

Facultad de  
Ingenierías  
Físico  
Mecánicas



Escuela de Ingenierías  
Eléctrica, Electrónica y  
Telecomunicaciones



---

Trabajo de Grado

## **DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN EL ÁREA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Autora:**

**LUISA MARCELA PINEDA TRIANA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**2009**

Facultad de  
Ingenierías  
Físico  
Mecánicas



Escuela de Ingenierías  
Eléctrica, Electrónica y  
Telecomunicaciones



Trabajo de Grado

## **DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN EL ÁREA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Autora: LUISA MARCELA PINEDA TRIANA**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA  
ELECTRÓNICA**

**Director: RODRIGO CORREA CELY, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**2009**

## RESUMEN

**TITULO: DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN EL ÁREA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA.\***

**AUTOR:** Luisa Marcela Pineda Triana\*\*

### **PALABRAS CLAVES:**

Diseño de experimentos, metodología, ingeniería electrónica.

### **DESCRIPCIÓN:**

El programa de formación de Ingeniería Electrónica presenta asignaturas de tipo teórico-prácticas, donde los estudiantes deben estar en capacidad de planear, recolectar y analizar los datos obtenidos de las experiencias a fin de llevar a la práctica los conocimientos adquiridos teóricamente. Finalizando el programa de formación se elabora el trabajo de grado, en su mayoría son en modalidad de desarrollo de hardware, estos deben atravesar por una etapa de pruebas, calibración y verificación de funcionamiento y estas actividades se ejecutan usando estrategias de experimentación poco eficientes.

Es importante realizar una propuesta que sirva de guía para los estudiantes durante el periodo de verificación, planteando una metodología de diseño de experimentos permitiendo que las futuras pruebas, calibración de equipos y prácticas de laboratorio sean realizadas y analizadas mediante correctos parámetros de evaluación, disminuyendo el error en la validación del funcionamiento de los dispositivos.

Inicialmente se realiza un estudio sobre los trabajos de grado entregados a la escuela por estudiantes de Ingeniería Electrónica en años anteriores a fin de identificar estrategias de experimentación utilizadas.

Seguido se muestra un marco teórico con los conceptos básicos de diseño de experimentos, necesarios para el desarrollo de este proyecto, y el estudio de diferentes programas de apoyo para análisis estadístico.

A continuación realiza la descripción de la metodología diseñada para que sea empleada en futuras pruebas de validación, la aplicación de dicha metodología a casos de estudio seleccionados con su respectiva comparación.

Finalmente, se llega a la detección de las principales ventajas al aplicar técnicas de diseño de experimentos, en el área de Ingeniería Electrónica, formulando conclusiones y recomendaciones que represente mejoras en el proceso de formación del estudiante de la E3T, en miras de desarrollar un profesional competente en la toma de decisiones, frente a situaciones que se presentan ejerciendo la ingeniería.

---

\*Trabajo de Grado.

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Director: PhD. Carlos Rodrigo Correa Cely.

## SUMMARY

**TITULO: DESIGN OF EXPERIMENTS IN THE AREA OF ELECTRONIC ENGINEERING.\***

**AUTHOR:**

Luisa Marcela Pineda Triana\*\*

**KEYWORDS:**

Design of Experiments, methodology, electronic engineering.

**ABSTRACT:**

During the training program of Electronic Engineering are a number of subjects of a theoretical-practical, where students must be able to plan, collect and analyze data from laboratories experiences in order to implement theoretically foreground, completing the training program with the development of the thesis, are mostly in form of hardware development and they must go through a stage of testing, calibration and verification of operation.

Traditionally the above activities are executed using inefficient testing strategies at the time of validation of results, it is important to make a proposal to provide guidance for students during the testing and analysis, suggesting a design methodology allowing experiments future tests, testing equipment and laboratory practices are performed and analyzed by correct evaluation parameters, decreasing the error in the validation of the performance of devices.

Initially it was conducting a study on the work given to grade school for Electronic Engineering students in previous years in order to identify commonly used testing strategies.

He then shows a theoretical framework with the basic concepts of Design Of Experiments necessary for the development of this project, then examines the various programs that provide support for statistical analysis.

The following is a description of the methodology designed to be used in future validation tests, followed by the application of this methodology to the previously selected case studies with their respective comparison.

Finally, we achieved the detection of the main advantages in applying experimental design techniques in the area of Electronic Engineering, formulating conclusions and recommendations that represent improvements in the training process E3T student, in order to develop a professional responsible decision making in situations that occur engineering exercise.

---

\* Final Graduation work.

\*\* Physical Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering School . Universidad Industrial de Santander. Director: PhD. Carlos Rodrigo Correa Cely.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
1.1 ESTUDIO DE LAS ESTRATEGIAS UTILIZADAS, POR PARTE DE LOS ESTUDIANTES DE LA E3T, PARA EL PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DE LA ETAPA DE PRUEBAS EN LOS PROYECTOS DE GRADO CUYO PROPOSITO SEA DESARROLLO HARDWARE.....	3
<b>1.1.1 Hipotesis .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.2 Ficha técnica.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.3 Preguntas de investigación .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1.4 Análisis de los resultados obtenidos .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1.5 Descripción de las estrategias de experimentación comunmente utilizadas. ....</b>	<b>10</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....</b>	<b>13</b>
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS.....	14
2.2. PRINCIPIOS DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....	16
<b>2.2.1 Realización de réplicas .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2 Aleatorización .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.3 Control local.....</b>	<b>19</b>
2.3. MODELOS DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....	20
<b>2.3.1 Diseños unifactoriales .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2 Diseños por bloques .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.3 Diseños factoriales.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.4 Otros diseños.....</b>	<b>25</b>
<b>3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....</b>	<b>27</b>
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	27
3.2 SELECCIÓN DEL SOFTWARE.....	30
3.3 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA .....	36
<b>3.3.1 Analisis y descripción del problema.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.2 Definir hipotesis de manera clara y concisa.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.3 Definición y clasificación de las variables.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.4 Establecer los tratamientos.....</b>	<b>39</b>
<b>3.3.5 Muestreo y diseño de observaciones.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.6 Definir las unidades experimentales sobre las que se van a aplicar los tratamientos.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.7 Determinar la manera de aleatorizar.....</b>	<b>40</b>

3.3.8	<b>Comprobar la capacidad del experimento con relación a las exigencias de la hipótesis planteada.</b>	41
3.3.9	<b>Realizar el experimento.</b>	41
3.3.10	<b>Interpretar los resultados.</b>	42
3.3.11	<b>Conclusiones y observaciones.</b>	42
3.4	<b>SELECCIÓN CASOS DE ESTUDIO.</b>	43
3.4.1	<b>Caso # 1: diseño y construcción de un prototipo para la medición y detección de humedad relativa.</b>	44
3.4.2	<b>Caso # 2: diseño de telemetría inalámbrico para optimizar la lectura de consumos en los medidores de agua.</b>	48
3.4.3	<b>Caso # 3: diseño e implementación de una alarma activada por distancia.</b>	53
4.	<b>CONCLUSIONES</b>	58
5.	<b>RECOMENDACIONES</b>	59
6.	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	61
	<b>ANEXOS</b>	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Descripción de la muestra según el tipo de desarrollo del proyecto. ....	5
Figura 2. Tipos de variables identificadas en los procesos. ....	6
Figura 3. Estrategias de experimentación utilizadas en la etapa de pruebas.....	8
Figura 4. Descripción de las actividades realizadas para validar los resultados obtenidos.....	9
Figura 5. Principios de diseño de experimentos (Fisher, 1926).....	16
Figura 6. Curva de operación característica para la prueba $t$ de dos colas con $\alpha=0.003$ . ....	46

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ficha técnica del análisis estadístico relacionado al estudio de la hipótesis. ....	4
Tabla 2. Representación de los datos de un diseño unifactorial balanceado. ....	21
Tabla 3. Tabla de análisis de varianza para el modelo con un solo factor y efectos fijos. ....	22
Tabla 4. Análisis de varianza para el modelo de bloques completamente aleatorizado. ....	24
Tabla 5. Arreglo general de un diseño factorial de dos factores. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 6. Tabla de análisis de varianza para un modelo factorial de dos factores con efectos fijos. ....	25
Tabla 7. Comparación entre software de análisis estadístico. ....	35
Tabla 8. Esquema para la tabulación de los datos obtenidos caso # 1. ....	47
Tabla 9. Esquema para la tabulación de los datos obtenidos caso # 2. ....	51
Tabla 10. Esquema para la tabulación de los datos obtenidos caso # 3. ....	55
Tabla 11. Análisis de varianza para el modelo de tres factores. ....	56

## 1. INTRODUCCION

La ingeniería en general, se caracteriza por el acertado y eficiente manejo de todos los elementos que componen el proceso bajo estudio. El desarrollo de nuevas herramientas en los distintos campos del conocimiento pasa por una actividad de depuración, revisión, calibración y puesta a punto de todos y cada uno de los componentes que sean resultado de la invención o adaptación del conocimiento.

Existen diferentes estrategias de experimentación, estando entre ellas, la mejor conjetura, un factor a la vez y una metodología a partir de análisis estadístico. La mejor conjetura, toma la experiencia y conocimientos que tenga el investigador, sobre el sistema o proceso en estudio, para seleccionar las combinaciones de las variables y decidir las condiciones para realizar las pruebas; la estrategia de un factor a la vez, permite conocer los efectos sobre el sistema de cada una de las variables individualmente; como su nombre lo indica, consiste en variar sucesivamente cada variable en un rango, mientras se mantiene constante las otras en su punto inicial. Es tal vez, la estrategia más difundida en la experimentación y enseñanza de la ingeniería (linealidad).

Las dos estrategias anteriores dejan en evidencia las principales desventajas; por una parte, una serie de datos obtenidos de unas pruebas prácticamente intuitivas, y del otro lado, el hecho de no permitir el análisis de interacciones entre variables, es decir, la no linealidad. Este documento tiene por objeto la descripción de una tercera estrategia de experimentación.

Concientes de esta realidad, este proyecto, en la modalidad de investigación, desarrolla una solución que brinde a los ejecutores de proyectos de grado en el área de ingeniería electrónica una herramienta metodológica para la validación de los equipos y los resultados obtenidos en las diversas pruebas que, con propósitos de calibración y caracterización, sean realizadas.

Cabe aclarar, que este tema se cursa como una asignatura dentro del programa curricular de ingeniería industrial, de la Universidad Industrial de Santander, sin embargo, no significa que él sea ligado únicamente con este campo de la ingeniería, ya que situaciones experimentales con el uso racional de recursos es de gran importancia en cualquier ámbito industrial y académico.

Este trabajo de grado tiene por objetivo principal, desarrollar una herramienta, que permita ser utilizada en el diseño de experimentos en el área de Ingeniería Electrónica, apoyada de un software especializado.

El estudiante estará en capacidad de establecer los parámetros que afectan el funcionamiento del dispositivo y a su vez, identificar el tipo de prueba que se debe realizar, incluyendo el número de repeticiones de esta, con el fin de determinar y caracterizar el comportamiento de la variable respuesta. Logrando criterios de evaluación, a partir de una variable teórica o una referencia (método experimental), que lleven a disminuir el porcentaje de error en la validación del desempeño dispositivo diseñado.

Los objetivos específicos fueron: Proponer una estrategia para la planeación de las pruebas experimentales, apoyada en los principios básicos de diseño de experimentos; seleccionar un software especializado que funcione como complemento para el análisis de resultados al aplicar la metodología diseñada; realizar un estudio de la incidencia en tres trabajos de grado de la E3T al utilizar la estrategia de planeación de pruebas experimentales, y elaborar un documento guía para los estudiantes de la E3T; a fin, que sea introducida la metodología como herramienta opcional en la validación de los resultados en los diferentes proyectos que se realizan.

En este capítulo se analiza la problemática actual frente al diseño y ejecución de la etapa de pruebas; se estudian las estrategias comúnmente utilizadas en la E3T<sup>1</sup> para examinar el desempeño de los prototipos diseñados.

El capítulo dos, marco teórico, inicia por ubicar al lector dentro del ambiente de Diseño de Experimentos (DOE)<sup>2</sup>, mediante la definición de conceptos básicos permitiéndole comprender, de una manera más adecuada, el desarrollo de la metodología. Finaliza dando a conocer los principales métodos de DOE, siendo estos base para la aplicación de la metodología experimental.

El capítulo tres, desarrollo de la metodología, comprende la selección del software, que servirá de apoyo para el análisis de los resultados obtenidos; la descripción de la metodología de DOE propuesta y la selección de los casos junto con la aplicación y análisis de la metodología a cada uno de ellos.

Finalmente, el capítulo cuarto, presenta las observaciones, conclusiones y recomendaciones del proyecto.

## **1.1 ESTUDIO DE LAS ESTRATEGIAS UTILIZADAS, POR PARTE DE LOS ESTUDIANTES DE LA E3T, PARA EL PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DE LA ETAPA DE PRUEBAS EN LOS PROYECTOS DE GRADO CUYO PROPOSITO SEA DESARROLLO HARDWARE**

La existencia de diferentes estrategias de experimentación ha sido de suma importancia para la evolución del DOE, despertando el interés en los profesionales del uso del análisis estadístico, dando origen al desarrollo de nuevas alternativas experimentales que aplican eficientemente las capacidades adquiridas en el aprendizaje de la ingeniería.

---

<sup>1</sup> Escuela de Ingenierías de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

<sup>2</sup> Por sus siglas en inglés, Design Of Experiments.

A fin de conocer el procedimiento empleado, por los estudiantes de ingeniería electrónica de la E3T, para plantear la etapa de pruebas en los proyectos de grado desarrollados, se realizó un estudio aleatorio de los proyectos de desarrollo hardware que hubiesen sido entregados a partir del año 2005 en adelante.

### 1.1.1 HIPOTESIS

Los desarrolladores de trabajos de grado de la E3T, realizan una correcta planeación de pruebas, calibración y puesta a punto de sus prototipos diseñados, acorde con un consumo de tiempo y recursos coherente con las exigencias y necesidades de estos.

