



**MODELO DE EFECTOS ALEATORIOS PARA EVALUAR LA EFICIENCIA
DE UN CONJUNTO DE CELDAS SOLARES.**

JUAN CARLOS NIÑO LÓPEZ

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS
ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA APLICADA
BOGOTÁ D.C.**

2016



**MODELO DE EFECTOS ALEATORIOS PARA EVALUAR LA EFICIENCIA
DE UN CONJUNTO DE CELDAS SOLARES.**

JUAN CARLOS NIÑO LÓPEZ

**Asesor estadístico: MARTHA TATIANA JIMÉNEZ
Asesor metodológico: DIANA WALTEROS**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS
ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA APLICADA
BOGOTÁ D.C.**

2016



Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. 11 de Junio del 2016



Las Directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo Docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.



TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Justificación	11
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo General.....	11
1.2.2 Objetivos específicos	11
CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIA	12
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO	15
3.1 Modelo de efectos aleatorios.	15
3.2 Modelo y suposiciones.....	15
3.3 Hipótesis del Modelo de Efectos Aleatorios	16
3.4 ANOVA	16
CAPÍTULO 4. MARCO METODOLÓGICO.....	17
4.1 Unidad de análisis.....	17
4.2 Aspectos de Diseño de Experimentos	17
4.3 Variables	17
4.4 Diseño Estadístico:	18
4.4.1 Selección aleatoria de un conjunto de celdas solares	18
4.4.2 ANOVA de efectos aleatorios en estructura por bloques.....	18
4.4.3 Prueba de normalidad.....	18
4.4.4 Prueba de Wilcoxon para muestras relacionadas.....	18
4.4.5 Software utilizado.....	18
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	19
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	20
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS	21



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Funcionamiento de un modelo fotovoltaico.....	12
Figura 2. Conexiones en serie y en paralelo de cada celda.....	13



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Cuadrados medios esperados para experimentos con efectos aleatorios.....	16
Tabla 2.	Descripción de las variables.	17
Tabla 3.	ANOVA de efectos aleatorios.....	19



LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de la eficiencia en celdas solares.....	13
Ecuación 2. Modelo de efectos aleatorios.....	15



DISEÑO DE UN MODELO DE FACTORES ALEATORIOS PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DE UN CONJUNTO DE CELDAS SOLARES.

Juan Carlos Niño López¹

RESUMEN

Un Modelo de Efectos Aleatorios permite analizar un conjunto de datos seleccionados entre la información observada y ver su relación con otras variables, ventaja que se quiere aprovechar con el fin de seleccionar la mejor configuración para un sistema fotovoltaico que alimente la planta motriz y el sistema eléctrico de la aeronave VANT SOLVENDUS, proyecto que es desarrollado por el Grupo de Investigación en Ciencias Aeroespaciales -GICA- de la Fundación Universitaria Los Libertadores. A través de este modelo se evaluó la variabilidad de la eficiencia entre un conjunto de celdas fotovoltaicas las cuales fueron expuestas a dos condiciones de radiación solar. El análisis deja ver que no hay variabilidad de la eficiencia entre las celdas, pero su valor difiere bajo una condición soleada y nublada.

Palabras claves: Modelo de Efectos Aleatorio, Celdas fotovoltaicas, Varianza.

ABSTRACT

A Random Effects Model allow to analyze a selected dataset between observed data and its relationship with other variables, an advantage that wants to use in order to select the best configuration for a photovoltaic system that feeds the electric motor and electric system of the VANT SOLVENDUS aircraft, a project that is being developed by the Grupo de Investigación en Ciencias Aeroespaciales -GICA- of the Fundación Universitaria Los Libertadores. Through this model, variance of the efficiency between a set of photovoltaic cells that were exposed under two conditions of insolation was evaluated. The analysis reveals that there is not variability in efficiency between it, but its value is greater than zero under sunny and cloudy conditions.

Keywords: Random Effects Model, Photovoltaic cells, Variance.

