

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

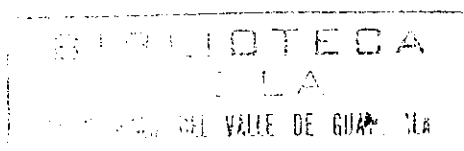
Departamento de Ingeniería Industrial



DISEÑO EXPERIMENTAL DE TAGUCHI,  
APLICACION A LA MANUFACTURA DE PILAS

HENRY STANLEY WEBB DEL VALLE

Trabajo de Graduación presentado para optar al grado académico  
de Licenciado en Ingeniería Industrial



Guatemala

1997

**DISEÑO EXPERIMENTAL DE TAGUCHI,  
APLICACION A LA MANUFACTURA DE PILAS**

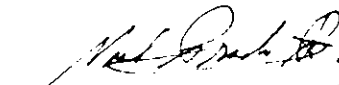
Dedico este trabajo a:

Dios,  
Mis padres y  
Mis hermanos.

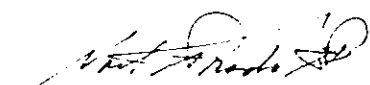
## **AGRADECIMIENTOS**

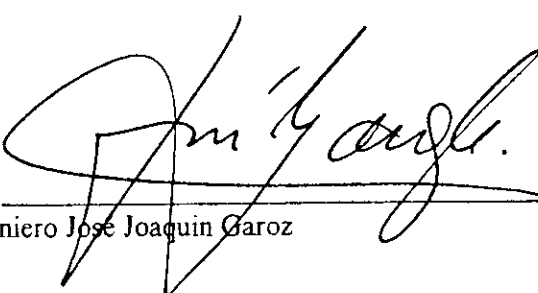
Este trabajo se logró gracias a la colaboración de varias personas. De manera especial agradezco la asistencia de los Ingenieros Luis Escobar, Otto Garcia y William Campo, así como del Licenciado Mario Aguilar, quienes a través de su vasta experiencia me ayudaron a darle el enfoque apropiado a la investigación. También agradezco al ingeniero Noel Prado por su asistencia como asesor y revisor de esta tesis.


Vo. Bo. :

(f)   
Ingeniero Noel Prado Barragán  
Asesor

Tribunal:

(f)   
Ingeniero Noel Prado Barragán

(f)   
Ingeniero José Joaquín Garoz

(f)   
Licenciado Romeo Eduardo Campos Sánchez

Fecha de aprobación: 6 de Noviembre de 1,997

## CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCION	1
II. OBJETIVOS	3
III. CONCEPTOS BASICOS SOBRE CONTROL ESTADISTICO DE PROCESOS	4
A. Naturaleza estadística de un proceso de producción	4
B. Herramientas básicas del control estadístico de procesos	5
1. Diagrama de flujo	5
2. Diagrama de Pareto	5
3. Diagrama de causa y efecto	6
4. Histograma de frecuencias	6
5. Diagramas de control	6
C. Teoría de los diagramas de control	7
1. Diagrama de control de variables	8
D. Tamaño de la muestra y frecuencia de muestreo	9
IV. TECNICAS DE TAGUCHI PARA CONTROL DE CALIDAD	11
A. Filosofía de Taguchi	11
B. Conceptos fundamentales	13
C. Función de pérdida	15
D. Estrategias de calidad	18
1. Tormenta de ideas	20

2. Matrices ortogonales	21
a. Uso de matrices ortogonales	22
b. Comparación con metodología tradicional	24
c. Análisis de matrices ortogonales	25
V. PROCESO DE ENSAMBLE DE PILAS SECAS	29
VI. METODOLOGIA	33
A. Descripción del problema	33
B. Metodología experimental	36
VIII. RESULTADOS	40
IX. DISCUSION DE RESULTADOS	60
X. CONCLUSIONES	64
XI. RECOMENDACIONES	65
XII. BIBLIOGRAFIA	66

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Páginas
4.1 Matriz ortogonal L8	22
5.1 Combinaciones en matriz L8	36
5.2 Factores experimentales	37
5.3 Combinación de factores experimentales	38
8.1 Efectos principales (S/N)	40
8.2 Resultados experimentales corrida # 1	41
8.3 Resultados experimentales corrida # 2	42
8.4 Resultados experimentales corrida # 3	43
8.5 Resultados experimentales corrida # 4	44
8.6 Resultados experimentales corrida # 5	45
8.7 Resultados experimentales corrida # 6	46
8.8 Resultados experimentales corrida # 7	47
8.9 Resultados experimentales corrida # 8	48
8.10 Resumen de resultados experimentales	49
8.11 Respuestas experimentales para peso mezcla	50
8.12 Respuestas experimentales para factor S/N	51
8.13 Niveles óptimos	59

## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica	Páginas
8.1 Diagrama de control pesos corrida # 1	41
8.2 Diagrama de control rangos corrida # 1	41
8.3 Diagrama de control pesos corrida # 2	42
8.4 Diagrama de control rangos corrida # 2	42
8.5 Diagrama de control pesos corrida # 3	43
8.6 Diagrama de control rangos corrida # 3	43
8.7 Diagrama de control pesos corrida # 4	44
8.8 Diagrama de control rangos corrida # 4	44
8.9 Diagrama de control pesos corrida # 5	45
8.10 Diagrama de control rangos corrida # 5	45
8.11 Diagrama de control pesos corrida # 6	46
8.12 Diagrama de control rangos corrida # 6	46
8.13 Diagrama de control pesos corrida # 7	47
8.14 Diagrama de control rangos corrida # 7	47
8.15 Diagrama de control pesos corrida # 8	48
8.16 Diagrama de control rangos corrida # 8	48
8.17 Diagrama de control resumen	49

8.18 Efecto de cantidad de agua agregada	50
8.19 Efecto de cantidad de agua y uso de martillo	50
8.20 Efecto de uso de martillo	51
8.21 Efecto de cantidad de agua y tiempo de reposo	51
8.22 Efecto de tiempo de reposo	52
8.23 Efecto de uso de martillo y tiempo de reposo	52
8.24 Efecto de altura de mezcla	53
8.25 Interacción uso de martillo y tiempo de reposo	53
8.26 Interacción cantidad de agua y altura de mezcla	54
8.27 Interacción uso martillo y altura de mezcla	54
8.28 Interacción tiempo de reposo y altura de mezcla	55
8.29 Interacción cantidad de agua y tiempo de reposo	55
8.30 Interacción cantidad de agua y uso martillo	56

## I. INTRODUCCION

La producción de artículos de alta calidad a un bajo costo ya no es una opción para los fabricantes guatemaltecos, sino más bien se ha convertido en una necesidad esencial. Esta obligación de producir con alta calidad obedece a la apertura de mercados y al aumento en la competencia que esta trae consigo. Para fines prácticos la calidad se define como la "aptitud para el uso" de cierto artículo, ya sea por un cliente interno o externo.

Uno de los factores claves en el desarrollo de la base industrial de un país que desee competir en una economía global es la integración de diseño de experimentos a sus prácticas diarias. En la actualidad mucha de la investigación en el campo de la Ingeniería Industrial se realiza de manera empírica, por lo que al aplicar las técnicas de diseño experimental estadístico se puede aumentar su eficiencia y reforzar los resultados obtenidos.

Con la realización de este trabajo se muestra la aplicación práctica de técnicas de diseño experimental de Taguchi en un ambiente industrial, mostrándose además procedimientos que pueden ser aplicados a cualquier situación. Los métodos Taguchi, más que ser avanzadas técnicas estadísticas, son una herramienta para la optimización de los factores que inciden directamente en los procesos, ayudando al desarrollo de la calidad ingenieril dirigida al costo, el cual es un resultado directo de la aplicación efectiva de las estrategias de calidad. Estas técnicas permiten a la empresa la rápida y exacta adquisición técnica de información para diseñar y producir productos y procesos altamente confiables y a bajo costo. Su más avanzada aplicación permite a los ingenieros desarrollar tecnología flexible para el diseño y producción de familias

de productos de alta calidad, disminuyendo en gran manera el tiempo dedicado a inspección y desarrollo de productos.

Para el desarrollo del experimento se determinó que una de las variables críticas de calidad de la pila producida era la cantidad de mezcla agregada a la pila, la cual a la vez determina su capacidad eléctrica. Esta capacidad de la pila es percibida por el cliente, pues esta determina la duración de la pila bajo diversas condiciones de descarga. En vista que la capacidad eléctrica y el peso de mezcla por pila son características de mucha importancia, es necesario que la empresa fabricante tenga conocimiento de los factores que pueden afectarlas y la combinación de factores que optimizan o bien minimizan su variabilidad.

