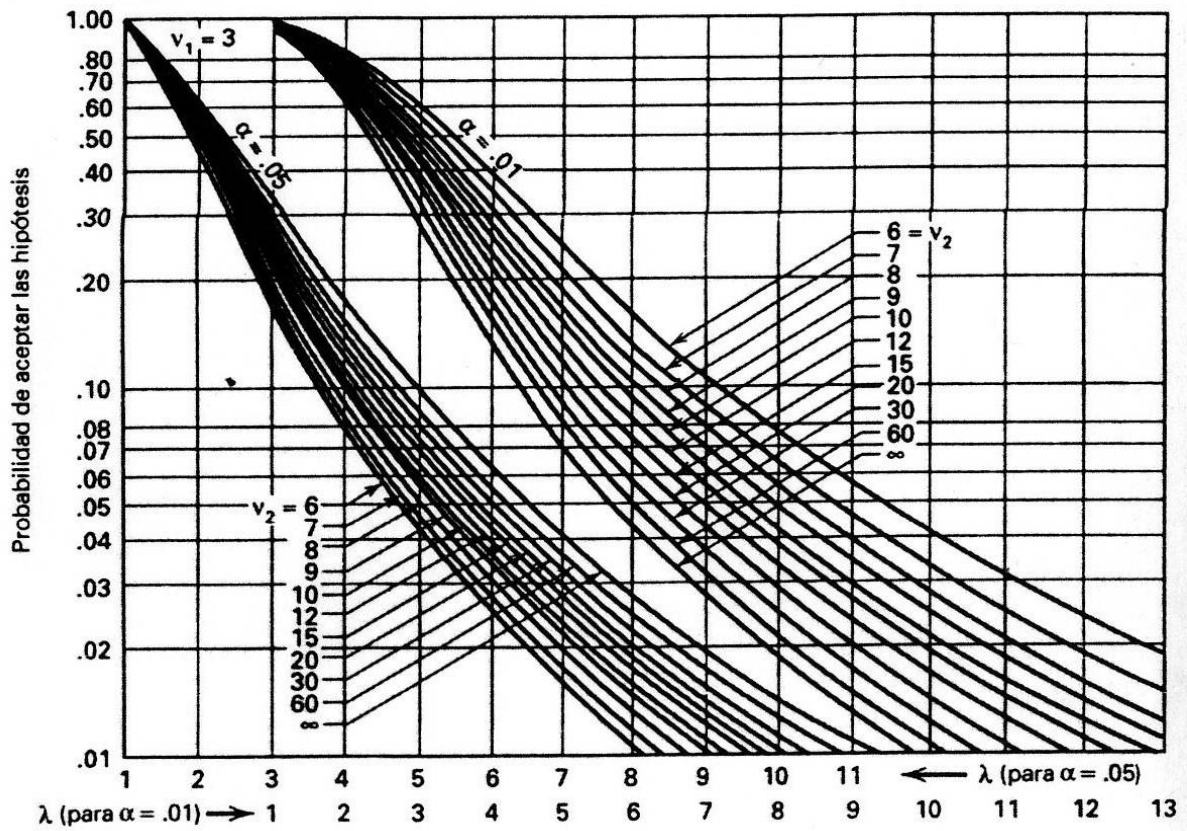


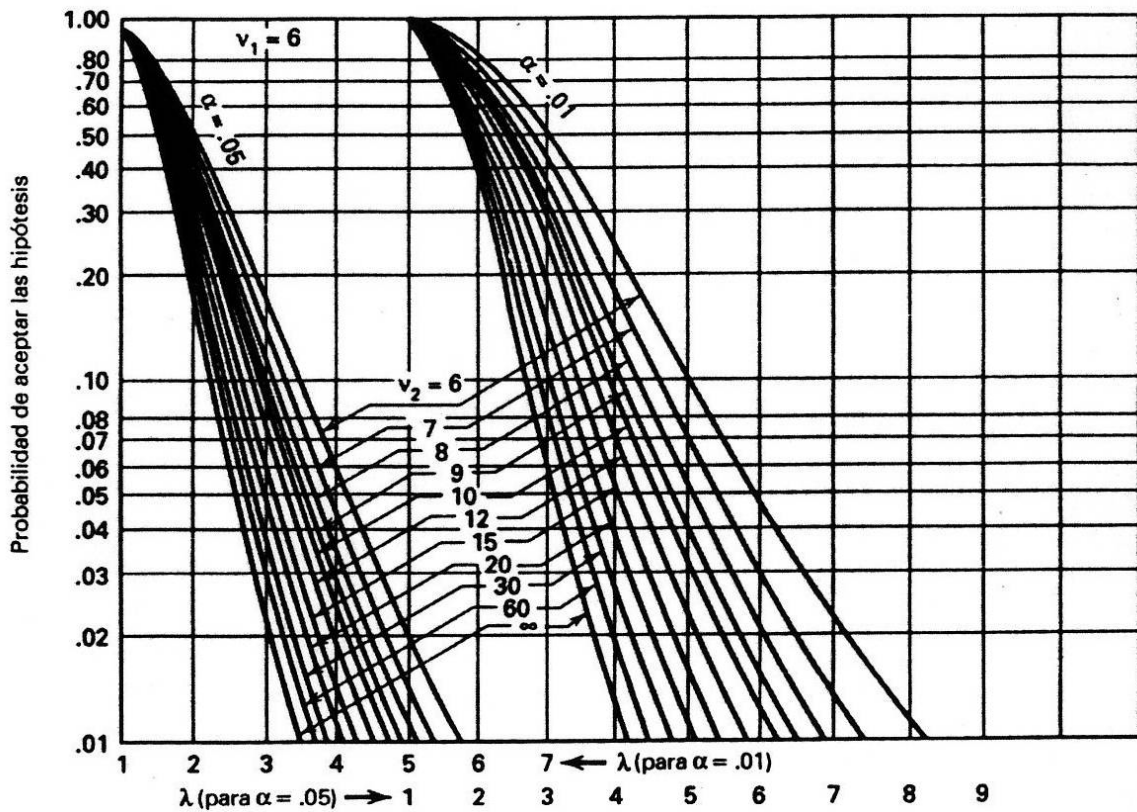
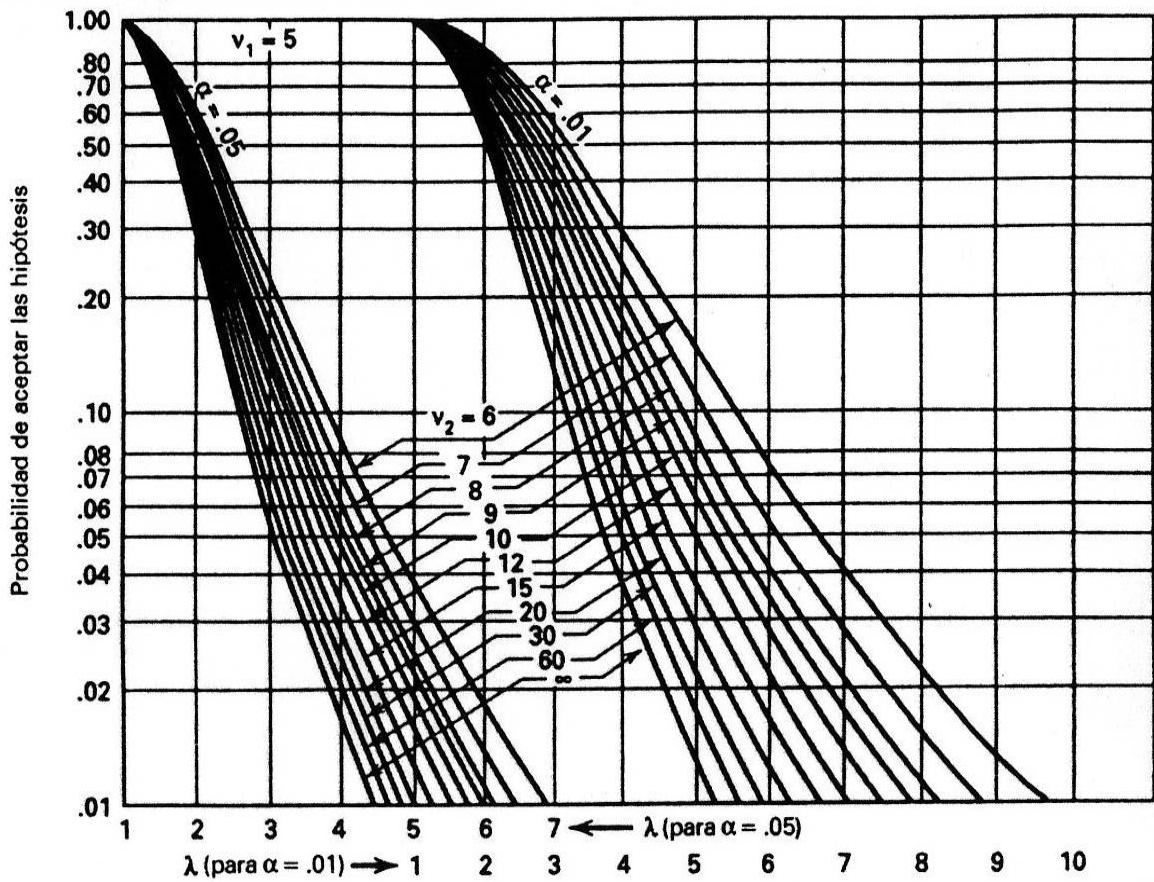


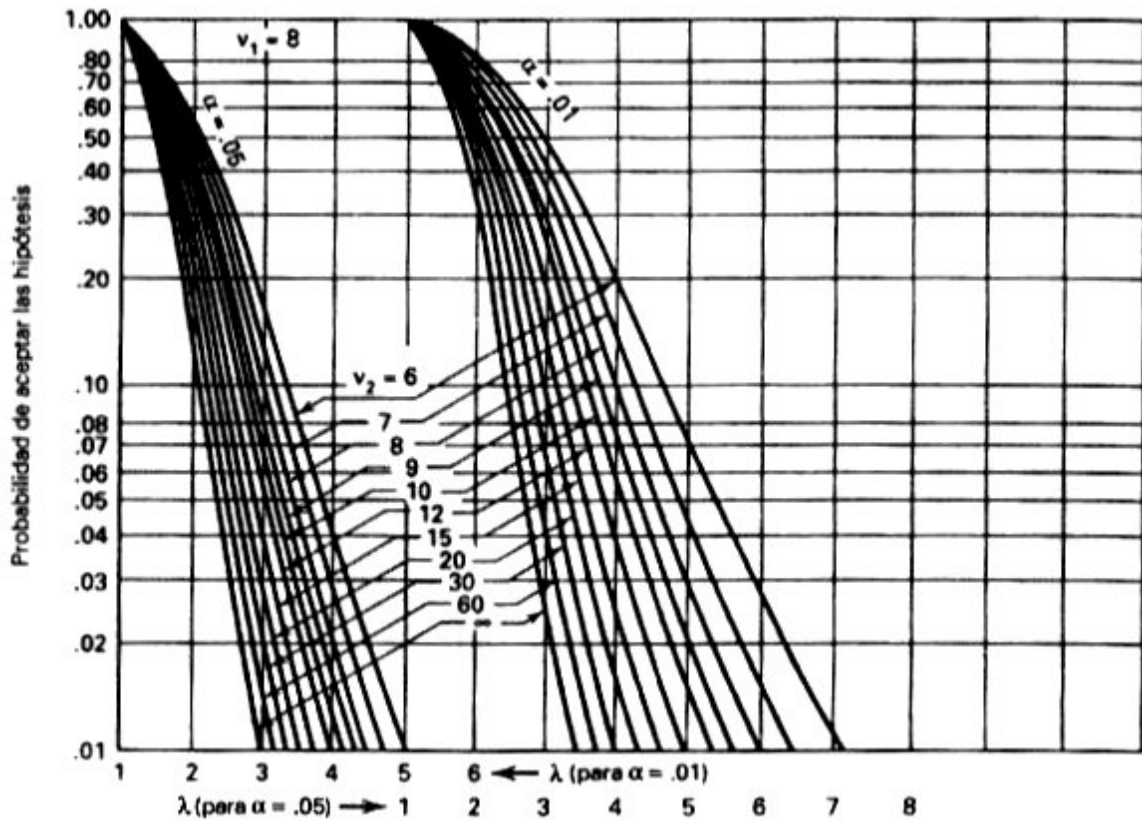