^{**} Ingeniero Aeronáutico, Fundación Universitaria Los Libertadores
Email: jcinol@libertadores.edu.co



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica, se define como aquella que se obtiene al convertir la energía proveniente del sol en energía eléctrica (Messenger, 2005) gracias al uso de una serie de dispositivos conocidos como celdas solares fotovoltaicas, las cuales a través del efecto fotoeléctrico llevan a cabo dicha transformación. Las capacidades eléctricas de cada una de estas celdas, depende de diversos factores siendo el más significativo la intensidad de irradiación solar que éstas reciben (Asea Brown Boveri, S.A., 2011) la cual también está relacionada con el área de la celda expuesta al sol. Es por eso que para poder cumplir con los requerimientos eléctricos de una instalación es necesario que un conjunto de celdas se conecten entre sí, con el fin de proporcionar el voltaje y la corriente que se requieran. Esta tecnología ha venido evolucionando en los últimos años lo que ha llevado a que pueda tener diversas aplicaciones, y el campo aeronáutico ha realizado grandes aportes.

Dadas estas ventajas, el Grupo de Investigación en Ciencias Aeroespaciales - GICA - de la Fundación Universitaria Los Libertadores, en el marco de desarrollo de la aeronave no tripulada VANT SOLVENDUS, ha decidido emplear energía solar fotovoltaica para alimentar la planta motriz y el sistema eléctrico de esta aeronave. Para lograr este objetivo, el Grupo de Investigación utilizó un conjunto de celdas solares las cuales fueron sometidas a dos condiciones meteorológicas diferentes (soleado y nublado) y se registraron los valores de voltaje y corriente proporcionados por cada una de éstas. Posteriormente se calculó la potencia y la eficiencia para cada dispositivo.

Para lograr su máximo aprovechamiento, es necesario que las celdas a utilizar, tengan niveles de eficiencia similares, esto con el fin de evitar las pérdidas generadas por desequilibrio (Asea Brown Boveri, S.A., 2011). Tener certeza sobre cuáles celdas son las más apropiadas para conectarse entre sí es difícil partiendo sólo de la observación, por lo que se hace necesario recurrir a los conceptos del área de Diseño de Experimentos con el fin de determinar la variabilidad en la eficiencia que se puede presentar entre celdas, considerar el impacto generado por la exposición a diferentes niveles de radiación solar y determinar si este conjunto de celdas puede suplir los requerimientos eléctricos de los componentes que van a bordo de la aeronave.

De no realizarse esta estimación de varianzas, la aeronave estaría expuesta por un lado a que se presenten fallas por sobrecalentamiento y por otro no se tendría certeza de si el arreglo fotovoltaico cumple con los requerimientos eléctricos y como tal el funcionamiento de los componentes a bordo de la aeronave se verían afectados ya que no se estarían proporcionando los niveles de voltaje y de corriente requeridos convirtiéndose en un factor de alto riesgo cuando la aeronave este en vuelo.



Por lo anterior, este trabajo se enfoca en buscar un modelo que mediante una selección aleatoria permita determinar la eficiencia de un conjunto de celdas expuestas a las condiciones meteorológicas dadas. De esta forma se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿La eficiencia del conjunto de celdas solares a ser usadas en el VANT SOLVENDUS muestra variabilidad?

1.1 Justificación

Realizar el análisis de efectos aleatorios para determinar la variabilidad de la eficiencia del conjunto de celdas solares, permitirá identificar cuáles de estos dispositivos resultan ser más eficientes y de esta manera establecer la forma como estos deberán conectarse con el fin de proporcionar los requerimientos eléctricos a la aeronave. Este análisis también permitirá determinar si se requiere la implementación de un dispositivo eléctrico adicional (diodo de bypass) con el fin de proteger el panel de los desequilibrios que se puedan presentar y posteriormente por sobrecalentamiento. Dada la aplicación aeronáutica, es necesario suministrar la energía necesaria a la planta motriz y del sistema eléctrico para no poner en riesgo la operación de la aeronave cuando esta se encuentre en vuelo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la eficiencia de un conjunto de celdas solares en dos condiciones meteorológicas.