### 1.1.2 FICHA TÉCNICA

En la Tabla 1 se describen las condiciones establecidas para realizar el estudio de la hipótesis planteada.

**Tabla 1. Ficha técnica del análisis estadístico relacionado al estudio de la hipótesis.**

<b>INTERESADOS</b>	<b>Autora del proyecto</b>
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN</b>	Proyectos de grado, para optar el título de Ingeniero Electrónico, que hubiesen sido entregados a la escuela a partir del año 2005
<b>MUESTRA</b>	90 proyectos
<b>TIPO DE MUESTREO</b>	Aleatorio
<b>PERIODO DE REALIZACIÓN</b>	Octubre 2008 – Diciembre 2008

### 1.1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

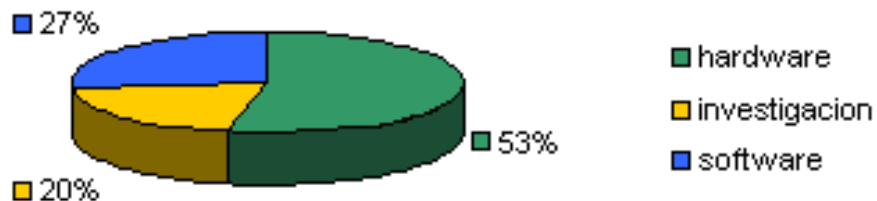
- **Pregunta No. 1:** Acerca de tipo de desarrollo en el proyecto de grado.

A medida que se realizaba el análisis de los proyectos entregados surgían las opciones de clasificación, finalmente se crearon grupos de interés para el estudio.

Cabe aclarar que la categoría “desarrollo de hardware” comprende aquellos proyectos que estuvieron dedicados a un desarrollo hardware como tal y a los que además de esto, tenían un manejo de software incluido.

De los datos representados en la Figura 1, se puede concluir que una gran parte de estudiantes de Ingeniería Electrónica de la E3T, realizan su trabajo de grado enfocado al diseño e implementación de un dispositivo.

**Figura 1. Descripción de la muestra según el tipo de desarrollo del proyecto.**



- **Pregunta No. 2:** Sobre la definición de hipótesis antes de un proceso experimental.

En cada uno de los trabajos de grado analizados se encontró una correcta descripción del problema, sin embargo, es realizado al comienzo del desarrollo del trabajo de grado y en este se encuentra implícitamente

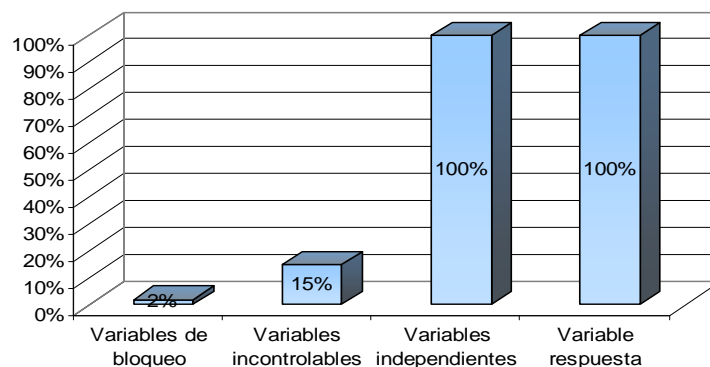
expresada la hipótesis del experimento. Lo que hace complicado el análisis, posterior a la obtención de datos y a la confrontación de los resultados, respecto a un parámetro de comparación.

- **Pregunta No. 3:** Respecto a la identificación y clasificación de las variables del proceso.

En todo proceso de experimentación, realizado en la E3T, se identifican las principales variables, dependiente e independientes. De otra parte, se encuentra que solo en el 15% de los proyectos se identifican las variables incontrolables, en el momento de análisis y justificación de posibles causas de error frente a los valores simulados.

Generalmente, las variables de bloqueo no son identificadas porque requieren de un manejo y análisis cuidadoso que en su medida resulta complejo. Solo en un 2% de los documentos estudiados se encuentra la identificación y manejo de estas variables, ver Figura 2.

**Figura 2. Tipos de variables identificadas en los procesos.**



- **Pregunta No. 4:** Acerca de la estrategia de experimentación utilizadas en la etapa de pruebas.

Al analizar las estrategias utilizadas para estudiar la variable de interés, se encontró en su mayoría que los experimentadores, parten de sus conocimientos sobre el tema, para considerar el rango de operación de cada una de las variables, principio básico de la estrategia de la *mejor conjetura*, de allí, que esta se la segunda estrategia más utilizada en los proyectos.

En segunda instancia, apoyados de la estrategia de *un factor a la vez*, modifican independientemente los niveles de cada una de las variables, con su respectiva toma de datos que se representan mediante una serie de gráficas que permiten describir el comportamiento del dispositivo frente a cada una de esas variaciones.

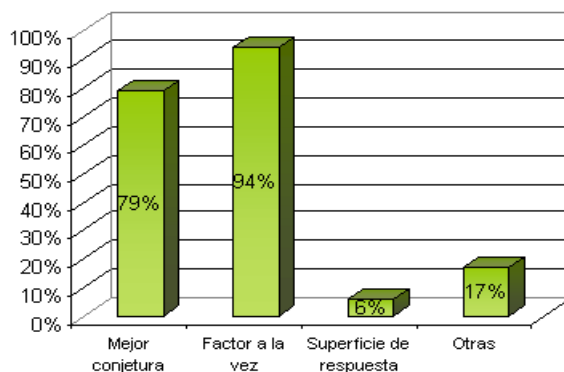
Finalmente realizan una comparación ya sea, frente a resultados obtenidos por herramientas software que permiten realizar simulaciones de ambientes, donde las variables no controlables son casi imperceptibles, o a otros prototipos especializados en realizar las operaciones requeridas.

Así mismo, dentro de las otras estrategias encontradas se tiene las repeticiones<sup>3</sup> de pruebas, utilizada en complemento con las anteriores y a su vez, para identificar posibles variaciones en las medidas realizadas, estimando así una desviación estándar entre ellas. Solo en un 6% de los documentos estudiados fue utilizada la estrategia de superficie de respuesta, ver Figura 3.

---

<sup>3</sup> Principio básico de diseño de experimentos

**Figura 3. Estrategias de experimentación utilizadas en la etapa de pruebas**



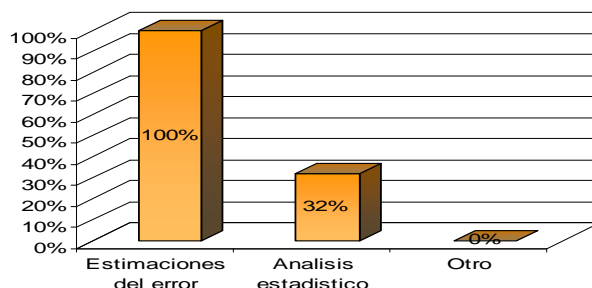
- **Pregunta No. 5:** Respecto a realización de una prueba de validez de los resultados obtenidos.

Efectivamente, como se puede observar en la

Figura 4, en todos los trabajos de grado, los experimentadores realizan una validación de los datos obtenidos de las pruebas, al menos por un proceso de estimación del porcentaje de error, a partir, de la comparación con un parámetro confiable (variable teórica) y/o referencia. Solo un 32% se efectuó un análisis basado en conceptos estadísticos, que llevan a una confirmación de las hipótesis con un mínimo riesgo de error.

En ninguno de los trabajos de grado estudiados se encontró alguna otra estrategia de validación de los resultados.

**Figura 4. Descripción de las actividades realizadas para validar los resultados obtenidos.**



- **Pregunta No. 6:** Acerca de la identificación de posibles causas o factores de error.

Si bien es cierto que en todos los trabajos de grado analizados se realizó una estimación del porcentaje de error experimental, solo en un 77% de los casos se realiza un estudio más profundo, con el fin de detectar las posibles causas de error; más aún, solo en un 48% de estas, se toman medidas correctivas.

#### **1.1.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS**

En la sección 1.2.3 queda en evidencia que en el momento de planificar y llevar a cabo la etapa de pruebas dentro de los trabajos de grado, se aplican algunas de las estrategias experimentales, sin embargo, este hecho ocurre en una gran proporción de manera intuitiva y por tanto no existe claridad sobre dos aspectos importantes: la validez de la metodología implementada, y si los resultados obtenidos permiten realizar conclusiones acerca del correcto funcionamiento del prototipo.

Por otro lado, la fase de identificación y clasificación de variables se realiza en gran medida acorde con las exigencias de los casos, a pesar de esto, la planificación de los niveles de las variables y las observaciones a ejecutar se hace prácticamente de manera aleatoria, situación que impide tener una relación equilibrada entre estas características y el consumo de tiempo y recursos dispuestos para los experimentos.

Expuestas las conclusiones de los resultados de la sección 1.2.3., se rechaza la hipótesis planteada, debido a que se encontró que los estudiantes de Ingeniería Electrónica de la E3T no llevan a cabo una correcta planeación de la etapa de pruebas, y que las herramientas de diseño y ejecución de experimentos son aplicadas en gran medida de manera ineficiente.

Por otra parte queda claro que los estudiantes poseen poca información, teniendo en cuenta que la escuela actualmente no ofrece un curso o herramienta que de claridad sobre la aplicación de los conocimientos y técnicas de DOE.

#### **1.1.5 DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE EXPERIMENTACIÓN COMUNMENTE UTILIZADAS**

- **Estrategia de la mejor conjetura.**<sup>4</sup> Este método inicia por establecer los factores que el experimentador considere más importantes en el desempeño del proceso, seguido a esto, se selecciona una combinación arbitraria de los factores anteriores y se realiza la observación y toma de resultados, cuando se finaliza la prueba inicial se ejecuta la siguiente con una combinación diferente y se realiza el mismo proceso de observación y

---

<sup>4</sup> Fuente: MONTGOMERY, Douglas C. Design And Análisis Of Experiments. John Wiley & Sons. (2001), pag 3.

toma de datos, esta operación llega a su fin cuando no exista otra combinación posible o cuando el experimentador lo considere.

El éxito de la aplicación de esta estrategia depende en medida de los conocimientos y experiencia que posea el experimentador sobre el sistema o proceso que se esté estudiando. Aquí se presentan dos aspectos que afectan su desempeño: El factor tiempo, determinado por el número de combinaciones entre los factores, estos se pueden extender de manera indefinida; sin garantía de encontrar el acertado, por otra parte el hecho de encontrar una combinación que satisfaga en gran medida el resultado esperado, no da seguridad de que sea la solución más efectiva.

- **Estrategia de un factor a la vez.**<sup>5</sup> En este método se selecciona una condición inicial para cada factor, para ir variando sucesivamente cada factor en un rango, mientras se mantiene constante los otros factores en su punto inicial.

Después de realizadas las pruebas posibles se realiza una serie de gráficas donde se observe el comportamiento de la variable al efectuar variaciones en cada factor, dejando en evidencia su principal desventaja, el no permitir el análisis del comportamiento de la variable frente a interacciones entre los factores.

A pesar de ser uno de los métodos menos eficientes en cuanto a análisis estadístico y diseño experimental se refiere, es el más utilizado en la ingeniería.

- **Estrategia de Superficie de Respuesta (MSR).**<sup>6</sup> Esta metodología parte del siguiente hecho: la respuesta de un sistema es una variable cuantitativa

---

<sup>5</sup> Ibíd. Pag 4

<sup>6</sup> Ibíd. Pag 427

dependiente de una serie de variables independientes, por tanto debe existir una ecuación matemática que describe el proceso. Las regresiones polinomiales más utilizadas son las de primer y segundo orden, generando buenas aproximaciones a la ecuación deseada en un pequeño rango de operación.

Esta metodología, por su facilidad y dinamismo, tuvo una rápida aplicación en la industria, apoyada en la manera casi inmediata como se puede definir, la variable de salida en los experimentos industriales, a partir de un reducido grupo de muestras se puede tener información suficiente.

## **2. MARCO TEÓRICO DE DISEÑO Y ANALISIS ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS**

Durante los últimos años, el fenómeno de la globalización ha generado en la industria una fuerte preocupación por mantener sus competencias en el mercado, para ello, se han centrado en desarrollar estrategias de experimentación para optimizar procesos y a su vez reducir los costos de producción, sin embargo, alrededor de estos procesos existen un sinnúmero de variables que en su acción pueden alterar los resultados de los estudios. Con el fin de mejorar estos inconvenientes, nacen los diseños de experimentos como una estrategia de planeación y análisis de cualquier estudio experimental.

Todo diseño de experimentos debe garantizar la comprobación de una hipótesis, mediante métodos que reduzcan al máximo acciones de variables incontrolables que incurran en errores experimentales; logrando una información de alto grado de confiabilidad en una investigación, a su vez, debe tener un uso de recursos y costos de experimentación a nivel adecuado, en comparación con el objeto de estudio.

Finalmente, diseñar un experimento consiste en realizar un conjunto de pruebas que permitan describir la acción de los factores de mayor acción sobre un proceso a partir del análisis del comportamiento de una variable de respuesta, en medida de la variación de sus factores causa e identificando la acción de variables no controlables, con el fin de obtener, entre pruebas, resultados con mínimas variaciones.

En el desarrollo de este capítulo, se mencionan brevemente conceptos teóricos básicos con el fin de lograr una familiarización tanto en la terminología, como en la variedad de modelos existentes para la aplicación de diseño de experimentos.