## **II. OBJETIVOS**

### **General**

Implementar un método de diseño experimental Taguchi en el proceso de manufactura de mezcla de pilas, con la finalidad de estudiar el efecto de diversos factores en la cantidad de mezcla en cada pila y en la capacidad eléctrica de la pila producida.

### **Específicos**

Determinar cuál es el nivel de cada uno de los factores analizados que minimiza la variabilidad del peso de mezcla de la pila y optimiza la capacidad eléctrica de la misma.

Presentar y desarrollar una metodología sencilla para su uso y aplicación enfocada a la experimentación estadística.

### **III. CONCEPTOS BASICOS SOBRE CONTROL ESTADISTICO DE PROCESOS**

#### **A. Naturaleza estadística de un proceso de producción**

Un proceso de producción consiste en una serie de insumos en la forma de obreros, equipo o materiales que producen un determinado resultado. Las variaciones en estos insumos ocurren conforme pasa el tiempo, a la vez que varía la relación entre estos insumos dentro del proceso. Estas variaciones de los insumos constituyen un sistema de causas que producen una variación en la uniformidad de la salida. Suponiendo que la variación dentro del proceso y en la relación de estos insumos es estable y predecible, entonces la variación en el resultado del proceso debe ser también estable y predecible. El cambio en una de las características de un insumo, o bien la introducción de una nueva variación debiera ser fácilmente determinada a través de un cambio en la variación del resultado del proceso. A través de la aplicación del concepto estadístico a la industria se ha determinado que ciertas variaciones en la calidad de un producto corresponden a variaciones casuales acerca de las cuales es poco lo que se puede hacer para revisar el proceso. Estas variaciones casuales constituyen la suma de los efectos del complejo total de causas posibles. En este complejo sistema de causas el efecto de cada una de ellas es leve y no es posible determinar que la variación total sea consecuencia de una causa simple. El objetivo del control estadístico de procesos es establecer un sistema de control en el cual un cambio de esta naturaleza pueda ser detectado rápidamente y se puedan desarrollar acciones correctivas.

## **B. Herramientas básicas del control estadístico de procesos**

El principal objetivo de las herramientas usadas en el control estadístico de procesos es el ayudar a comprender de mejor manera el proceso que está siendo analizado. El comprender como se comporta un procedimiento permite encontrar las razones por las que ocurren ciertos efectos y permite ejercer control sobre el proceso a la vez que es un paso esencial para el rediseño y mejoramiento de procesos. La mayoría de las herramientas son de tipo gráfico, lo que permite una mejor visualización del proceso analizado.

1. Diagrama de Flujo: Este diagrama muestra el flujo de materiales o información a través de una secuencia de operaciones que forman un proceso. Es especialmente útil para el análisis de procesos de manufactura, pues muestra la secuencia cronológica de todas las operaciones que pertenecen a este, desde el ingreso de la materia prima hasta el empaque del producto terminado. Este diagrama señala la entrada de todos los componentes y subconjuntos al ensamblaje en el conjunto principal. Debido a estas características, antes que sea posible mejorar un proceso de manufactura conviene elaborar un diagrama de operaciones que permita comprender perfectamente el problema.

2. Diagrama de Pareto: El diagrama y análisis de Pareto se encuentra basado en el principio que indica que no todas las causas que son responsables que ocurra cierto fenómeno ocurren con la misma frecuencia o el mismo impacto. Es decir, que solamente una pequeña parte de las causas será responsable en gran manera por el problema, por lo que al corregir una de estas causas se tendrá una gran influencia sobre el proceso. La aplicación del principio de Pareto al análisis de problemas en procesos es una poderosa herramienta para desarrollar una estrategia práctica que obtenga resultados con recursos limitados.

3. Diagrama de causa y efecto: Este diagrama es también conocido con el nombre de diagrama de Ishikawa y consiste en la identificación de los factores principales que tienen un efecto sobre un problema a analizar. Para la construcción de este diagrama es necesario determinar las principales categorías de causas que originan cierto problema y posteriormente determinar las causas secundarias que lo originan. Una vez el diagrama está completado, se deberá identificar las principales causas a través de la discusión y análisis de datos. El diagrama de causa y efecto puede mostrar importantes relaciones entre las posibles causas, con lo que se puede obtener información adicional sobre el problema a estudiar.