1.2.2 Objetivos específicos

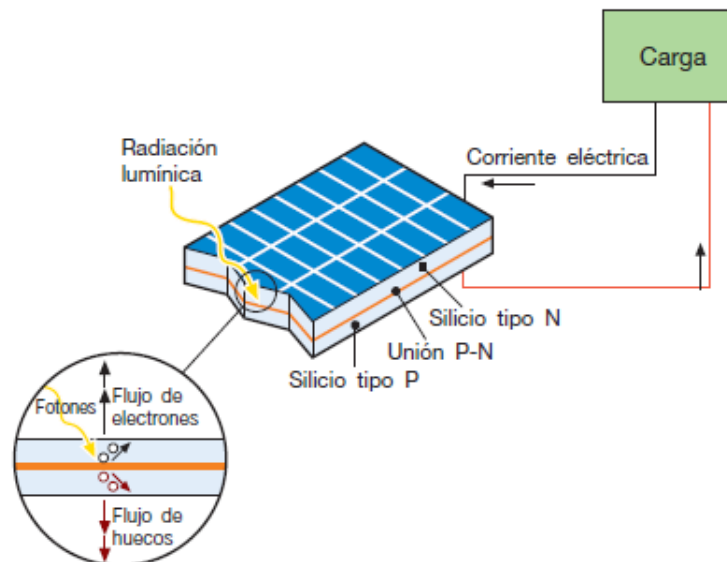
- Determinar si se presentan diferencias entre variabilidad de la eficiencia proporcionada por el conjunto de celdas solares bajo estudio en dos condiciones meteorológicas, soleada o nublada.
- Evaluar si existe algún tipo de variación en relación a los ambientes a los que se sometieron las celdas y la eficiencia que estas proporcionaron.



CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIA

La celda solar es el componente principal de toda instalación fotovoltaica ya que utiliza los fotones que componen la luz solar para estimular el desplazamiento de electrones al interior de la misma generando electricidad, fenómeno que se conoce como el efecto fotovoltaico (Kalogirou, 2009). Estas celdas están compuestas principalmente de silicio, que es un material semiconductor y cuentan con espesores de 0,3 mm y área superficial que varía entre 100 y 225 cm² dependiendo de la tecnología de fabricación (Asea Brown Boveri, S.A., 2011).

Para que se produzca la corriente eléctrica, es necesario *dopar* el silicio por un lado con átomos de fósforo con el fin de obtener un exceso de electrones en la capa que estará expuesta a la luz del sol y se conoce como silicio tipo N. Por otro lado la capa que no recibe luz solar se le adiciona átomos de boro y allí los electrones libres se apartan del silicio dejando un hueco (ausencia de electrones) y se define como silicio tipo P.



Fuente: (Asea Brown Boveri, S.A., 2011)

Figura 1. Funcionamiento de un modelo fotovoltaico.

Los electrones de la capa N fluyen hacia la región P generando la acumulación de carga negativa en esta última. Al conectarse un conductor a través de éstas dos capas, se genera un flujo de electrones (corriente eléctrica) en una sola dirección tal como se muestra en la Figura 1.



Dentro de las características eléctricas propias de estas celdas, se encuentra por un lado la Corriente de Corto Circuito (I_{cc}), el cual es el máximo valor de corriente que puede circular por la celda solar y por otro lado la Tensión (Voltaje) de Circuito Abierto (V_{cc}), que no es más que la máxima tensión que se obtiene en los extremos de la célula solar cuando ésta no tiene conectada ninguna carga. La Potencia que es producto entre la corriente y el voltaje de cada celda y permite cuantificar el flujo de energía que se proporciona por unidad de tiempo (Asea Brown Boveri, S.A., 2011) y cuya unidad física es el Vatio (Watt).