## 2.1. CONCEPTOS BÁSICOS

Para lograr un correcto desempeño a lo largo de los capítulos posteriores, es necesario conocer algunos conceptos que se manejarán durante todo el libro.<sup>7</sup>

- **Diseño:** Proceso en el cual se configuran y se adecuan los aspectos a tener en cuenta para la realización de un experimento, tales como, materiales, método, lugares, etc.
- **Experimento:** Conjunto de circunstancias para ser aplicadas a una serie de pruebas con el fin de valorar y observar los efectos que estas tienen sobre el proceso de estudio.
- **Variable:** Característica medible de un cuerpo, la cual puede tomar diferentes valores. Puede ser *cualitativas*, aquellas, cuyos valores son nominales o categóricos y solo pueden ser comparadas entre sí, y *continuas* son aquellas, cuyos valores son numéricos, pueden tomar teóricamente infinitos valores en un intervalo, sin embargo, estos se ven limitados por la precisión de los instrumentos de medida.
- **Tratamiento:** Conjunto de condiciones particularmente seleccionadas por el experimentador, para llevar a cabo cada una de las pruebas.
- **Observación:** Recolección de datos, mediante la toma de medidas de una variable frente a cada hecho o suceso de un tratamiento.

---

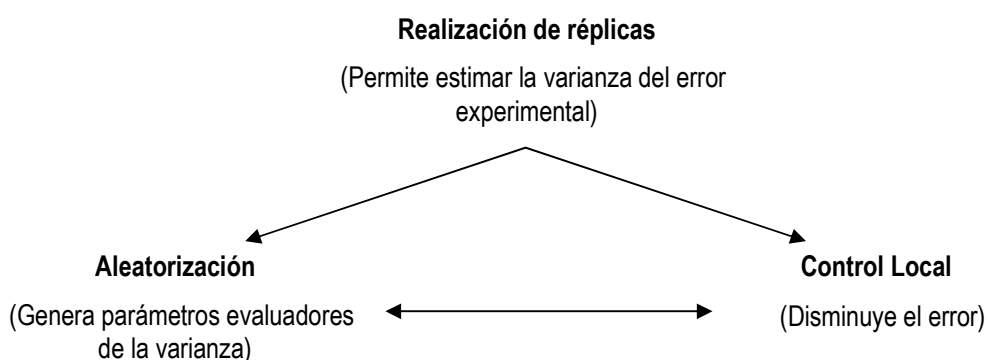
<sup>7</sup> Las definiciones a continuación son tomadas de Robert O. Kuehl , año 2001 y de Douglas C. Montgomery , fifth edition.

- **Unidad experimental:** Objeto, proceso o material, al cual es aplicado un tratamiento y donde el comportamiento de la variable respuesta puede ser medida y analizada.
- **Niveles de la variable:** Corresponde a cada uno de los valores que puede tomar las variables independientes, estas pueden ser de efectos fijos o de efectos aleatorios si son elegidas por el experimentador o a azar respectivamente.
- **Variable dependiente:** Es la variable de interés, la que se pretende estudiar y conocer su variabilidad frente a cada uno de las observaciones del experimento, también es llamada como variable respuesta.
- **Variable independiente:** Factor que es manipulado por el investigador a lo largo del experimento, con el fin de, caracterizar y conocer el comportamiento de la variable dependiente frente a la presencia de diferentes niveles de esta.
- **Variable incontrolable:** Como su nombre lo indica, son aquellas variables que el experimentador no puede tener un control sobre ellas y por consiguiente, son la principal causa de las variaciones en las observaciones de tratamientos idénticos.
- **Variable de bloqueo:** Variable que el experimentador solo puede tener control sobre ella, mediante un manejo adecuado, por grupos de unidades experimentales, donde se asuma en cada uno de estos el valor de esta variable de manera constante.
- **Hipótesis:** Proposición o suposición planteada por el experimentador y es validada por la información obtenida de cada uno de las observaciones realizadas.

- **Tamaño del experimento:** Cantidad de observaciones realizadas en el experimento.
- **Interacción de factores:** Se refiere al comportamiento de la variable respuesta frente a la acción de dos o más factores cuando el efecto del nivel de un factor se ve alterado por la variación de nivel de los otros factores existentes.

## 2.2. PRINCIPIOS DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño Experimental inicia con los estudios realizados por Ronald Fisher (1890-1982) sobre los problemas observados en la aplicación de los experimentos, ocasionando a su vez que los datos obtenidos no generaban un análisis confiable. Es en la década de los 30's cuando publica su primer artículo, recopilando todas sus ideas desarrolladas sobre este tema, "The Arrangement of Field Experiments" (Fisher, 1926) dando a conocer el concepto de análisis de varianza, el cual da origen a los tres principios básicos del diseño experimental: **aleatorización, realización de réplicas y formación de bloques**, ver Figura 5.



**Figura 5. Principios de diseño de experimentos (Fisher, 1926)**

### 2.2.1 REALIZACIÓN DE RÉPLICAS<sup>8</sup>

Este principio hace mención al número de veces que se realiza un tratamiento a unidades experimentales independientes, este proceso puede ser balanceado o desbalanceado si el número de repeticiones es igual para todos los tratamientos o no, respectivamente. Las principales propiedades de este son: la estimación del error experimental y del efecto medio de cualquier variable en el experimento.

Las principales razones realizar réplicas de los tratamientos en los experimentos son:

- Demuestra que se pueden reproducir los resultados, al menos bajo las condiciones experimentales actuales.<sup>9</sup>
- Proporciona cierto grado de seguridad contra resultados anormales en el experimento, debidos a accidentes no previstos.<sup>10</sup>
- Proporciona las medias para estimar la varianza del error experimental. Aun cuando la experimentación previa proporcione estimaciones de la varianza, la estimación a partir del experimento en curso puede ser más exacta porque refleja el comportamiento actual de las observaciones.<sup>11</sup>
- Proporciona la posibilidad de aumentar la precisión en la estimación de las medias de los tratamientos. Al incrementar las réplicas (n), disminuye la

---

<sup>8</sup> Fuente: Kuehl, Robert O. Diseño de Experimentos. Segunda edición. Thompson Learning, 2001, pag 15.

<sup>9</sup> *Ibíd.* Pag. 16

<sup>10</sup> *Ibíd.*

<sup>11</sup> *Ibíd.*

varianza muestral, definida por  $s_y^2 = s^2/n$ , donde  $s^2$  es la varianza de la muestra y  $n$  el número de replicas, lo que aumenta la precisión de  $\bar{y}$ .<sup>12</sup>

Es evidente que el hecho de aumentar el número de réplicas de un tratamiento es una medida de control a la varianza del error, mejorando significativamente la precisión del experimento, sin embargo el incremento de las repeticiones debe ser de manera razonable y adecuada frente a los costos que estas implican.

## 2.2.2 ALEATORIZACIÓN<sup>13</sup>

Este principio es fundamental para validar el experimento al permitir eliminar los efectos de las variables incontrolables que estén presentes en el proceso, además da la oportunidad a cada tratamiento de tener la misma oportunidad de ser aplicado a cualquier unidad experimental. La aleatorización es la asignación del material experimental y el orden de la realización de pruebas mediante las leyes del azar.

La principal acción de la aleatorización sobre el proceso experimental, consiste en romper cualquier patrón frente a variables desconocidas y/o incontrolables que puedan beneficiar a un tratamiento frente a los otros, cabe aclarar que este principio no elimina la varianza del error

---

<sup>12</sup> *Ibíd.*

<sup>13</sup> Fuente: D.R. Cox and N. Reid *The Theory of the Design of Experiments*, Chapman & Hall/Crc.

### 2.2.3 CONTROL LOCAL<sup>14</sup>

Este principio consiste en realizar subconjuntos de las unidades experimentales usando técnicas de bloqueo, balanceo y agrupamiento, siendo estas, estrategias usadas por el experimentador para reducir y controlar el error experimental ya que permiten eliminar los efectos de las variables extrañas que generan variaciones en las observaciones entre las unidades experimentales.

- **Bloqueo:** Técnica que permite reducir la variabilidad natural; consiste en la agrupación de las unidades experimentales de la manera más homogénea que sea posible, estos subgrupos se hacen en relación a una o más variables de las que se conoce o se espera un efecto significativo en el comportamiento de la variable respuesta, todo con el fin de separar el error experimental de la variabilidad asociada con las diferencias entre los grupos de unidades.

*Los cuatro criterios que se usan con más frecuencia para crear bloques de las unidades experimentales son: 1) proximidad, 2) características físicas (edad o peso), 3) tiempo, 4) administración de tareas en el experimento.*<sup>15</sup>

- **Balanceo:** Consiste en realizar un agrupación de unidades experimentales y una asignación de tratamientos lo más equilibradamente posible entre cada uno de los bloques formados, de esta forma resulta una configuración balanceada.
- **Agrupamiento:** Consiste en agrupar bloques de unidades experimentales homogéneas, de forma que estos grupos puedan ser sometidos a diferentes tratamientos.

---

<sup>14</sup> Ibíd.

<sup>15</sup> Fuente: Kuehl, Robert O. Diseño De Experimentos. Segunda edición. Thompsom Learning, 2001.

Finalmente, la replicación de un experimento proporciona los datos para estimar la varianza del error experimental. El control local proporciona estrategias para reducir el error experimental. Pero es con la aleatorización que se garantiza la validez de las estimaciones.

## **2.3. MODELOS DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

### **2.3.1 DISEÑOS UNIFACTORIALES**

Este modelo da las pautas para analizar aquellos experimentos en los cuales solo hay un factor de interés y de éste se tiene más de dos niveles para estudio. Este tipo de experimento se aleatoriza completamente y se compara las medias de las respuestas en cada uno de los tratamientos con el fin de identificar una diferencia entre ellas.

Dependiendo del número de observaciones realizada por cada tratamiento, ya sean iguales o diferentes, el diseño puede ser balanceado o desbalanceado respectivamente. Para analizar los resultados obtenidos de este diseño se debe realizar un “*análisis de varianza*” ya que es el procedimiento adecuado para probar la igualdad de varias medidas.

Los datos de este diseño se pueden tabular típicamente como se muestra en la

**Tabla 2.**

**Tabla 2. Representación de los datos de un diseño unifactorial balanceado.**

Tratamiento (Nivel)	Observaciones	Totales ( $y_i$ )	Promedios ( $\bar{y}_i$ )
1	$y_{11}$ $y_{12}$ ..... $y_{1n}$	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	$y_{21}$ $y_{22}$ ..... $y_{2n}$	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
3	$y_{31}$ $y_{32}$ ..... $y_{3n}$	$y_{3.}$	$\bar{y}_{3.}$
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
a	$y_{a1}$ $y_{a2}$ ..... $y_{an}$	$y_{a.}$	$\bar{y}_{a.}$
		$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

Fuente: MONTGOMERY, Douglas C. Design And Análisis Of Experiments. John Wiley & Sons. (2001). Pg 63.

Partiendo del hecho que se tiene una cantidad **a** de niveles o tratamientos y siendo **n** el número de observaciones por tratamiento, entonces.

$y_{ij}$ : Representa la j-ésima observación tomada en el tratamiento *i*.

$y_{i.}$ : Representa el total de las observaciones realizadas en el tratamiento *i*.

$y_{..}$ : Representa la suma de todas las observaciones  $y_i$ .

$\bar{y}_{i.}$ : Representa el promedio de las observaciones en el tratamiento *i*.

Los anteriores términos, matemáticamente se pueden representar así:

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \qquad \bar{y}_{i.} = \frac{y_{i.}}{n} \qquad i = 1, 2, 3, \dots, a$$

$$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \qquad \bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{N}$$

Siendo:  $N = an$ : Número total de observaciones para un caso balanceado.

$N = \sum_{i=1}^a n_i$ : Número total de observaciones para un caso desbalanceado.

Recordando: **a**: Cantidad de niveles o tratamientos

**n**: Número de observaciones por tratamiento

Siguiendo la tabla 3, se realiza el análisis de los datos obtenidos donde:

$$MS_T = \frac{SS_{Tratamiento}}{a - 1}$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{N - a}$$

**Tabla 3.**Tabla de análisis de varianza para el modelo con un solo factor y efectos fijos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$F_0$
<i>Entre tratamientos</i>	$SS_{\text{Treatments}} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2$	$a - 1$	$MS_{\text{Treatments}}$	$F_0 = \frac{MS_{\text{Treatments}}}{MS_E}$
<i>Error (dentro de los tratamientos)</i>	$SS_E = SS_T - SS_{\text{Treatments}}$	$N - a$	$MS_E$	
<i>Total</i>	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	$N - 1$		

Fuente: MONTGOMERY, Douglas C. *Design And Análisis Of Experiments*. Editorial John Wiley & Sons. (2001), pg 70.

**Finalmente a partir de estadístico de prueba  $F_0$  y el parámetro obtenido de la tabla del**

Anexo B, se puede rechazar la hipótesis si:  $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$

### 2.3.2 DISEÑOS POR BLOQUES

Dentro de las variables que se pueden presentar durante la realización de un experimento son las variables perturbadoras, existen algunos casos donde estas variables son conocidas y a la vez se pueden controlar, sin embargo para un experimentador no es de interés el efecto de esta variable, el modelo de bloques presenta una alternativa que elimina el efecto de dicha variables en el momento del análisis. De esta manera, se puede decir que se pueden formar unidades experimentales mediante la formación de bloques. Este modelo es aplicado cuando se estudia una sola fuente de variación perturbadora.

Cuando por las circunstancias del experimento existe más de una variable perturbadora se pueden eliminar los efectos mediante la formación de bloques especiales, para estos casos son modelos correspondientes a los cuadros latinos

y grecolatinos que se emplean respectivamente, en la presencia de dos y tres variables de este tipo. Una característica importante de estos dos modelos, como su nombre lo indica son cuadrados, lo que implica que el número de filas es igual al número de columnas por cada bloque.