4. Histograma de frecuencias: Esta es una herramienta fundamental en el control estadístico de procesos pues es una manera efectiva de agrupar de manera gráfica datos sobre un proceso, presentando a la vez tres características básicas de estos datos: magnitud de la media, variabilidad de los datos recolectados y el patrón de variación. Adicionalmente a esta información, es posible estimar si un proceso se encuentra dentro de especificaciones.

5. Diagramas de control: Un diagrama de control es un método estadístico utilizado para el estudio y control de procesos repetidos. De acuerdo a su creador, el Dr. Walter A. Shewhart, el diagrama de control puede servir para definir la meta o el estándar de un proceso que la gerencia desee alcanzar, como instrumento para alcanzar dicha meta o bien como un procedimiento para juzgar si la meta fue alcanzada.

### C. Teoría de los diagramas de control

Si las variaciones casuales se ordenan en función del tiempo se conducirán en forma al azar, sin mostrar ciclos o tandas, ni ninguna otra forma definida. Las variaciones futuras no pueden ser previstas en base al conocimiento de las variaciones anteriores. El conocimiento de las variaciones casuales es el fundamento en que descansan los diagramas de control. Si se estudia un grupo de datos y se encuentra que sus variaciones se ajustan a una forma estadística que puede ser razonablemente producida por causas casuales, se supone que no habrá presentes causas atribuibles. En consecuencia se dice que las condiciones que producen estas variaciones están bajo control. Por otra parte, si las variaciones en los datos no se ajustan a una norma que pudiera ser razonablemente consecuencia de las causas fortuitas, se llega a la conclusión de que están actuando una o más causas atribuibles. En este caso las condiciones que producen la variación se dice que están fuera de control.

Como se menciona anteriormente, un diagrama de control no sólo es una herramienta para especificar y lograr un estado de control estadístico: sino también es un procedimiento para juzgar si se ha logrado un estado de control. Un diagrama de control se constituye de conformidad con la teoría estadística y por consecuencia puede ser utilizado para probar las hipótesis de control. De esta manera, si los valores de la muestra de  $X$  cuando se les ordena en función del tiempo caen todos dentro de los límites de control sin variar en una forma no aleatoria dentro de los límites, el proceso se puede juzgar que se encuentra bajo control al nivel indicado por el diagrama. Si se considera que el proceso está bajo control y los nuevos resultados del muestreo del mismo proceso continúan cayendo dentro de los límites del diagrama y no llevan a fluctuaciones no aleatorias en el grupo de puntos como conjunto, podrá considerarse que el proceso continua en estado de control estadístico.

1. **Diagrama de control de variables:** Los diagramas basados en mediciones de características de calidad con frecuencia resultan un método más económico para controlar la calidad que los diagramas de control basados en los atributos. Los diagramas de control de variables más utilizados son los de promedio, o diagramas  $\bar{X}$ , y los de amplitud, o diagramas  $R$ . Si la producción de un proceso forma una distribución normal de frecuencias esta distribución quedará descrita por completo cuando se conozca su media y su desviación estándar. Los cambios significativos, ya sean en la media o en la desviación, son una indicación de cambios significativos en el proceso y si los límites de la especificación están próximos a la media del proceso estos cambios pueden ser significativos en la fracción defectuosa que genera el proceso.

Un diagrama  $\bar{X}$  muestra las variaciones en los promedios de las muestras, contando con una línea central y con límites superior e inferior de control. Si el diagrama se usa para estudiar datos anteriores, la línea central se sitúa en  $\bar{X}$ , que es el promedio de todos los datos. Los límites de control superior (LCS) y de control inferior (LCI) usualmente son límites  $3\sigma_x$ , donde  $\sigma_x$  es una estimación obtenida con base en los datos. Si el diagrama se está utilizando para controlar la producción actual, la línea central puede ser una  $\bar{X}$  deducida de datos anteriores, o bien un valor objetivo determinado por la gerencia. De igual manera los límites también se pueden basar en un valor estándar para la desviación estándar del proceso ( $\sigma$ ), que se han deducido de datos anteriores o han sido escogidos por la gerencia. Las fórmulas para los límites de control son:

$$\text{LCS} = \bar{X} + \frac{3\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$LCI = \bar{X} - \frac{3\sigma}{\sqrt{n}}$$