Otro parámetro importante es la eficiencia (η) la cual permite cuantificar la cantidad de energía solar que es transformada en corriente eléctrica y se obtiene relacionando la Potencia de salida y la Potencia de entrada tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} = \frac{I_{cc} * V_{cc}}{G * A}$$

Fuente: (Kalogirou, 2009)

Ecuación 1. Cálculo de la eficiencia en celdas solares

Donde:

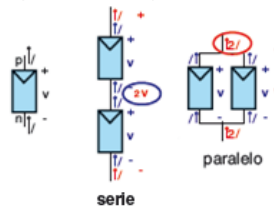
I_{cc} = Corriente de corto circuito

V_{cc} = Voltaje de Circuito abierto

G = Irradiación

A = Área de la celda solar.

La producción de corriente está determinada tanto por el nivel de irradiancia (G), como por el área de la celda que recibe la luz del sol, que al ser tan pequeña no logra proporcionar los niveles de corriente y de voltaje suficientes para suplir los requerimientos eléctricos de una instalación, siendo necesario realizar conexiones en serie o en paralelo dependiendo de las necesidades. Estas conexiones se pueden realizar tal como se muestra en la siguiente figura:



Fuente: (Asea Brown Boveri, S.A., 2011)

Figura 2. Conexiones en serie y en paralelo de cada celda.



Por lo general las celdas fotovoltaicas presentan diferencia en cuando a su eficiencia (Kalogirou, 2009), por un lado influenciada por el nivel de concentración de silicio que esta tenga, situación relacionada directamente con su proceso de fabricación. Y por el otro, el nivel de irradiación que estas reciben influye directamente en la magnitud de la corriente eléctrica producida. Estas variaciones afectan la eficiencia de cada celda, diferencia que se resulta ser más significativa cuando estos dispositivos están conectados entre sí ya que se pueden generar pérdidas por desequilibrio y futuros sobrecalentamientos que afectan la conectividad entre los circuitos, disminuyendo la capacidad que un panel puede proporcionar. Por lo para obtener un comportamiento óptimo es necesario que las celdas a ser conectadas tengan un nivel de eficiencia lo más homogéneo posible.



CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 Modelo de efectos aleatorios.

Existen ocasiones donde hay experimentos que permiten realizar deducciones (inferencias) sobre una población los cuales se pueden seleccionar al azar para su análisis. Dicha selección se realiza con la intención de comprobar el impacto que generan los tratamientos (Montgomery, 2004), lo cual se puede verificar si se presentan varianzas iguales o mayores de cero. Bajo estas condiciones se está hablando de un **modelo de efectos aleatorios**.

Efectuar este análisis cuando la selección de los factores se ha realizado de manera aleatoria permite generar modelos más precisos dando la oportunidad de explicar de manera clara las razones de estas variaciones a través de un valor de varianza, con la ventaja de que el modelo muestra un buen ajuste cuando las muestras son grandes. Lo anterior permite analizar una mayor cantidad de datos y su relación con otras variables.

También es necesario que el diseñador tenga un conocimiento profundo del tema ya que estas variaciones son producto de las condiciones de los tratamientos, los protocolos experimentales desarrollados y la manera como se realizan las deducciones.

3.2 Modelo y suposiciones

Los modelos de efectos aleatorios que contienen un solo factor se describen de la siguiente forma:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij}$$

Fuente: (Kuelh, 2000)

Ecuación 2. Modelo de efectos aleatorios

Donde:

μ define la media del proceso, α_i hace referencia a los efectos aleatorios del tratamiento y se espera que estos tengan una distribución normal e independiente, con media igual a cero y valores de varianza σ^2 , y e_{ij} que es el error aleatorio de la respuesta Y_{ij} también con distribución normal e independiente, se espera que tenga valores de media igual a cero y varianza σ^2 (Kuelh, 2000).



3.3 Hipótesis del Modelo de Efectos Aleatorios

Para un modelo de efectos aleatorios, cuando se infiere que los efectos de los tratamientos son iguales a cero, se formulan las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2 = 0$$

$$H_a: \sigma^2 > 0$$

Con la formulación de estas hipótesis, se puede comprobar que los diferentes tratamientos no influyen en la variación de los resultados obtenidos.