Para describir el manejo estadístico que se realiza en la formación de bloques se muestra la Tabla 4, donde se muestran las ecuaciones utilizadas para realizar el análisis de varianza de los datos obtenidos en los experimentos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F <sub>o</sub>
Tratamientos	$SS_{\text{Tratamientos}} = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$	$a - 1$	$\frac{SS_{\text{Tratamientos}}}{a - 1}$	$\frac{MS_{\text{Tratamientos}}}{MS_E}$
Bloque	$SS_{\text{Blocks}} = \frac{1}{a} \sum_{j=1}^b y_j^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$	$b - 1$	$\frac{SS_{\text{Blocks}}}{b - 1}$	
Error	$SS_E = SS_T - SS_{\text{Tratamientos}} - SS_{\text{Blocks}}$	$(a - 1)(b - 1)$	$\frac{SS_E}{(a - 1)(b - 1)}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$	$N - 1$		

**Tabla 4.** Análisis de varianza para el modelo de bloques completamente aleatorizado.

Fuente: MONTGOMERY, Douglas C. *Design And Análisis Of Experiments*. Editorial John Wiley & Sons. (2001) pg. 131

**Finalmente a partir de estadístico de prueba  $F_o$  y el parámetro obtenido de la tabla del**

Anexo B, se puede rechazar la hipótesis si:  $F_o > F_{\alpha, a-1, (a-1)(b-1)}$

### 2.3.3 DISEÑOS FACTORIALES

Este modelo es el más usado ya que permite analizar el comportamiento de la variable de salida frente a la acción de variables independiente en diferentes

niveles permitiendo realizar conclusiones dentro de un rango de condiciones de operación, este modelo es más eficiente frente a la estrategia de experimentación de un factor a la vez, ya que permite el análisis de interacciones entre variables de entrada.

Los diseños más comunes son los de dos factores, sin embargo se pueden presentar casos donde se presenten un número superior de factores pero el proceso de diseño y análisis es similar.

Este modelo realiza un análisis de varianza similar al del diseño unifactorial solo difiere en el hecho de que debe encontrar la relación entre los factores y si existe o no relación entre ellos, para esto se obtienen unos parámetros adicionales que se muestran en la Tabla 5.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$F_o$
Tratamiento A	$SS_A$	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_o = \frac{MS_A}{MS_E}$
Tratamiento B	$SS_B$	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_o = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interaccion	$SS_{AB}$	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_o = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	$SS_E$	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
Total	$SS_T$	$abn - 1$		

**Tabla 5.** Tabla de análisis de varianza para un modelo factorial de dos factores con efectos fijos.

Fuente: MONTGOMERY, Douglas C. *Design And Análisis Of Experiments*. Editorial John Wiley & Sons. (2001), pag 180

Finalmente a partir de estadístico de prueba  $F_o$  y el parámetro obtenido de la tabla del

Anexo B, se puede rechazar la hipótesis si:  $F_o > F_{\alpha, a-1, (a-1)(b-1)}$

#### 2.3.4 OTROS DISEÑOS

Los diseños explicados anteriormente son los comúnmente utilizados en situaciones cuando el número de variables es reducido, sin embargo se pueden presentar situaciones en las cuales el número de factores de estudio con un mínimo de corridas (recuerde que el mínimo de corrida es dos para poder obtener las medias cuadradas) hace del experimento un proceso bastante extenso y sin embargo no todas las corridas aportan información significativa para el estudio del comportamiento del sistema.

En solución a esto, se aplican **diseños factoriales fraccionados**, que consiste en correr una fracción del experimento factorial completo y resulta ser efectivo y exitoso debido a sus tres propiedades principales: **El principio de efectos esparcidos o escasez de efectos, la propiedad de proyección y la experimentación secuencial.**

### **3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA**

El desarrollo de la metodología comprende diferentes etapas, a través de estas, se logra comprender el manejo de diseño y análisis de experimentos, estableciendo la estrategia adecuada para la manipulación de datos, obteniendo como resultado final, una metodología aplicable al campo del desarrollo de hardware en ingeniería electrónica.

#### **3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Inicialmente se llevo a cabo una amplia búsqueda de información acerca de elaboración de metodologías innovadoras en ambientes académicos y conceptos de diseño de experimentos. Esta revisión bibliográfica permitió identificar los aspectos relevantes en investigaciones previas realizadas por diversos autores, llegando tanto a la definición de las especificaciones necesarias de la herramienta software utilizable en el análisis estadístico, como a la identificación de las etapas claves del diseño de la metodología.

Complementando, se analizaron artículos especializados en aplicaciones de DOE principalmente en el área de ingeniería con el fin de lograr una descripción de las estrategias de experimentación más utilizadas.

El diseño e innovación tecnológica son aspectos propios de la ingeniería electrónica y el desarrollo de la habilidad para esto es de vital importancia para ejercer la profesión. Ahora bien, innovar tiene por objeto el hecho de crear o modificar ya sea un proceso, dispositivo o equipo que realice una función importante para el desarrollo de la sociedad.

En cada una de los problemas presentes para la mejora de procesos o creación de dispositivos se presentan el constante deseo por establecer y determinar con la mayor exactitud el valor de los parámetros que incurran en su máximo rendimiento.

Es claro que las situaciones actuales no son problemas que se le puede dar solución de manera mecánica y un experimento mal planificado puede incurrir en pérdida de tiempo, recursos y la recolección de datos que no aportaran información importante para la solución de estos. Estrategias de diseño de experimentos deben introducirse en el pensamiento de los ingenieros, a fin de obtener la mayor información por cada experimento y a su vez reducir al mínimo el número de los materiales, el tiempo empleado y el costo que implica cualquier actividad experimental.

Desde sus inicios con los estudios realizados por Ronald Fisher (1890-1982) quien le preocupaba la poca información confiable obtenida en las actividades experimentales, las técnicas de DOE han ido tomado importancia.

Hoy DOE tiene una amplia gama de aplicaciones desde sencillos estudios hasta las más exigentes aplicaciones industriales, cuyos beneficios al aplicar diseño de experimentos ha sido significativo. Dentro de las actividades que los químicos deben abarcar se encuentran procesos donde es necesario la optimización de parámetros, tal como el desarrollo y mejoramiento de metodologías para realizar ajustes en parámetros de los instrumentos de medida, en datos experimentales de modelos matemáticos y en el desarrollo de nuevos productos.

Nam-Hoon Kim, Min-Ho Choi, Sang-Yong Kim, Eui-Goo Chang,<sup>16</sup> en su publicación, utilizando un modelo DOE, se llevó a cabo la investigación de la

---

<sup>16</sup> Artículo: "Design of experiment (DOE) method considering interaction effect of process parameters for optimization of copper chemical mechanical polishing (CMP) process" *Microelectronic Engineering* Volume 83, Issue 3, March 2006, Pages 506-512.

interacción entre parámetros como la velocidad de la plataforma giratoria, la velocidad de la cabeza, la fuerza y la presión ejercida sobre el cobre, durante el proceso de metalización de las interconexiones en la fabricación de circuitos integrados, proceso conocido como pulida químico mecánica, CMP (por sus siglas en inglés), y el efecto sobre la velocidad de eliminación y la no uniformidad.

De igual manera, la ingeniería de calidad centra su interés en mejorar los productos y procesos apoyados en el uso de diseño de experimentos, como el caso Gaia Franceschinia and Sandro Macchietto<sup>17</sup> donde estudian el proceso de producción del biodiesel intentando perfeccionar el proceso, mediante la aplicación de técnicas de diseño de experimentos logran determinar la manera más apropiada de esta compleja reacción cinética, disminuyendo significativamente el tiempo y costos del periodo analítico y por ende del proceso como tal.

Continuando, en el campo de los materiales y sus composiciones, R. Rikards, A. Chate, G. Gailis<sup>18</sup>, proponen el método de análisis de superficie para identificar las propiedades elásticas de los materiales compuestos por laminas, observando una disminución en la diferencias entre los valores medidos y los calculados numéricamente de las eigenfrecuencias de la estructura, de esta manera se logra determinar las propiedades elásticas y sus condiciones para lograr medir las eigenfrecuencias de placas compuestas.

Finalmente en las ciencias del medio ambiente ha continuado la aplicación de los diseños experimentales. Uno de los modelos más utilizados en la microbiología es el sugerido por el premio nobel J. Monod, el cual lleva su nombre, "modelo Monod". Este describe la cinética de crecimiento microbiano y comúnmente es empleado para evaluar los procesos de biodegradación, cuya complicación era la

---

<sup>17</sup> Artículo: "A numerical experiment design study on a biodiesel production process" Computer Aided Chemical Engineering Volume 20, Part 1, 2005, Pages 349-354.

<sup>18</sup> Artículo: "Identification of elastic properties of laminates based on experiment design" International Journal of Solids and Structures Volume 38, Issues 30-31, July 2001, Pages 5097-5115.

identificación de los parámetros mediante métodos experimentales, sin embargo, Nikolay Strigul a, Holger Dette, Viatcheslav B. Melas<sup>19</sup> proponen estrategias de diseño de experimentos que permiten identificar eficazmente el valor del parámetro y unido está resaltan el hecho de un uso económico de los recursos experimentales.

De lo anterior se evidencia la aplicación, en diferentes campos, el diseño de experimentos como una herramienta comúnmente utilizada para la planeación, ejecución y realización de las pruebas.

Dentro del programa académico de Ingeniería Electrónica que ofrece la Universidad Industrial de Santander, se encuentra la asignatura Probabilidad y Estadística, se espera que brinde al estudiante los conceptos básicos de análisis estadístico para ser aplicado en el momento del estudio de los resultados obtenidos; sin embargo estos no son suficientes para crear, en los estudiantes de este programa, una mentalidad de análisis estadístico apoyada en técnicas de diseño de experimentos.

### **3.2 SELECCIÓN DEL SOFTWARE**

En el diseño y análisis de experimentos, las herramientas software son de gran importancia para facilitar la obtención de gráficas, tablas de análisis de varianza entre otros elementos, máxime cuando el número de datos a manejar es significativo.

El software seleccionado debe contar con unas características básicas: en primera instancia debe permitir el análisis y diseño de los modelos estudiados en el

---

<sup>19</sup> Artículo: “A practical guide for optimal designs of experiments in the Monod model” aprobado y listo para publicar en septiembre del 2009, disponible online desde marzo del 2009.

capítulo anterior, además del manejo de un número significativo de variables controlables, cada una con cantidad de niveles razonables; debido al corto de tiempo que normalmente es asignado a la etapa de pruebas, debe ser una herramienta de fácil uso que no interfiera con la continuidad del trabajo, finalmente debe tener una licencia libre o en su defecto una versión de prueba con un tiempo de ejecución mínimo de 45 días.

Existe variedad de software los cuales contienen en su mayoría las aplicaciones estadísticas necesarias, sin embargo, especialistas en el área de diseño de experimentos han desarrollado software con características específicas que facilitan el estudio de DOE. A continuación se describen algunos de los que fueron encontrados en la comunidad.

- **Minitab.**<sup>20</sup> Es un software de fácil uso, como apoyo para su uso posee una documentación detallada en la ayuda que se encuentra disponible en cada cuadro de diálogo; ofrece una gran variedad de herramientas necesarias para desarrollar proyectos de mejoramiento de calidad más exigentes en recursos, incluye procedimientos estadísticos utilizados en la estimación de parámetros y pruebas de hipótesis para una o dos muestras, entre ellos, están las estadísticas y las gráficas descriptivas, las pruebas de hipótesis y los intervalos de confianza, la varianza y el análisis de correlación.

Este software ofrece cuatro tipos de experimentos diseñados: *factorial*, *de superficie de respuesta*, *de mezcla* y *de Taguchi* (robusto). Este software está disponible en una versión de prueba con una disponibilidad de 30 días.

---

<sup>20</sup> Fuente: [www.minitab.com](http://www.minitab.com)

- **DOE++:**<sup>21</sup> Al igual que el software anterior facilita el uso de las técnicas tradicionales del Diseño de Experimentos, a través de una guía por los diseños y análisis necesarios en todas las fases, que van desde la exploración de factores importantes, hasta la selección de los niveles de las variables de entrada para que se realice una óptima experimentación.

Los tipos de diseño que incluye este software son los siguientes: *Diseños de Un Factor*, *Diseños Factoriales*: Dos Niveles Factoriales Completos; Dos Niveles Fraccionales Factoriales; Plackett-Burman; General Factorial Completo; Taguchi Array Ortogonal, *Diseños Robustos de Taguchi*, *Diseños de Método de Superficie de Respuesta*: Compuesto Central, Box-Behnken.

Este software está disponible en una versión de prueba con una disponibilidad de 45 días.

- **NemrodW:**<sup>22</sup> Al igual que los anteriores, este software es una alternativa de fácil uso, además que se encuentra en versión en español y posee una ayuda en línea, que le proporcionará todas las informaciones sobre el funcionamiento del software *NemrodW*; así como sobre las herramientas y los tratamientos propuestos.

Este software está disponible en una versión de prueba con una disponibilidad de 3 meses, sin embargo, no es la versión completa del programa. Está limitada en términos de funcionalidades: Le da acceso a la elaboración de las matrices de experimentos clásicas, a las herramientas estadísticas analíticas elementales, así como a gran parte de los gráficos de *Nemrodw*; Las funciones « salvaguardar » e « imprimir » no están

---

<sup>21</sup> Fuente: <http://doe.reliasoft.com/>

<sup>22</sup> Fuente: <http://www.nemrodw.com/html-SP/programa.htm>

activadas; El número de variables posibles para los distintos tipos de estudios está limitado.

- **Statgraphics:**<sup>23</sup> Es un paquete estadístico de muy fácil uso, que permite realizar un análisis de resultado tanto a nivel de cálculo como de manera gráfica.

Este software está diseñado para ser utilizado a través de menús y apoyado por diversos módulos que divide las funciones haciendo de este una herramienta bastante atractiva para profesionales. Entre los principales módulos se encuentran un editor estadístico (StatReport) que prepara informes con datos variables; un asistente estadístico (StatWizard) que solicita paso a paso la información necesaria para crear un nuevo análisis con el fin de sugerir los métodos más adecuados para recopilar y analizar datos; y un enlace estadístico (StatLink) que enlaza el libro de análisis (Statfolio) con la fuente de datos.

Statgraphics se destaca por sus capacidades para la representación gráfica de todo tipo de estadísticas y el diseño de experimentos, y simulaciones en función del comportamiento de los valores. Este software está disponible en una versión de prueba con una disponibilidad de 45 días.