Si el diagrama  $\bar{X}$  se está utilizando para controlar la producción actual, se toma una muestra de  $n$  elementos del proceso, pasado cierto tiempo y se realiza una medida de calidad de cada uno de dichos elementos. El promedio de estas mediciones se calcula y se sitúa en el diagrama. En tanto los promedios de la muestra no caigan fuera de los límites de control, o no muestren variaciones no aleatorias dentro de los límites, se considera que el proceso se encuentra bajo control en relación con la tendencia central. Si los puntos caen fuera de los límites de control, o se presentan dentro de los límites variaciones no aleatorias, el proceso se considera que está fuera de control en relación con la tendencia central y se lleva a cabo una investigación para encontrar la causa atribuible de esta variación extrema.

#### **D. TAMAÑO DE LA MUESTRA Y FRECUENCIA DE MUESTREO**

La determinación del tamaño de la muestra y la frecuencia de muestreo para los diagramas  $\bar{X}$  y  $R$  usados para retener control sobre la producción actual constituye un problema difícil de teoría estadística. Su solución completa no sólo depende de los distintos riesgos inherentes al proceso de muestreo, sino del costo de inspección y del descartado o desecho de las muestras obtenidas.

Aunque el problema del tamaño adecuado de la muestra y frecuencia del muestreo no han sido resueltos por completo, en la práctica se han logrado soluciones que emplean muestras formadas por 4 ó 5 unidades. Los argumentos detrás del uso de muestras de 4 ó 5 unidades son los siguientes:

1. Para la misma frecuencia de muestreo, las muestras de 4 o 5 unidades tienen un menor costo que las de mayor número. Tanto la cantidad de inspección como la cantidad de cálculo son menores. Si las muestras son de 12 o más, el diagrama *R* no funciona tan bien y probablemente sea necesario dividir la muestra en sub muestras de 4 ó 5 unidades y con ellas trazar el diagrama *R*.

2. Con muestras de 4 ó 5 hay menos probabilidades de que se produzca un cambio durante el muestreo, que en el caso de muestras mayores. Como lo indica W. A. Shewhart, "si el sistema se basa en el cambio, el tamaño de la muestra debe ser lo más pequeño posible, de manera que los promedios de las muestras no oculten el cambio".

3. Las muestras de 4 ó 5 tomadas cada 15 minutos , por ejemplo, son mejores que las muestras de 16 ó 20 tomadas cada hora, debido a que observarán más cambios en la calidad que los que ocurren en una hora.

## **IV. TECNICAS DE TAGUCHI PARA CONTROL DE CALIDAD**

### **A. FILOSOFIA DE TAGUCHI**

Durante los últimos tiempos se ha reconocido que uno de los factores claves para la sobrevivencia de una empresa es ofrecer un producto o servicio de calidad con una elevada satisfacción del cliente. También se ha reconocido el hecho de que los experimentos realizados antes del inicio de la producción, asumiendo que han sido propiamente diseñados y analizados pueden contribuir significativamente a las mejoras de calidad en un producto. Un método tradicional muy común para mejorar la calidad consiste en ajustar los factores uno a la vez durante los experimentos pre producción. Con este método los ingenieros observan los resultados de un experimento luego de cambiar el valor de sólo un factor (parámetro). Este método tiene la desventaja de tener costos elevados y los resultados obtenidos no necesariamente son confiables.

Los japoneses fueron los primeros en darse cuenta del enorme potencial de nuevos métodos usando técnicas de Diseño Estadístico Experimental (DEE) originalmente desarrollado por R. Fisher. En contraste con los métodos tradicionales, los Diseños Estadísticos Experimentales promueven el cambio de varios factores simultáneamente en una manera sistemática, asegurando a la vez un estudio independiente del efecto de cada factor. En ambos métodos, una vez los factores han sido adecuadamente caracterizados, se toman pasos para controlar el proceso de producción con lo que las causas de la baja calidad en un producto son minimizadas.

En la industria manufacturera, una de las mayores áreas de desarrollo está relacionada con la aplicación de técnicas de control de calidad fuera de línea (experimentación y análisis antes de la producción) a la ingeniería de procesos y productos. La mayoría de las ideas para el control de calidad fuera de línea son derivadas del trabajo de W.E. Deming y posteriormente desarrolladas

por el Profesor Genichi Taguchi. El logro más grande del trabajo de Deming fue el lograr que las empresas comenzaran a utilizar el Control Estadístico de Procesos de producción para la mejora de calidad. La filosofía desarrollada por Taguchi cambió el énfasis de la producción al diseño del producto, con la finalidad de lograr un diseño robusto que no fuera afectado por la variabilidad en el ambiente de producción.