3.4 ANOVA

Como resultado de un análisis de varianza de efectos aleatorios resulta ser parecido a un modelo de efectos fijos.

Tabla 1. Cuadrados medios esperados para experimentos con efectos aleatorios.

FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	CUADRADOS MEDIOS ESPERADOS PARA EFECTOS ALEATORIOS
Tratamientos	$k - 1$	s_1^2	$\sigma^2 + n\sigma_a^2$
Error	$k(n - 1)$	s_2^2	σ^2
Total	$nk - 1$		

Fuente: (Kuelh, 2000)

Se espera entonces, que al asumir la normalidad del modelo, se pueda tomar la relación s_1^2 y s_2^2 como estadístico de prueba (F_0) (Ronald E. Walpole, 2012), estableciendo un valor de significancia $\alpha = 0.05$ que al ser comparado con el valor F_0 , al este último ser mayor nos permita concluir:



CAPÍTULO 4. MARCO METODOLÓGICO

4.1 Unidad de análisis

Para poder evaluar la eficiencia de un conjunto de celdas solares, el análisis se realizó con un enfoque explicativo, ya que lo que se busca es interpretar la homogeneidad entre cada una de las unidades experimentales. Para esto se tomó una base de datos proporcionada por el Grupo de Investigación - GICA - de la Fundación Universitaria Los Libertadores, la cual muestra una caracterización de un conjunto de 91 celdas solares, con información de voltaje y corriente de cada celda expuesta a diversos niveles de radiación solar.

4.2 Aspectos de Diseño de Experimentos

- ✓ Variable respuesta: Eficiencia
- ✓ Factores: Celdas solares
- ✓ Réplicas: 6
- ✓ Variable de control: Días soleado y Días nublados
- ✓ Unidad experimental: Celdas Solares
- ✓ Unidad Observacional: Celdas Solares

4.3 Variables

Tabla 2.
Descripción de las variables

VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	DEFINICIÓN
Voltaje	Voltios (V)	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.
Corriente	Amperios (A)	Flujo de electricidad (Electrones) por unidad de tiempo.
Potencia	Watts (W)	Define la cantidad de energía que debe ser suministrada a un componente eléctrico para su correcto funcionamiento.
Eficiencia	Medida en porcentaje	Relación que permite ver la cantidad de radiación solar que fue transformada en energía eléctrica.

Fuente: El Autor



4.4 Diseño Estadístico:

4.4.1 Selección aleatoria de un conjunto de celdas solares

De la base de datos proporcionada por el grupo de investigación GICA, la cual contenía información de 91 celdas, utilizando un método de muestreo aleatorio simple y con ayuda del programa Excel donde a cada celda se le asignó un valor aleatorio, el cual posteriormente fue ordenado de menor a mayor y se tomaron las primeras 41 celdas. Este valor se población se toma, a causa del valor obtenido de desviación estándar y promedio de eficiencias.

4.4.2 ANOVA de efectos aleatorios en estructura por bloques

Se realizaron pruebas de Análisis de Varianza (ANOVA) con el objetivo de evaluar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2 = 0$$

$$H_a: \sigma^2 > 0$$

El planteamiento de estas hipótesis se da con el fin de determinar si hay varianza entre cada una de las celdas y saber si la condición meteorológica (soleado y nublado) tienen influencia en el valor obtenido de la eficiencia.

4.4.3 Prueba de normalidad

Para verificar el supuesto de normalidad entre las condiciones meteorológicas, se llevó a cabo la prueba de Shapiro-Wilks, por su facilidad de aplicación en datos de cualquier tipo y por su disponibilidad en el software R.

4.4.4 Prueba de Wilcoxon para muestras relacionadas

Se llevó a cabo esta prueba ya que no se presentó normalidad en el modelo de las condiciones meteorológicas y se quería observar si existía igualdad entre las medianas de las muestras.