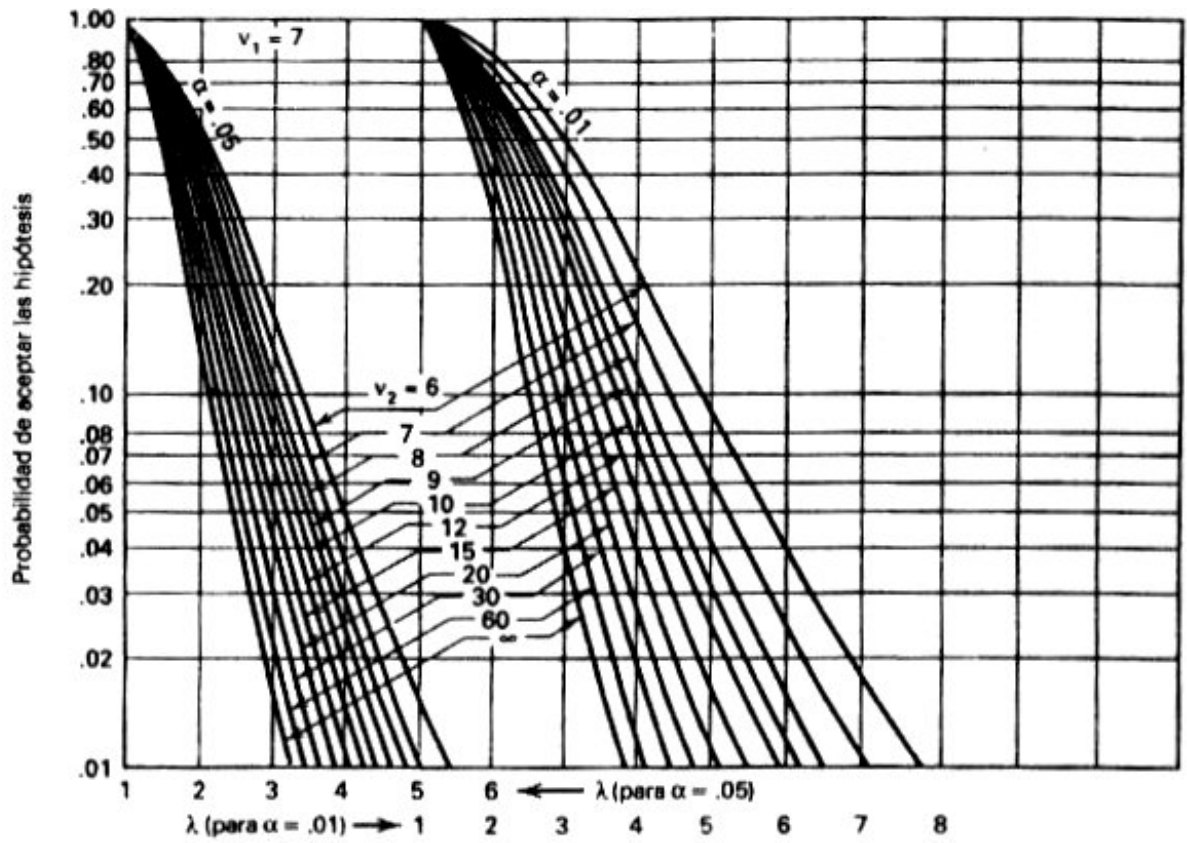
Curvas de operación características para el análisis de varianza con efectos aleatorios