Los cinco principales puntos de la filosofía de Calidad Taguchi son:

1. En un ambiente de mercado competitivo las mejoras continuas de calidad y reducciones de costo son necesarias para la sobre vivencia de una empresa.
2. Una medida importante de la calidad de un bien manufacturado es la pérdida total que genera este producto a la sociedad.
3. Es necesario cambiar los procedimientos para experimentación de pre producción, de analizar el efecto de la variación de un solo factor a la vez, a variar varios factores simultáneamente (DEE) para que la calidad pueda ser parte integral del proceso y del producto.
4. La pérdida del consumidor debido a la mala calidad es aproximadamente proporcional al cuadrado de la desviación de la característica de calidad de su valor nominal u objetivo. La filosofía de Taguchi cambia el objetivo de los experimentos y la definición de calidad de "lograr producir entre especificaciones" a "obtener el valor nominal y minimizar la variabilidad alrededor de este".
5. La variación en el desempeño de un producto ( o servicio) puede ser minimizada al examinar los efectos no lineares de los factores (o parámetros) en las características de calidad. Cualquier desviación del valor objetivo resulta en mala calidad.

El principal objetivo de Taguchi es mejorar los procesos y el diseño de productos a través de la identificación de factores controlables y sus niveles, los cuales minimizan la

variación alrededor de un valor objetivo. Al colocar los factores en sus niveles óptimos, un producto puede ser manufacturado para que sea menos sensible a los cambios en sus condiciones de operación. Por lo tanto, Taguchi elimina el efecto que una causa puede tener sobre un producto en lugar de la causa del efecto, con lo que se obtiene un producto de elevada calidad.

## **B. CONCEPTOS FUNDAMENTALES**

La definición de calidad dada por la metodología de Taguchi es orientada al consumidor. Taguchi define la calidad como:

"La calidad de un producto es la mínima pérdida impartida a la sociedad desde el momento en que el producto es embarcado"

Esta pérdida incluirá el costo de la insatisfacción del consumidor que tendría como resultado una merma en la reputación de la empresa que fabrica este bien. Esta definición difiere grandemente de las definiciones tradicionales que han estado orientadas a la producción de los bienes y en las cuales se incluye el costo del re trabajo, destrucción, garantía y servicios como medidas de calidad. El cliente es la parte más importante en la línea de producción, puesto que los productos y servicios de calidad aseguran que en el futuro este cliente volverá a consumirlos, con lo que aumenta la reputación de la empresa aumentando su participación de mercado. La filosofía de Calidad de Taguchi contempla conceptos fundamentales:

B.1 La calidad debe ser diseñada como parte integral del producto desde el comienzo y no lograda a través de inspecciones y muestreos:

Este concepto es conocido como Calidad fuera de Línea e indica que las mejoras de calidad deben ocurrir en los pasos de diseño de un producto o proceso y continuar a través de las demás fases de producción. La mala calidad presente en un producto no puede ser mejorada a través de los procesos tradicionales de inspección y muestreo en la línea de producción. De acuerdo a Taguchi, ninguna cantidad de inspecciones puede aumentar la calidad de un producto, si no más bien sólo atacan los síntomas del problema. Por lo tanto, el desarrollo de productos de calidad debe ser basado en la filosofía de la prevención, los problemas deben ser solucionados de raíz y no más tarde. Taguchi hace especial énfasis en que la calidad es algo que se diseña con el producto, lo cual lo hace más robusta e inmune a la variación incontrolable en los ambientes de manufactura.

B.2 La calidad se logra a través de minimizar la desviación contra un valor objetivo y no en lograr fabricar entre especificaciones.

Un producto debe ser diseñado para que sea inmune al efecto de factores ambientales incontrolables, tales como ruido, humedad y temperatura. La llave para el mejoramiento en la calidad radica en la reducción de la variabilidad, por lo que al especificar valores objetivos para parámetros críticos y asegurar que manufactura los cumpla con una pequeña desviación, se pueden lograr mejoras significativas en la calidad.

B.3 La calidad de un producto no debe estar basada en su desempeño, propiedades o características.