4.4.5 Software utilizado

Para el llevar a cabo cada una de las pruebas se utilizó el Software estadístico R utilizando el paquete R Commander y la plataforma Minitab 17. Ambas herramientas permitieron llevar a cabo el desarrollo los análisis de los datos correspondientes.



CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para llevar a cabo el análisis por efectos aleatorios, primero se hizo la selección de la cantidad de celdas que se iban a analizar. Para esto se tuvo en cuenta la desviación estándar y el promedio de las eficiencias, el cual arrojó un resultado de 41 celdas a ser analizadas. Luego a través de una técnica de muestreo aleatorio simple con ayuda del programa Excel se seleccionaron las celdas a analizarse. Con ayuda de la plataforma Minitab 17 se obtuvo la ANOVA de efectos aleatorios de estructura en bloques con los siguientes resultados:

Tabla 3. ANOVA de efectos aleatorios.

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
CELDA	40	0,009000	0,000225	0,77	0,837
CONDICION	1	0,010616	0,010616	36,32	0,000
Error	204	0,059623	0,000292		
Total	245	0,079239			

Considerando las siguientes hipótesis $H_0: \sigma^2 = 0$ y $H_a: \sigma^2 > 0$ y asumiendo un valor $\alpha = 0.05$, se observa que el valor-p para las celdas es mayor de 0.05, lo que permite rechazar la hipótesis alternativa, por lo que las celdas tienen varianza igual a cero, indicando que no hay variabilidad de la eficiencia entre las celdas. Sin embargo, el valor-p de la condición meteorológica es menor que 0.05 lo que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que la eficiencia de las celdas es mayor de cero si están bajo una condición soleada y nublada.

Por lo anterior, se procedió a realizar el análisis de la eficiencia para estas dos condiciones y se determinó su valor promedio. Al efectuar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks, se encontró que el valor-p para la condición nublada es de $9.584e-05$ y para la condición soleada es de 0.001494. Ambos valores se encuentran por debajo del $\alpha = 0.05$ por lo que no se cumple el supuesto de normalidad de los datos.

Posteriormente se utilizó una herramienta de estadística no paramétrica una prueba de Wilcoxon para muestras pareadas de estadística no paramétrica utilizando el software R, con el objetivo de determinar si hay variación en la mediana de los datos. El valor-p que se obtuvo fue igual a $2.075e-13$ lo cual permite concluir que las medianas para la condición soleada y nublada son diferentes.



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis ANOVA por efectos aleatorios permitió ver que la varianza entre las celdas es igual a cero, de esta manera estos dispositivos no muestran diferencias significativas en cuanto a su comportamiento eléctrico, por lo que es poco probable que se presenten pérdidas por desequilibrio, y como tal la disminución de la eficiencia en el panel ensamblado.

Por otro lado, los resultados muestran que si hay variación de la eficiencia en cuanto al nivel de radiación al que éstas estuvieron expuestas, por lo que el Grupo de Investigación debe considerar estas variaciones cuando la aeronave se encuentre bajo condiciones soleadas o nubladas con el fin de disminuir los riesgos cuando la aeronave se encuentre en vuelo.

Los análisis dejan ver un valor alto de varianza, los cuales pudieron presentarse por factores externos como por ejemplo, si la toma de los datos se realizó de manera correcta así como también determinar si los equipos que se utilizaron para realizar las mediciones contaban con la calibración adecuada.



CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

- Asea Brown Boveri, S.A. (2011). *Cuaderno de aplicaciones técnicas (Plantas Fotovoltaicas)*. Barcelona.
- Kalogirou, S. A. (2009). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. San Diego: Elsevier.
- Kuehl, R. O. (2000). *Diseño de Experimentos*. Arizona: Thompson Learning.
- Messenger, R. A. (2005). *Photovoltaic Systems Engineering*. New York: CRC Press.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. Ciudad de México: Limusa .
- Ronald E. Walpole, R. H. (2012). *Probabilidad y Estadística para ciencias e ingeniería*. Naucalpan de Juárez: PEARSON.