- **MATLAB**<sup>24</sup>: Es un sistema general de software para un amplio número de aplicaciones científicas. Es utilizado por investigadores, ingenieros y analistas, así como en el entorno universitario.

---

<sup>23</sup> Fuente: <http://www.statgraphics.net/>

<sup>24</sup> Fuente: <http://www.mathworks.com/>

Este programa a través de “Toolbox” (librerías de herramientas con funciones especiales) comprende un amplio campo que incluye: Aplicaciones matemáticas procesamiento de señales e imágenes; análisis y simulación biológica; medición, monitoreo y revisión automática en tiempo real; optimización, identificación de sistemas y predicción de trayectorias; modelación; análisis y control de sistemas lineales y no lineales; estadística descriptiva; hipótesis y experimentos estadísticos; análisis financiero, portafolios de riesgo y con redes neuronales; lógica difusa y muchas aplicaciones más.

En cuanto al manejo de diseño de experimentos, la Toolbox de estadística, maneja funciones que apoyan a crear y poner a prueba planes para reunir datos estadísticos. Estos planes muestran la forma de manipular los datos para generar información sobre su efecto en los resultados, entre sus funciones se encuentra ANOVA, en la que puede estimar los efectos de las entrada e interacciones entre ellas usando, regresión lineal, y modelado de superficie de respuesta, después visualizar los resultados gráficamente.

De acuerdo a los paquetes de software enunciados, se presenta una tabla comparativa entre ellos. Ver Tabla 5.

	<b>Minitab</b>	<b>DOE++</b>	<b>NemrodW</b>	<b>Statgraphics</b>	<b>MATLAB</b>
<b>Ventajas</b>	Fácil uso. Compatible con archivos de Excel, HTML <sup>25</sup> y de texto. Flexible. Maneja archivos de tamaño moderado. Alto rendimiento gráfico. Interfaz multilinguaje.	Interfaz flexible. Crea diseños múltiples en un proyecto individual. Diagramas múltiples. Versión de prueba disponible por 45 días.	Interfaz multilinguaje. Versión de prueba disponible por 3 meses. Manuales en multilinguaje disponibles.	Fácil uso. Interfaz y manuales disponibles en multilinguaje. Módulos asesores del diseño y análisis. Alto rendimiento gráfico. Bajas exigencias hardware. Versión de prueba por 45 días.	Lenguaje comprensible. Manuales disponibles en multilinguaje. La universidad cuenta con licencia de este programa. Alto rendimiento gráfico.
<b>Desventajas</b>	Versión de prueba Disponible por 30 días.	Aprendizaje complejo.	Funciones limitadas. Aprendizaje complejo.	Funciones limitadas.	Necesario programar para realizar análisis de datos.

**Tabla 5. Comparación entre software de análisis estadístico.**

Después de la comparación realizada en la Tabla 7 y las necesidades básicas para el desarrollo de Diseño de Experimentos, se eligió el software de Statgraphics, por ser una herramienta de fácil uso, con una interfaz multilinguaje, por los sencillos requisitos de procesamiento, sin dejar de lado, el valor agregado

<sup>25</sup> Lenguaje de programación, por su siglas en ingles (Hyper Text Markup Language)

por sus módulos de ayuda que hacen de Statgraphics un programa de gran amigabilidad con el usuario.

### **3.3 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA**

Después del análisis realizado a las estrategias tradicionalmente empleadas por los estudiantes de la E3T, para el diseño y análisis de pruebas, calibración y puesta a punto de los dispositivos desarrollados, se llegó a la conclusión que se pueden definir reglas básicas para el diseño, ejecución y análisis de los experimentos.

Este documento será una guía que los oriente, a través de este proceso, de una forma sencilla y que les permita la validación de sus resultados, no desde un punto de vista intuitivo, sino que les entregue un parámetro estadístico de valoración.

Esta metodología está fundamentada en la estructura conceptual del capítulo anterior y el análisis bibliográfico realizado. A continuación se describen los once (11) pasos esenciales para realizar un diseño de experimentos

#### **3.3.1 ANALISIS Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

En esta primera etapa, el experimentador debe realizar una revisión bibliográfica previa, a fin de captar una perspectiva general del problema, donde este sea caracterizado, definido y enmarcado dentro de una teoría, que permita proponer soluciones para ser comprobadas, así como identificar y seleccionar las mejores fuentes de información y los mejores métodos de recolección y análisis de dicha información.

Es de vital importancia que el experimentador o grupo de experimentadores conozca y maneje con propiedad los fundamentos teóricos del problema con el fin de identificar las posibles relaciones entre las variables. En este momento de estudio, es esencial realizar una formulación lógica, adecuada, precisar sus límites, su alcance y para esto se hace necesario tener en cuenta aspectos como viabilidad, lugar, tiempo y costos. Finalmente, para realizar una correcta descripción del problema es recomendable generar una lista de verificación que incluya:

- Objetivos específicos del experimento
- Identificación de los factores que influyen y cuáles de ellos varían y cuáles permanecen constantes
- Características a medir
- Recursos y materiales disponibles

### **3.3.2 DEFINIR HIPOTESIS DE MANERA CLARA Y CONCISA**

Las hipótesis son suposiciones que se desprenden del marco teórico planteando una relación entre este y la práctica. Su principal objetivo es definir el camino de la investigación, mediante enunciados que presentan elementos expresados de manera tal que conllevan a una secuencia de hechos que pretenden describir o explicar situaciones aún no confirmados.

La definición de la hipótesis tiene un efecto inmediato en el establecimiento de los tratamientos. Una hipótesis sin claridad en su planteamiento genera dificultades al constituir los tratamientos, partiendo del hecho, que cada uno de estos son un conjunto de características que dan como resultado una circunstancia de experimentación, cuyo fin es evaluar la hipótesis planteada.

En el momento de formular una hipótesis, se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- *Pertinencia*<sup>26</sup>: Este criterio hace énfasis en su efectividad en el momento de comprobada como cierta, en otras palabras, una hipótesis pertinente es aquella que resuelve el problema en el momento de ser aceptada.
- *Plausibilidad*<sup>27</sup>: Este criterio establece que la definición de la relación entre las variables debe ser concreta sin entrar en contradicciones y/o expresiones repetidas de un pensamiento (tautologías).
- *Verificabilidad*<sup>28</sup>: Para que una hipótesis tenga un campo investigativo, debe ser formulada de manera que de la posibilidad de ser verificada o refutada.
- *Simplicidad*<sup>29</sup>: Las hipótesis con una excelente formulación, son aquellas que logran una gran descripción de la información, a través de un mínimo número de variables y supuestos. La probabilidad de cometer errores en la formulación de una hipótesis, aumenta a medida que se incluyen variables o detalles innecesarios para la comprensión.

### 3.3.3 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES

El experimentador debe seleccionar las variables independientes, estos pueden ser cuantitativos o cualitativos. En el caso cualitativo hay que establecer métodos que permitan controlar estos valores, al igual de la manera cómo van a

---

<sup>26</sup> Fuente: <http://www.urosario.edu.co/cienciashumanas/documents/facultades/pdf/50b.pdf>

<sup>27</sup> Ibid

<sup>28</sup> Ibid

<sup>29</sup> Ibid

realizarse las observaciones. Es importante seleccionar los rangos de variación de los factores y el número de niveles a considerar, los cuales pueden ser predeterminados o escogidos aleatoriamente del conjunto de los posibles niveles.

Para la selección de la variable respuesta o variable dependiente, el experimentador debe tener seguridad en cuanto a la información que esta va a suministrar sea acerca del problema de interés. Es necesario suministrar la forma como se mide esta variable y de ser posible la probabilidad de ocurrencia de estas medidas.

### **3.3.4 ESTABLECER LOS TRATAMIENTOS**

A partir de este paso, inicial como tal el proceso de selección del modelo experimental, aunque existen paquetes computacionales que facilitan esta elección, dentro de este capítulo se expresan todos los pasos necesarios para realizar un correcto diseño de experimentos.

En este paso, se establecen cuales y cuantos tratamientos se deben aplicar teniendo en cuenta la naturaleza del experimento. Los tratamientos son determinados por variables o combinaciones de niveles de variables.

El interés del experimentador en el sentido de decidir cuántas variables deben incluirse, cuántos niveles de variable se deben identificar en cada factor y cuál es el rango razonable de cada variable, debe estar estrechamente ligados con la previa definición de la hipótesis.

### **3.3.5 MUESTREO Y DISEÑO DE OBSERVACIONES**

Hace referencia a determinar el número de observaciones tomadas por tratamiento y unidad experimental. Siguiendo uno de los principios básicos del diseño de experimentos, el cual hace consiste en realizar varias observaciones por cada nivel de tratamiento con el fin de disminuir los errores de medida y las influencias de variables no controlables.

### **3.3.6 DEFINIR LAS UNIDADES EXPERIMENTALES SOBRE LAS QUE SE VAN A APLICAR LOS TRATAMIENTOS**

El experimentador está limitado a la disponibilidad de material con el cual debe realizar el estudio y teniendo en cuenta que una de las principales causas del error experimental, es la variabilidad existente entre las unidades experimentales que se les aplica un mismo tratamiento, aunque esta variabilidad es imposible evitarla, se puede disminuir en el momento de seleccionar el material experimental lo más homogéneo posible; sin dejar de lado el tamaño y la forma de la unidad experimental, siendo estos otros aspectos claves en el momento de su selección, sin embargo, los efectos de estos últimos pueden variar dependiendo de las exigencias del problema.

### **3.3.7 DETERMINAR LA MANERA DE ALEATORIZAR**

La estimación del error experimental se obtiene comparando las unidades experimentales tratadas de manera similar. Para que esta estimación sea válida, es necesario garantizar que las unidades experimentales, tratadas de manera

similar, no sean diferenciables de manera relevante de las unidades experimentales tratadas de manera distinta.

La aleatorización romperá cualquier patrón asociado con fuentes de variación desconocidas. Esto provee la seguridad de haber asignado adecuadamente estas fuentes de variación, las cuales deben ceñirse a normas donde el experimentador no tiene ni el tiempo ni el conocimiento para investigar, pero que de otra forma, podrían conducir a conclusiones erradas.

### **3.3.8 COMPROBAR LA CAPACIDAD DEL EXPERIMENTO CON RELACIÓN A LAS EXIGENCIAS DE LA HIPOTESIS PLANTEADA**

La técnica experimental es responsabilidad del experimentador y debe ser siempre examinada para asegurar que esta sea lo más precisa posible.

En la mayoría de ocasiones, la variabilidad asociada con una técnica determinada es relativamente pequeña, sin embargo existen casos, donde los errores de técnica aumentan considerablemente la variabilidad, en caso de presentarse esta situación, es recomendable realizar un análisis de la aptitud de cada uno de los pasos anteriores.

### **3.3.9 REALIZAR EL EXPERIMENTO**

Creadas las condiciones experimentales se procederá a ejecutar proceso de muestreo y recolección de datos de las observaciones sobre las unidades experimentales, teniendo la precaución en introducir otras variables incontrolables que puedan afectar el comportamiento de la variable dependiente.

Si llegado el caso, surgen situaciones, no consideradas durante el diseño del experimento; que alteren de manera significativa los propósitos del experimento, es necesario tenerlos en cuenta en el momento que se realice el análisis de datos.

### **3.3.10 INTERPRETAR LOS RESULTADOS**

En esta etapa, finalmente el experimentador ha recolectado los datos suficientes para decidir si la hipótesis es aceptada o rechazada mediante un adecuado examen mediante modelos estadísticos y para esto existen diferentes programas computacionales que realizan dichas pruebas de hipótesis.

Es importante aclarar que en el momento de interpretar los resultados lo que se busca no es describir el problema mediante una expresión matemática sino proporcionar pautas para validar los resultados obtenidos, determinando los errores y así permitiendo llegar a conclusiones sólidas acerca de la hipótesis inicial.

### **3.3.11 CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES**

Hecho el análisis de los datos, el experimentador está en capacidad de extraer conclusiones sobre los resultados. Las deducciones estadísticas deben ser físicamente interpretadas.

Las recomendaciones deben de hacerse con base en los resultados. En la presentación de estos se deben evitar el empleo de terminología estadística compleja y en lo posible presentar los resultados de manera simple. La elaboración de gráficos y tablas evita la redacción de resultados y recomendaciones extensas y confusas.

### **3.4 SELECCIÓN CASOS DE ESTUDIO**

El desarrollo del tercer objetivo de este trabajo de grado, estudia la incidencia de la metodología de planeación de pruebas, anteriormente descrita, sobre tres (3) proyectos de grado que hayan sido entregados a la escuela en años anteriores.

Ninguno de estos trabajos de grado han sido seleccionados específicamente para llevar a cabo el experimento, los requisitos de selección comprendían: El hecho de ser trabajos de grado de Ingeniería Electrónica de la E3T, la modalidad del trabajo fuese de desarrollo hardware, su fecha de entrega no inferior al año 2005 y que dentro del informe final se encontrara explícita la estrategia de experimentación utilizada, a fin de realizar una comparación entre la realizada y la planteada por la metodología.

Después de hacer una primera selección de casos de estudio que cumplieran con las condiciones anteriores, se escogieron finalmente tres trabajos de grado bajo el criterio que la estrategia de experimentación fuera diferentes para cada uno de ellos. De esta forma los casos seleccionados para estudiar la incidencia de la metodología de diseño de experimentos y poder realizar su posterior análisis, fueron:

### 3.4.1 CASO # 1: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA MEDICION Y DETECCIÓN DE HUMEDAD RELATIVA<sup>30</sup>

- Análisis del problema:

Es necesario confirmar el correcto funcionamiento del dispositivo diseñado, para esto se realizaran una serie de medidas de la humedad relativa del entorno y seguido a esto se verificará la precisión y la confiabilidad de este.

- Hipótesis:

Se ha diseñado un dispositivo específicamente para medir la humedad relativa cuya la precisión debe estar alrededor de un 98%.