Mejorar las características de un producto no es una forma de mejorar su calidad, si no más bien una manera de cambiar el mercado al que es dirigido. El desempeño y características de un

producto pueden estar relacionado con la calidad de este, pero no deben ser la base sobre la cual se mide su calidad. El desempeño de un producto es una medida de su capacidad y no de su calidad.

B.4 El costo de la Calidad debe ser medido como una función de la variación en el desempeño de un producto y la pérdida que ocasiona en el sistema.

A partir de ciertos parámetros de diseño, la desviación contra un valor objetivo se mide en términos de los costos incurridos en el ciclo de vida del producto. Dentro de estos costos tenemos costos por re trabajo, inspección, garantías, servicio y reemplazo del producto. Estos costos deben ser utilizados como guía para determinar los parámetros más importantes que necesitan control.

### **C. FUNCION DE PERDIDA**

A principios de la década de los 80's el profesor Taguchi propuso la siguiente definición de calidad de un producto: "Calidad es la pérdida financiera de la sociedad luego que el artículo es embarcado". Esta definición muestra la falta de calidad como una pérdida para la sociedad, puesto que no es una característica deseable. A pesar que la pérdida por falta de calidad se pueda expresar como falta de funcionalidad, contaminación, tiempo o ruido, su efecto global es una pérdida financiera. Un producto que cuenta con un diseño pobre comienza a generar pérdidas a la sociedad desde el comienzo de la fase de producción y continuará haciéndolo hasta que se tomen medidas para mejorar su funcionalidad y rendimiento. Existen dos tipos de pérdidas para la sociedad relacionadas con la calidad de un producto:

- La primera categoría se relaciona con las pérdidas incurridas como resultado de un efecto dañino a la sociedad (ej. contaminación o ruido).
- La segunda categoría se relaciona con las pérdidas que se generan por la excesiva variación en el rendimiento funcional del producto.

La segunda categoría tiene mucha relación con la etapa de diseño del producto y será tratada en mayor detalle.

La metodología convencional para calcular el costo de la calidad está basada en el número de piezas que deben ser desechadas o re procesadas. Este método de valuación de calidad no es capaz de distinguir entre dos muestras que a pesar de estar ambas entre límites de especificaciones tienen una diferente distribución estadística de las propiedades a evaluar.

La siguiente figura ilustra la diferencia entre la metodología convencional y la forma en que Taguchi analiza la función de pérdida:

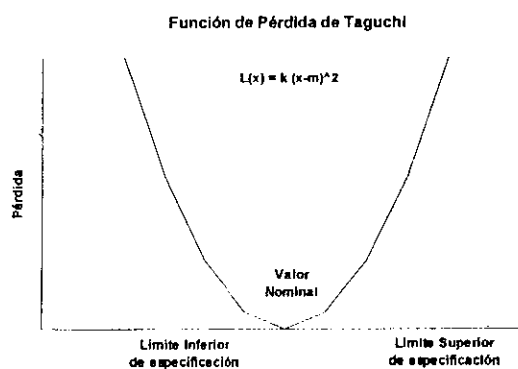


Figura I

Esta gráfica muestra la función de pérdida como una función dependiente de la desviación contra un valor objetivo o ideal para un parámetro del diseño. En este caso, la letra  $m$  representa el valor objetivo, o el valor deseado, para un parámetro bajo consideración. Este parámetro puede ser una dimensión crítica, color del producto, terminado de una superficie o cualquier otra característica que contribuye a la percepción que el cliente tiene de calidad, la calidad del producto.

Los valores de LCS y LCI representan los límites superiores e inferiores aceptables para el parámetro en mención. Normalmente un producto es funcionalmente aceptable si su valor del parámetro a considerar se encuentra dentro del rango de estos valores, por lo que se asume que no existe una pérdida para la sociedad y pasa al siguiente paso del proceso de manufactura. Sin embargo, si el producto tiene un valor para este parámetro que se encuentra fuera de estos límites, entonces es descartado o sujeto a re trabajo. Todos los esfuerzos se centran en controlar el proceso de manufactura para mantener al producto entre estos límites.