Extraído de Montgomery Douglas. Diseño y análisis de experimentos. (Segunda Edición. México: Editorial Limusa Wiley, 2007. Apéndice V)

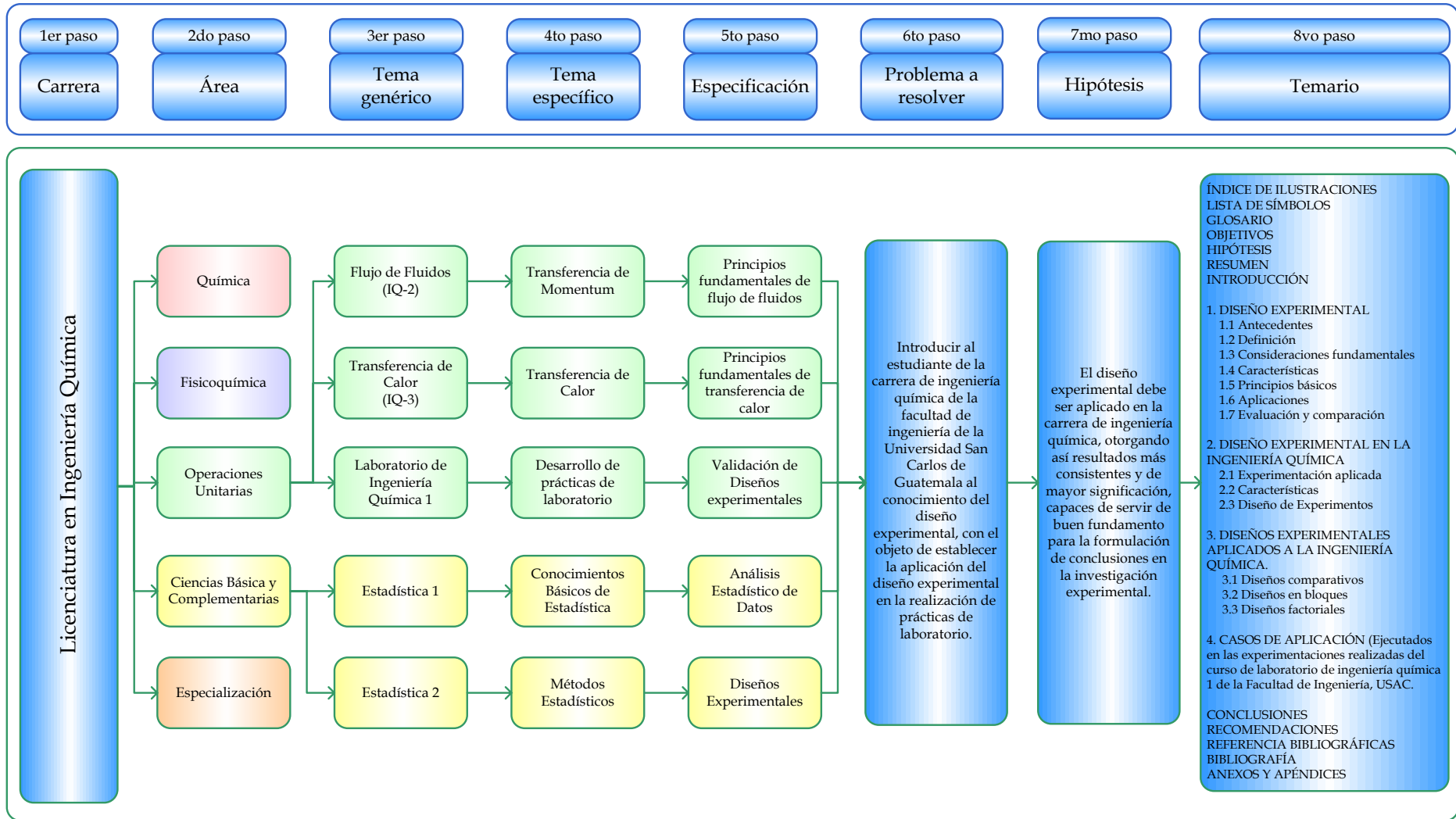








“APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN EL DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS INTERNAS EN EL ÁREA DE OPERACIONES UNITARIAS”
Diagrama del procedimiento para iniciar trabajo de graduación en la carrera de ingeniería química.



Fuente: Escuela de Ingeniería Química, USAC.