- Variables a tener en cuenta:

La variable dependiente es la **humedad relativa** y se realizaran una serie de medidas, con el dispositivo diseñado, dentro de un terreno establecido.

Las variables independientes a tener en cuenta son: el **estado del clima** en el momento de las pruebas, el cual idealmente debería permanecer constante, adicionalmente, **el lugar y la distancia entre las medidas** ya que si están muy separadas una de la otra, la humedad puede variar entre un punto y otro por diferentes factores, entre ellos la vegetación presente, puntos calientes por presencia de radiación solar, aires acondicionados, entre otros.

- Definición de tratamientos y unidad experimental.

A fin de disminuir de manera significativa la influencia de las variables independientes mencionadas anteriormente y aprovechando la disponibilidad

---

<sup>30</sup> Trabajo de grado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA MEDICION Y DETECCIÓN DE HUMEDAD RELATIVA**” autores: Gomez Rios, Karol Armando; Fajardo Ariza Luis Enyerlook. Año 2007.

de un equipo certificado para realizar estas mediciones, se van a realizar dos tratamientos, uno por cada equipo, a la menor distancia posible entre ellos por cada medida.

Como la función del dispositivo es la medición de la humedad relativa, siendo este un factor importante para el confort del ser humano, la selección del lugar donde se va a efectuar la toma de datos no requiere de mayores condiciones específicas solo que sea un espacio de fácil acceso, adicionalmente el dispositivo debe estar en condiciones de medir y detectar la humedad relativa en cualquier entorno.

- Tamaño de la muestra:

Para validar los datos obtenidos de las medidas realizadas con el dispositivo se realiza la comparación entre ellos, aspirando a obtener una precisión del 98% con un intervalo de confianza  $\alpha = 0.02$ .

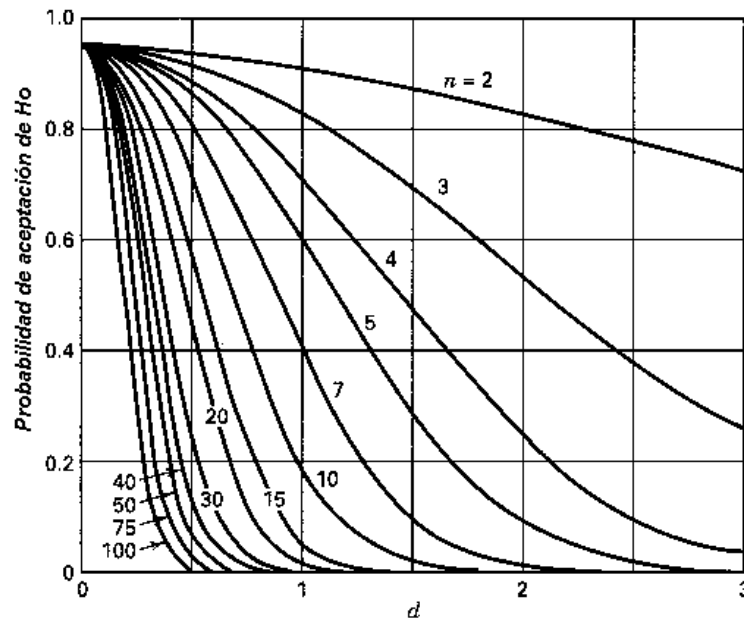
Estableciendo que la diferencia promedio entre las dos medidas es de 0.3 unidades, se puede hallar el parámetro  $d$  correspondiente al eje horizontal de las curvas de operación característica ver

Figura 6.

$$d = \frac{|u_1 - u_2|}{2\sigma} = \frac{0.3}{2\sigma} = \frac{0.15}{\sigma}$$

Para obtener el valor del parámetro  $d$ , es importante conocer  $\sigma$  o en su defecto suponerlo de acuerdo a la experiencia que se tenga del comportamiento de la variable respuesta.

Figura 6. Curva de operación característica para la prueba  $t$  de dos colas con  $\alpha=0.003$ .



Fuente: *Annals of Mathematical Statics*, C.L. Ferris, F.E Grubbs y C.L. Weaver, 1973, pag 35

$$n = \frac{n^* + 1}{2}$$

Donde  $n$  será el tamaño de pruebas por cada uno de los equipos, obteniendo finalmente el número de muestras que se realizaran en el experimento.

- Manera de Aleatorizar:

A fin de utilizar la unidad experimental seleccionada de la manera más homogénea, se realizaran medidas con los dos equipos simultáneamente distanciados entre sí lo más mínimo posible, abarcando el lugar en diversos puntos, de esta forma se tendrá seguridad que la diferencia entre las humedades relativas medidas por los dos equipos no difieren significativamente.

- Realización del experimento:

En los pasos anteriores se seleccionaron las condiciones más adecuadas para realizar este experimento que tiene como fin comprobar la precisión de un equipo diseñado, para efectos de organización de consignaran los datos como se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 6. Esquema para la tabulación de los datos obtenidos caso # 1**

Medida	Equipo diseñado	Equipo certificado	Diferencia de medidas
1	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> - B <sub>1</sub> = d <sub>1</sub>
2	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> - B <sub>2</sub> = d <sub>2</sub>
⋮	⋮	⋮	⋮
N	A <sub>n</sub>	B <sub>n</sub>	A <sub>n</sub> - B <sub>n</sub> = d <sub>n</sub>

- Análisis de resultados:

Primero es necesario hallar el punto estadístico para probar la hipótesis:

$$t_0 = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}}$$

donde:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_j$$

$$s_d = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Con este parámetro de validación se realiza el siguiente análisis: La hipótesis de igualdad de medidas entre los equipos se rechaza si  $|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$ , para este valor ver Anexo A.

- Observaciones y conclusiones:<sup>31</sup>

Después de aplicar la metodología de diseño de experimentos a este trabajo de grado se observó, una gran diferencia en el manejo de la estrategia. Al ser apoyada por métodos de diseño, se estableció un número determinado de pruebas.

A partir, de un análisis de la diferencia de medidas entre los dos equipos utilizados; se estableció un parámetro de validación de los datos obtenidos, punto de comparación frente a un valor estadísticamente establecido se puede comprobar el correcto funcionamiento del equipo diseñado.

### **3.4.2 CASO # 2: DISEÑO DE TELEMETRÍA INALAMBRICO PARA OPTIMIZAR LA LECTURA DE CONSUMOS EN LOS MEDIDORES DE AGUA<sup>32</sup>**

- Análisis del problema:

Apoyados en la tecnología GSM/GPRS, dos estudiantes de ingeniería electrónica de la escuela de eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, diseñaron un sistema de telemetría que permite la automatización de la lectura de consumo en los medidores de agua, generando una significativa reducción de costos en la realización de este proceso, de igual manera crear un entorno al consumidor donde pueda interactuar con su consumo y/o facturación.

---

<sup>31</sup> Esta comparación fue realizada frente al trabajo de grado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA MEDICION Y DETECCIÓN DE HUMEDAD RELATIVA**” autores: Gomez Rios, Karol Armando; Fajardo Ariza Luis Enyerlook. Año 2007, la estrategia de experimentación se encuentra descrita en las páginas 30 – 36.

<sup>32</sup> Trabajo de grado “**DISEÑO DE TELEMETRÍA INALAMBRICO PARA OPTIMIZAR LA LECTURA DE CONSUMOS EN LOS MEDIDORES DE AGUA**” autores: Álvarez Mercado, Mario Rafael; Ballesteros Corzo, Edison. Año 2007.

- Hipótesis:

Con el fin de reducir los errores en el proceso de recolección de datos “manual”, realizado por la empresa prestadora del servicio de agua, en la lectura de consumo de los medidores, el sistema diseñado, presenta una alta confiabilidad en cuanto a su cobertura, la transmisión y recolección de los datos, de esta manera será comprobado que sin importar el sector donde esté ubicado el modem, la transmisión de datos se realiza satisfactoriamente.

- Variables a tener en cuenta:

Como variable dependiente esta la **velocidad de transmisión** de los datos a fin de conocer el comportamiento de esta se realizarán medidas desde diferentes sectores de la ciudad, para esto es necesario tener a plenitud el sistema de telemetría montado.

La variable independiente influyente en estas pruebas es la **ubicación del modem**, el cual estará en diferentes lugares de la ciudad a fin de establecer a su vez un rango de cobertura aceptable.

- Definición de tratamientos y unidad experimental.

A fin de estudiar la tasa de transferencia de datos y a su vez la cobertura del sistema se realizará un experimento el cual será efectuado desde diferentes sectores de la ciudad a fin de establecer si existe una diferencia significativa entre las velocidades de transferencia entre los puntos,

Se hará un diseño unifactorial en el cual estará presente el sector donde estará ubicado el modem, la serie de envío de datos y su respectivo tiempo de espera de llegada al destino.

- Tamaño de la muestra:

Para este experimento determinaremos el tamaño muestral a partir del intervalo de confianza deseado que en este caso es de un 98% para una

diferencia en los tiempos de +2,5 segundos, para realizar la determinación del tamaño de la muestra, es necesario estimar previamente un cuadrado medio del error  $M_{SE}$ , con estos datos podemos determinar el tamaño de muestra a partir de la siguiente ecuación.

$$+t_{\frac{\alpha}{2}, N-n} \sqrt{\frac{2M_{SE}}{n}}$$

Mediante una serie de iteraciones del número de muestras, a partir de esta ecuación, podemos obtener el intervalo de confianza deseado.

Si partimos del hecho que  $M_{SE}$  es aproximadamente 1,25 segundos y ubicaremos el modem en 8 barrios de la ciudad podemos determinar n:

Con n=3

$$+3,467 \sqrt{\frac{2 * (1,25)^2}{3}} = 3,53$$

Con n=5

$$+3,307 \sqrt{\frac{2 * (1,25)^2}{5}} = +2,61$$

Con n=7

$$+3,232 \sqrt{\frac{2 * (1,25)^2}{7}} = +2,16$$

De esta forma con un numero de 7 replicas por cada nivel en el sector donde se encuentra el modem, se tiene el rango de confiabilidad deseado.

- Manera de aleatorizar:

En el momento de la prueba por disponibilidad de equipos transmisores se tomaran muestras por cada sector de manera independiente, Como se

tiene control en el tiempo de envío de los datos, no se tendrá una frecuencia fija de envío.

- Realización del experimento:

En los pasos anteriores se seleccionaron las condiciones más adecuadas para realizar este experimento que tiene como fin comprobar que la transmisión de los datos no se ve afectada por el sector donde se encuentra ubicado el modem transmisor, de esta manera se logrará determinar el rango de cobertura del diseño de telemetría. Para efectos de organización de consignaran los datos de la manera como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 7. Esquema para la tabulación de los datos obtenidos caso # 2**

No. de envío	Sector 1	Sector 2	...	Sector n
1	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	...	N <sub>1</sub>
2	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	...	N <sub>2</sub>
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7	A <sub>7</sub>	B <sub>7</sub>	...	T <sub>7</sub>

- Análisis de los datos:

Finalmente se realiza el enfrentamiento entre los valores de los estadísticos de prueba  $F_0$  y los valores obtenidos de las tablas, ver

Anexo , las hipótesis se rechazan o se detentan interacciones entre los factores si:

$$F_0 > F_{\alpha, gln, gld}$$

donde: gln: grados de libertad del numerador

gld: grados de libertad del denominador

- Observaciones y conclusiones<sup>33</sup>:

La estrategia utilizada por los estudiantes, está basada en un análisis independiente de cada uno de los sectores donde se ubica el modem y seguida de una comparación entre los tiempos promedio de cada uno de los sectores. El modelo propuesto por la metodología, integra los diferentes sectores realizando inicialmente un análisis entre los siete envíos de datos por cada sector y en seguida realiza un análisis de varianza, permitiendo así obtener parámetros de validación que es enfrentado a un punto porcentual, estadísticamente establecido por las condiciones del experimento, logrando finalmente una aceptación o rechazo de la hipótesis.

De igual manera, cabe resaltar que al aplicar la metodología se tiene un numero de envió de datos mucho menor al aplicado en la estrategia utilizada por los diseñadores del equipo, situación que mejorara tanto en el tiempo de realización de las pruebas como en el momento de realizar el análisis de los datos.

---

<sup>33</sup> Esta comparación fue realizada frente al trabajo de grado “**DISEÑO DE TELEMETRÍA INALAMBRICO PARA OPTIMIZAR LA LECTURA DE CONSUMOS EN LOS MEDIDORES DE AGUA**” autores: Álvarez Mercado, Mario Rafael; Ballesteros Corzo, Edison. Año 2007., la estrategia de experimentación se encuentra descrita en las páginas 98 – 129.

### 3.4.3 CASO # 3: DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UNA ALARMA ACTIVADA POR DISTANCIA<sup>34</sup>

- Análisis del problema:

Dos estudiantes de ingeniería electrónica, como trabajo de grado, realizaron el diseño e implementación de una alarma activada por distancia y están interesados en caracterizar el comportamiento de este con el fin de validar el correcto funcionamiento del dispositivo diseñado, a su vez, desean conocer cuáles son los principales factores que influyen en este.

- Hipótesis:

La alarma está diseñada para que se active cuando los dos dispositivos que la conforman, se encuentran distanciados entre sí un rango específico y se apague cuando se encuentre nuevamente dentro del rango de cobertura. Adicionalmente se quiere comprobar si es necesario el uso de la antena ya que de no ser así, se reducirá el tamaño beneficiando a esto la portabilidad del dispositivo.

- Variables a tener en cuenta:

La variable dependiente es la potencia de la señal detectada por los dispositivos, para medirla, se utiliza el analizador de espectros del laboratorio de comunicaciones de la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

---

<sup>34</sup> Trabajo de grado “**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UNA ALARMA ACTIVADA POR DISTANCIA**” autores: Mejía Ballesteros, Rolando Augusto; Quiroga Hernández, Edwin Harrison. Año 2008.

Las variables independientes que afectan esta caracterización son: la distancia entre el receptor y transmisor, al igual si entre ellos se encuentra algún obstáculo que esté afectando la transmisión de la señal y finalmente la existencia de la antena en el equipo siendo esta también un factor de diseño importante.

- Definición de tratamientos y unidad experimental.

Como las tres variables a controlar son la distancia entre los dispositivos, la existencia de la antena y el obstáculo entre ellos. Para este caso la antena y el obstáculo solo tienen dos niveles cada uno, es la distancia a la que se le debe dar una cantidad de niveles significativos con el fin de determinar el rango de operación del dispositivo.

Para este caso, una estrategia de experimentación es la de variación de un efecto a la vez, sin embargo pueden existir interacciones entre las variables lo que implica la necesidad de realizar un análisis mediante un diseño factorial de tres factores, adicionalmente que la eficiencia de este diseño experimental es el doble a la eficiencia de la variación de un factor a la vez.

- Tamaño de la muestra:

Para este modelo de diseño experimental, el mínimo de pruebas requeridas son dos replicas para poder determinar la suma de cuadrados debida al error por la interacciones de los factores presentes en el experimento.

De esta forma se tienen las dos variables cualitativas del experimento las cuales solo tienen dos niveles: la existencia de la antena en el dispositivo y la presencia de un obstáculo entre el receptor y el emisor, por otra parte se tiene control en la distancia entre los dispositivos lo que permite determinar tres (3) niveles para este caso. Ahora bien, con un mínimo número de replicas por cada tratamiento se tiene un total de 24 corridas, identificadas con la letra C,

cantidad suficiente para poder realizar un análisis del comportamiento del equipo y la interacción entre las variables.

- Manera de aleatorizar:

Para realizar la toma de medidas y uno de los factores influyentes es la distancia, se realizaran repeticiones a igual distancia pero en diferente ángulo de orientación.

- Realizar experimento:

En los pasos anteriores se seleccionaron las condiciones más adecuadas para realizar este experimento que tiene como fin comprobar que la alarma es activada a una distancia determinada entre los dispositivos. Para efectos de organización y facilitar el análisis posterior, se consignaran los datos como se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 8. Esquema para la tabulación de los datos obtenidos caso # 3**

Distancia	Con antena(A <sub>1</sub> )				Sin antena(A <sub>2</sub> )				y <sub>i..</sub>
	Con obstáculo (B <sub>1</sub> )		Sin obstáculo (B <sub>2</sub> )		Con obstáculo (B <sub>1</sub> )		Sin obstáculo (B <sub>2</sub> )		
C <sub>1</sub>	D1	E1=	D7	E4=	D13	E7=	D19	E10=	G1=E1+E4+E7+E10
	D2	D1+D2	D8	D7+D8	D14	D13+D14	D20	D19+D20	
C <sub>2</sub>	D3	E2=	D9	E5=	D15	E8=	D21	E11=	G2=E2+E5+E8+E11
	D4	D3+D4	D10	D9+D10	D16	D15+D16	D22	D21+D22	
C <sub>3</sub>	D5	E3=	D11	E6=	D17	E9=	D23	E12=	G3=E3+E6+E9+E12
	D6	D5+D6	D12	D11+D12	D18	D17+D18	D24	D23+D24	
Totales a*b	F1=E1+E2+E3		F2=E4+E5+E6		F3=E7+E8+E9		F4=E10+E11+E12		Lt=G1+G2+G3
y <sub>.j.</sub>	H1=F1+F2				H2=F3+F4				

- Análisis de los resultados:

A continuación en la tabla 11, se muestra a manera de resumen el análisis de varianza para un modelo factorial de tres factores.

**Tabla 9. Analisis de varianza para el modelo de tres factores.**

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

Fuente: MONTGOMERY, Douglas C. Design And Análisis Of Experiments. Editorial John Wiley & Sons. (2001) pag 195.

Finalmente se realiza el enfrentamiento entre los valores de los estadísticos de prueba F<sub>0</sub> y los valores obtenidos de las tablas, ver

Anexo B, las hipótesis se rechazan o se detentan interacciones entre los factores si:

$$F_0 > F_{\alpha, gln, gld}$$

donde: gln: grados de libertad del numerador

gld: grados de libertad del denominador

- Observaciones y conclusiones<sup>35</sup>:

Con el diseño propuesto para este caso, se tiene un mejor manejo de las variables influyentes en el funcionamiento de la alarma. Al aplicar este modelo y realizar un análisis entre las interacciones de los factores, se puede comprobar si la existencia o no de la antena es relevante para el funcionamiento; de igual manera, si la presencia de un obstáculo entre los dispositivos hace que el funcionamiento de este varíe, aspecto de suma importancia por su aplicación, esta no necesariamente es en un campo libre de cuerpos que se atraviesen entre la comunicación de del equipo.

El uso de esta metodología permitió estudiar el rango de operación del equipo y determinar las distancias efectivas para activar la alarma, finalmente se pudo observar cuales son las circunstancias críticas de operación del equipo, hecho que es complicado analizar con la estrategia de un factor a la vez, aplicada por sus diseñadores en el momento de verificación y calibración.

---

<sup>35</sup> Esta comparación fue realizada frente al trabajo de grado “**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UNA ALARMA ACTIVADA POR DISTANCIA**” autores: Mejía Ballesteros, Rolando Augusto; Quiroga Hernández, Edwin Harrison. Año 2008., la estrategia de experimentación se encuentra descrita en las páginas 25 – 33.

#### 4. CONCLUSIONES

Habiéndose cumplido con los objetivos planteados en la propuesta, se llegaron a las siguientes conclusiones.

- Se comprobó que los estudiantes del programa académico de ingeniería electrónica de la E3T, utilizan estrategias experimentales poco eficientes en el momento de diseñar y validar los datos recolectados, durante un proceso experimental.
- Se identificaron las principales dificultades, al aplicar las estrategias experimentales tradicionalmente utilizadas por los estudiantes de ingeniería electrónica, encontrándose que son mejoradas notablemente mediante la aplicación de conocimientos y técnicas DOE.
- Mediante la revisión bibliográfica sobre la aplicación de diseño de experimentos, en diferentes campos de investigación; se establecieron las bases para elaborar una metodología de diseño de experimentos, a fin de mejorar el desarrollo de la etapa experimental durante el período de formación profesional del Ingeniero Electrónico de la E3T, creando una mentalidad encaminada a obtener resultados verificables y validables frente a parámetros estadísticos y no empíricos.
- Desde el inicio de este trabajo de grado, se ha planteado la aplicación de la metodología diseñada como una herramienta adicional para los estudiantes que se encuentran desarrollando trabajos de grado, cuyo objetivo final es la

creación o innovación hardware. A pesar de esto, es interesante analizar su aplicación en casos particulares, como las pruebas de laboratorios que hacen parte de las diferentes asignaturas del programa académico.

- La elaboración del documento guía para el diseño, ejecución y análisis de las pruebas, tiene la finalidad de que para futuros trabajos de grado desarrollados en la E3T, apliquen conceptos básicos de DOE al proceso de verificación, calibración y puesta a punto; con el fin de asegurar una correcta validación del funcionamiento de la herramienta hardware diseñada.
- Al aplicar la metodología diseñada a los casos de estudio seleccionados, se obtuvieron mejoras en los modelos experimentales diseñados y métodos de validación de datos obtenidos, frente a las estrategias utilizadas; de igual manera, se apreció que, apoyados en los conceptos previos de probabilidad y estadística; es fácilmente adaptable esta metodología en la formación de los ingenieros electrónicos, requiriéndose una capacitación en DOE.

## **5. RECOMENDACIONES**

- Es recomendable que nuestra escuela, adopte un modelo de estrategia de experimentación y análisis de datos obtenidos en las pruebas, alejado de puntos de validación intuitivas, el cual permita establecer parámetros estadísticos que corroboren el funcionamiento de los diseños propuestos por los estudiantes en sus trabajos de grado, logrando dispositivos con un funcionamiento de alta confiabilidad.

- Se recomienda que la E3T proponga para sus estudiantes de pregrado un curso de “Diseño y Análisis de Experimentos”, orientado a problemas de ingeniería electrónica, a fin de familiarizarlos en el ámbito y concepto de DOE, para ser aplicado en los procesos experimentales, de manera tal que estos sean realizados, analizados y verificados a partir de parámetros estadísticamente verificables, apoyados en la probabilidad y la estadística, junto con la metodología de DOE descrita en este trabajo de grado.
- Analizando los beneficios obtenidos al aplicar esta metodología a los diferentes casos de estudio, se propone que esta sea implementada al interior de diferentes asignaturas del programa de Ingeniería Electrónica, donde el estudiante deba realizar pruebas experimentales.

## 6. BIBLIOGRAFIA

### Libros y folletos

- [1] **MONTGOMERY, Douglas C.** Design And Análisis Of Experiments. Editorial John Wiley & Sons. (2001)
- [2] **KUEHL, Robert O.** Diseño De Experimentos. Segunda edición. Editorial Thompson Learning
- [3] **COX, D. R, N. Reid.** The Theory of the Design of Experiments. Editorial CHAPMAN & HALL/CRC
- [4] **HICKS, C.R.y TURNER, K.V** Fundamental Concepts in the Design of Experiments. Oxford University Press, 1999, 5ª ed.
- [5] **LOPEZ L.: BUSTOS, I.** Diseño de Experimentos con aplicaciones en Biología- Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Naturales, Departamento de Matemáticas y Estadística. Santafé de Bogotá, Febrero de 1982.
- [6] **ROBERT L. Mason, Richard F. Gunst, James L. Hess.** Statistical Design and Analysis of Experiments, with applications to engineering and science. Editorial John Wiley & Sons. Inc. 2003
- [7] **ZIVORAD R. LAZIC,** Design of Experiments in Chemical Engineering, 2004.
- [8] **KLAUS Hinkelmann, Oscar Kempthorne.** Design and Analysis of Experiments, 62edici 2, Editorial John Wiley & Sons. Inc. 2005
- [9] **FABILA Carrera, G.** Diseño y análisis de experimentos industriales, Universidad Iberoamericana Santa Fe Ciudad De Mexico, (1998)

### Artículos de publicaciones seriadas

- [10] **FISHER, Ronald Aylmer,** The Arrangement of Field Experiments, publicado en Journal of the Ministry of Agriculture of Great Britain, 33: 503-513 (1926)
- [11] **GAIA Franceschini, Sandro Macchietto,** "Model-based design of experiments for parameter precision: State of the art", *Chemical Engineering Science* 63 (2008) 4846 – 4872
- [12] **DIZZA Bursztyna, David M. Steinberg,** "Comparison of designs for computer experiments", *Journal of Statistical Planning and Inference* 136 (2006) 1103 – 1119
- [13] **A. Brown,** "Design Experiments: Theoretical and Methodological Challenges in Creating Complex Interventions in Classroom Settings," *Journal of the Learning Sciences*, 2(2), 1992, 141-178.
- [14] **Nikolay Strigul, Holger Dette, Viatcheslav B. Melas,** "A practical guide for optimal designs of experiments in the Monod model", *Environmental Modelling & Software* 24 (2009) 1019–1026

- [15] **GAIA Franceschini, Sandro Macchietto**, "A numerical experiment design study on a biodiesel production process", *Computer Aided Chemical Engineering Volume 20, Part 1, 2005, Pages 349-354*
- [16] **Nam-Hoon Kim, Min-Ho Choi, Sang-Yong Kim, Eui-Goo Chang**, "Design of experiment (DOE) method considering interaction effect of process parameters for optimization of copper chemical mechanical polishing (CMP) process" *Microelectronic Engineering Volume 83, Issue 3, March 2006, Pages 506-512*
- [17] **R. Rikards, A. Chate and G. Gailis**, "Identification of elastic properties of laminates based on experiment design", *International Journal of Solids and Structures Volume 38, Issues 30-31, July 2001, Pages 5097-5115*

### **Trabajos de grado**

- [18] **Mejía Ballesteros, Rolando Augusto; Quiroga Hernández, Edwin Harrison**, *Diseño de una alarma activada por distancia, 2008*, Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicomecánicas.
- [19] **Álvarez Mercado, Mario Rafael; Ballesteros Corzo, Edison**, *Diseño de telemetría para optimizar la lectura de consumos en los medidores de agua, 2007*, Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicomecánicas.
- [20] **Gomez Rios, Karol Armando; Fajardo Ariza Luis Enyerlook**. *Diseño y construcción de un prototipo para y detección de humedad relativa, 2007* Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicomecánicas.

### Anexo A. Puntos porcentuales de la distribución $t_0$ .

$\nu$	$\alpha$									
	.40	.25	.10	.05	.025	.01	.005	.0025	.001	.0005
1	.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	127.32	318.31	636.62
2	.289	.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	23.326	31.598
3	.277	.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.213	12.924
4	.271	.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	.267	.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	.265	.727	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	.263	.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.019	4.785	5.408
8	.262	.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	.261	.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	.260	.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	.260	.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	.259	.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	.259	.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	.258	.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	.258	.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	.258	.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	.257	.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	.257	.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	.257	.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	.257	.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	.257	.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	.256	.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	.256	.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767
24	.256	.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	.256	.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	.256	.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	.256	.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	.256	.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	.256	.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	.256	.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	.255	.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
60	.254	.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
120	.254	.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	2.860	3.160	3.373
$\infty$	.253	.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

$\nu$ =Grados de libertad.

Tomada de MONTGOMERY, Douglas C. *Design And Análisis Of Experiments*. Editorial John Wiley & Sons. (2001)

**Anexo B.** Puntos porcentuales de la distribución  $F_0$ .

$F_{0.25, v_1, v_2}$

$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40
1	5.83	7.50	8.20	8.58	8.82	8.98	9.10	9.19	9.26	9.32	9.41	9.49	9.58	9.63	9.67	9.71
2	2.57	3.00	3.15	3.23	3.28	3.31	3.34	3.35	3.37	3.38	3.39	3.41	3.43	3.43	3.44	3.45
3	2.02	2.28	2.36	2.39	2.41	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44	2.45	2.46	2.46	2.46	2.47	2.47
4	1.81	2.00	2.05	2.06	2.07	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
5	1.69	1.85	1.88	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.88	1.88	1.88	1.88
6	1.62	1.76	1.78	1.79	1.79	1.78	1.78	1.78	1.77	1.77	1.77	1.76	1.76	1.75	1.75	1.75
7	1.57	1.70	1.72	1.72	1.71	1.71	1.70	1.70	1.70	1.69	1.68	1.68	1.67	1.67	1.66	1.66
8	1.54	1.66	1.67	1.66	1.66	1.65	1.64	1.64	1.63	1.63	1.62	1.62	1.61	1.60	1.60	1.59
9	1.51	1.62	1.63	1.63	1.62	1.61	1.60	1.60	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54
10	1.49	1.60	1.60	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.52	1.51	1.51
11	1.47	1.58	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53	1.53	1.52	1.51	1.50	1.49	1.49	1.48	1.47
12	1.46	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.45
13	1.45	1.55	1.55	1.53	1.52	1.51	1.50	1.49	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42
14	1.44	1.53	1.53	1.52	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41
15	1.43	1.52	1.52	1.51	1.49	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45	1.44	1.43	1.41	1.41	1.40	1.39
16	1.42	1.51	1.51	1.50	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37
17	1.42	1.51	1.50	1.49	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36
18	1.41	1.50	1.49	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35
19	1.41	1.49	1.49	1.47	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.40	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34
20	1.40	1.49	1.48	1.47	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33
21	1.40	1.48	1.48	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32
22	1.40	1.48	1.47	1.45	1.44	1.42	1.41	1.40	1.39	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31
23	1.39	1.47	1.47	1.45	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31
24	1.39	1.47	1.46	1.44	1.43	1.41	1.40	1.39	1.38	1.38	1.36	1.35	1.33	1.32	1.31	1.30
25	1.39	1.47	1.46	1.44	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31	1.29
26	1.38	1.46	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.37	1.35	1.34	1.32	1.31	1.30	1.29
27	1.38	1.46	1.45	1.43	1.42	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.33	1.32	1.31	1.30	1.28
28	1.38	1.46	1.45	1.43	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.30	1.29	1.28
29	1.38	1.45	1.45	1.43	1.41	1.40	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.31	1.30	1.29	1.27
30	1.38	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.30	1.29	1.28	1.27
40	1.36	1.44	1.42	1.40	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.31	1.30	1.28	1.26	1.25	1.24
60	1.35	1.42	1.41	1.38	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.27	1.25	1.24	1.22	1.21
120	1.34	1.40	1.39	1.37	1.35	1.33	1.31	1.30	1.29	1.28	1.26	1.24	1.22	1.21	1.19	1.18
$\infty$	1.32	1.39	1.37	1.35	1.33	1.31	1.29	1.28	1.27	1.25	1.24	1.22	1.19	1.18	1.16	1.14

$v = \text{grados de libertad}$   
 Tomado de MONTGOMERY, Douglas C. Design And Analysis Of Experiments. Editorial John Wiley & Sons. (2001)

Anexo B. Puntos porcentuales de la distribución  $F_0$ . (continuación)

$F_{0.10, \nu_1, \nu_2}$

$\nu_1 \backslash \nu_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.86	60.19	60.71	61.22	61.74	62.00	62.26	62.53	62.79	63.06	63.33
2	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38	9.39	9.41	9.42	9.44	9.45	9.46	9.47	9.47	9.48	9.49
3	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24	5.23	5.22	5.20	5.18	5.18	5.17	5.16	5.15	5.14	5.13
4	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94	3.92	3.90	3.87	3.84	3.83	3.82	3.80	3.79	3.78	3.76
5	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32	3.30	3.27	3.24	3.21	3.19	3.17	3.16	3.14	3.12	3.10
6	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96	2.94	2.90	2.87	2.84	2.82	2.80	2.78	2.76	2.74	2.72
7	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72	2.70	2.67	2.63	2.59	2.58	2.56	2.54	2.51	2.49	2.47
8	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56	2.54	2.50	2.46	2.42	2.40	2.38	2.36	2.34	2.32	2.29
9	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44	2.42	2.38	2.34	2.30	2.28	2.25	2.23	2.21	2.18	2.16
10	3.29	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35	2.32	2.28	2.24	2.20	2.18	2.16	2.13	2.11	2.08	2.06
11	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25	2.21	2.17	2.12	2.10	2.08	2.05	2.03	2.00	1.97
12	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19	2.15	2.10	2.06	2.04	2.01	1.99	1.96	1.93	1.90
13	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14	2.10	2.05	2.01	1.98	1.96	1.93	1.90	1.88	1.85
14	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10	2.05	2.01	1.96	1.94	1.91	1.89	1.86	1.83	1.80
15	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06	2.02	1.97	1.92	1.90	1.87	1.85	1.82	1.79	1.76
16	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	1.99	1.94	1.89	1.87	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72
17	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00	1.96	1.91	1.86	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69
18	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98	1.93	1.89	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66
19	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98	1.96	1.91	1.86	1.81	1.79	1.76	1.73	1.70	1.67	1.63
20	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96	1.94	1.89	1.84	1.79	1.77	1.74	1.71	1.68	1.64	1.61
21	2.96	2.57	2.36	2.23	2.14	2.08	2.02	1.98	1.95	1.92	1.87	1.83	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66	1.62	1.59
22	2.95	2.56	2.35	2.22	2.13	2.06	2.01	1.97	1.93	1.90	1.86	1.81	1.76	1.73	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57
23	2.94	2.55	2.34	2.21	2.11	2.05	1.99	1.96	1.92	1.89	1.84	1.80	1.74	1.72	1.69	1.66	1.62	1.59	1.55
24	2.93	2.54	2.33	2.19	2.10	2.04	1.98	1.94	1.91	1.88	1.83	1.78	1.73	1.70	1.67	1.64	1.61	1.57	1.53
25	2.92	2.53	2.32	2.18	2.09	2.02	1.97	1.93	1.89	1.87	1.82	1.77	1.72	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52
26	2.91	2.52	2.31	2.17	2.08	2.01	1.96	1.92	1.88	1.86	1.81	1.76	1.71	1.68	1.65	1.61	1.58	1.54	1.50
27	2.90	2.51	2.30	2.17	2.07	2.00	1.95	1.91	1.87	1.85	1.80	1.75	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57	1.53	1.49
28	2.89	2.50	2.29	2.16	2.06	2.00	1.94	1.90	1.87	1.84	1.79	1.74	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52	1.48
29	2.89	2.50	2.28	2.15	2.06	1.99	1.93	1.89	1.86	1.83	1.78	1.73	1.68	1.65	1.62	1.58	1.55	1.51	1.47
30	2.88	2.49	2.28	2.14	2.03	1.98	1.93	1.88	1.85	1.82	1.77	1.72	1.67	1.64	1.61	1.57	1.54	1.50	1.46
40	2.84	2.44	2.23	2.09	2.00	1.93	1.87	1.83	1.79	1.76	1.71	1.66	1.61	1.57	1.54	1.51	1.47	1.42	1.38
60	2.79	2.39	2.18	2.04	1.95	1.87	1.82	1.77	1.74	1.71	1.66	1.60	1.54	1.51	1.48	1.44	1.40	1.35	1.29
120	2.75	2.35	2.13	1.99	1.90	1.82	1.77	1.72	1.68	1.65	1.60	1.55	1.48	1.45	1.41	1.37	1.32	1.26	1.19
$\infty$	2.71	2.30	2.08	1.94	1.85	1.77	1.72	1.67	1.63	1.60	1.55	1.49	1.42	1.38	1.34	1.30	1.24	1.17	1.00

*Grados de libertad de denominador ( $\nu_2$ )*

**Anexo B. Puntos porcentuales de la distribución  $F_0$  (continuación)**

$n_2 \backslash n_1$	Grados de libertad del numerador ( $n_1$ )																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	647.8	799.5	864.2	899.6	921.8	937.1	948.2	956.7	963.3	968.6	976.7	984.9	993.1	997.2	1001	1006	1010	1014	1018
2	38.51	39.00	39.17	39.25	39.30	39.33	39.36	39.37	39.39	39.40	39.41	39.43	39.45	39.46	39.46	39.47	39.48	39.49	39.50
3	17.44	16.04	15.44	15.10	14.88	14.73	14.62	14.54	14.47	14.42	14.34	14.25	14.17	14.12	14.08	14.04	13.99	13.95	13.90
4	12.22	10.65	9.98	9.60	9.36	9.20	9.07	8.98	8.90	8.84	8.75	8.66	8.56	8.51	8.46	8.41	8.36	8.31	8.26
5	10.01	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.68	6.62	6.52	6.43	6.33	6.28	6.23	6.18	6.12	6.07	6.02
6	8.81	7.26	6.60	6.23	5.99	5.82	5.70	5.60	5.52	5.46	5.37	5.27	5.17	5.12	5.07	5.01	4.96	4.90	4.85
7	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.90	4.82	4.76	4.67	4.57	4.47	4.42	4.36	4.31	4.25	4.20	4.14
8	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.36	4.30	4.20	4.10	4.00	3.95	3.89	3.84	3.78	3.73	3.67
9	7.21	5.71	5.08	4.72	4.48	4.32	4.20	4.10	4.03	3.96	3.87	3.77	3.67	3.61	3.56	3.51	3.45	3.39	3.33
10	6.94	5.46	4.83	4.47	4.24	4.07	3.95	3.85	3.78	3.72	3.62	3.52	3.42	3.37	3.31	3.26	3.20	3.14	3.08
11	6.72	5.26	4.63	4.28	4.04	3.88	3.76	3.66	3.59	3.53	3.43	3.33	3.23	3.17	3.12	3.06	3.00	2.94	2.88
12	6.55	5.10	4.47	4.12	3.89	3.73	3.61	3.51	3.44	3.37	3.28	3.18	3.07	3.02	2.96	2.91	2.85	2.79	2.72
13	6.41	4.97	4.35	4.00	3.77	3.60	3.48	3.39	3.31	3.25	3.15	3.05	2.95	2.89	2.84	2.78	2.72	2.66	2.60
14	6.30	4.86	4.24	3.89	3.66	3.50	3.38	3.29	3.21	3.15	3.05	2.95	2.84	2.79	2.73	2.67	2.61	2.55	2.49
15	6.20	4.77	4.15	3.80	3.58	3.41	3.29	3.20	3.12	3.06	2.96	2.86	2.76	2.70	2.64	2.59	2.52	2.46	2.40
16	6.12	4.69	4.08	3.73	3.50	3.34	3.22	3.12	3.05	2.99	2.89	2.79	2.68	2.63	2.57	2.51	2.45	2.38	2.32
17	6.04	4.62	4.01	3.66	3.44	3.28	3.16	3.06	2.98	2.92	2.82	2.72	2.62	2.56	2.50	2.44	2.38	2.32	2.25
18	5.98	4.56	3.95	3.61	3.38	3.22	3.10	3.01	2.93	2.87	2.77	2.67	2.56	2.50	2.44	2.38	2.32	2.26	2.19
19	5.92	4.51	3.90	3.56	3.33	3.17	3.05	2.96	2.88	2.82	2.72	2.62	2.51	2.45	2.39	2.33	2.27	2.20	2.13
20	5.87	4.46	3.86	3.51	3.29	3.13	3.01	2.91	2.84	2.77	2.68	2.57	2.46	2.41	2.35	2.29	2.22	2.16	2.09
21	5.83	4.42	3.82	3.48	3.25	3.09	2.97	2.87	2.80	2.73	2.64	2.53	2.42	2.37	2.31	2.25	2.18	2.11	2.04
22	5.79	4.38	3.78	3.44	3.22	3.05	2.93	2.84	2.76	2.70	2.60	2.50	2.39	2.33	2.27	2.21	2.14	2.08	2.00
23	5.75	4.35	3.75	3.41	3.18	3.02	2.90	2.81	2.73	2.67	2.57	2.47	2.36	2.30	2.24	2.18	2.11	2.04	1.97
24	5.72	4.32	3.72	3.38	3.15	2.99	2.87	2.78	2.70	2.64	2.54	2.44	2.33	2.27	2.21	2.15	2.08	2.01	1.94
25	5.69	4.29	3.69	3.35	3.13	2.97	2.85	2.75	2.68	2.61	2.51	2.41	2.30	2.24	2.18	2.12	2.05	1.98	1.91
26	5.66	4.27	3.67	3.33	3.10	2.94	2.82	2.73	2.65	2.59	2.49	2.39	2.28	2.22	2.16	2.09	2.03	1.95	1.88
27	5.63	4.24	3.65	3.31	3.08	2.92	2.80	2.71	2.63	2.57	2.47	2.36	2.25	2.19	2.13	2.07	2.00	1.93	1.85
28	5.61	4.22	3.63	3.29	3.06	2.90	2.78	2.69	2.61	2.55	2.45	2.34	2.23	2.17	2.11	2.05	1.98	1.91	1.83
29	5.59	4.20	3.61	3.27	3.04	2.88	2.76	2.67	2.59	2.53	2.43	2.32	2.21	2.15	2.09	2.03	1.96	1.89	1.81
30	5.57	4.18	3.59	3.25	3.03	2.87	2.75	2.65	2.57	2.51	2.41	2.31	2.20	2.14	2.07	2.01	1.94	1.87	1.79
40	5.42	4.05	3.46	3.13	2.90	2.74	2.62	2.53	2.45	2.39	2.29	2.18	2.07	2.01	1.94	1.88	1.80	1.72	1.64
60	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.17	2.06	1.94	1.88	1.82	1.74	1.67	1.58	1.48
120	5.15	3.80	3.23	2.89	2.67	2.52	2.39	2.30	2.22	2.16	2.05	1.94	1.82	1.76	1.69	1.61	1.53	1.43	1.31
$\infty$	5.02	3.69	3.12	2.79	2.57	2.41	2.29	2.19	2.11	2.05	1.94	1.83	1.71	1.64	1.57	1.48	1.39	1.27	1.00

Grados de libertad del denominador ( $n_2$ )