De acuerdo al profesor Taguchi, en el mundo real no existen límites exactos sobre los cuales decidir si un producto cumple con ciertas características de calidad. El desempeño de una pieza comienza a degradar conforme el valor del parámetro de diseño se desvía de su valor óptimo. Por lo tanto, Taguchi propone que la función de pérdida debe ser medida como la desviación contra el valor ideal u objetivo, por lo que la función es continua y se representa como una línea punteada en la Figura I. El desempeño de un producto comienza a disminuir conforme los parámetros del diseño se alejan de los valores objetivos o ideales.

Debido a esta disminución, conforme se aleja de un valor objetivo, la función de pérdida toma una forma cuadrática de la manera:

$$L(x) = k(x-m)^2$$

donde **L** es la pérdida en unidades de dinero, **m** es el valor ideal que debiera tener la característica a medir, **x** es el valor real de esta característica y **k** es una constante que depende en la magnitud de la característica y la unidad monetaria utilizada.

Puesto que la función de pérdida es cuadrática y continua, la pérdida total incrementa en forma de parábola conforme la desviación con el valor objetivo aumenta. Esto indica que el hacer un producto que cumpla con ciertas especificaciones no necesariamente significa que el producto sea de buena calidad, puesto que ahora la calidad está definida como el mantener las características del producto en el valor objetivo con la menor variación posible. Taguchi pone especial énfasis en lograr una óptima satisfacción del consumidor al desarrollar productos con características de calidad que estén cerca del valor objetivo con la mínima variación. Por lo tanto, el aspecto más importante de la filosofía de Control de Calidad del profesor Taguchi radica en la minimización de la variación contra un valor objetivo.

#### **D. ESTRATEGIA DE CALIDAD :**

El análisis del profesor Taguchi determina que la mala calidad es un resultado de la falta de consistencia en los ingredientes de un producto. Debido a esta falta de consistencia, los productos fabricados no cumplirían con la calidad (variación de un producto a otro) y especificaciones (valor objetivo) requeridas por el cliente. Esto implica que el valor promedio para las características de calidad están fuera de objetivo y que la variación estadística es grande

con una función de pérdida total elevada. En vista de estas variaciones, el profesor Taguchi desarrolló métodos y técnicas para reducir los elementos que causan estas variaciones:

- Desviación contra un valor objetivo, estas técnicas incluyen la Función de pérdida total y técnicas para el diseño de parámetros.
- Variación de un producto a otro dentro de una muestra, las cuales son tratadas usando Matrices Ortogonales.

Taguchi determinó que la variación en la especificación de un producto es la mayor razón para el rechazo del producto. La cura para esta pérdida de Calidad está en reducir la variación, por lo que todos los esfuerzos deben estar dirigidos a tener una variación cercana a cero, con cero defectos. El proceso de Taguchi para la reducción de la variación consta de dos pasos:

- Fabricar los productos de la mejor manera posible la mayor parte del tiempo. (reduce la variación contra el valor objetivo)
- Fabricar todos los productos de manera que sean lo más idénticos posible. (reduce la variación de un producto a otro)

Esta es una mitología general utilizada por Taguchi para el control de calidad, puesto que es muy difícil definir la calidad de un producto en términos cuantitativos, ya que la calidad de un producto depende de la percepción del cliente y variará de cliente a cliente y de un producto a otro. En general, la falta de consistencia de un producto será un factor importante en la percepción de mala calidad dada por un cliente.

La estrategia usada por Taguchi para mejorar la calidad en la etapa de diseño del producto tiene dos componentes principales:

- Hacer que el diseño del producto sea menos sensible a factores de influencia incontrolables.
- Optimizar el diseño del producto.

### **1. TORMENTA DE IDEAS**

La etapa de tormenta de ideas es probablemente la más importante del proceso de Taguchi para el diseño estadístico experimental. En esta etapa se establecen las condiciones del problema, los objetivos a desarrollar, las características a medir, los métodos de medición para estas características y el diseño de los experimentos apropiados. La tormenta de ideas es una actividad que promueve la participación en grupo, fomenta el pensamiento creativo y genera muchas ideas en un corto tiempo.

La mejor manera para identificar los problemas que ocurren en una operación es haciendo preguntas a los clientes del proceso, preguntando a los trabajadores envueltos en el proceso, comparar procedimientos operativos con la práctica real y examinando datos del proceso para un periodo de tiempo.

La etapa de experimentación es cuando los resultados son examinados y una interpretación de los resultados es realizada. En esta etapa se determinan los factores de control que afectan la variabilidad y los valores óptimos son seleccionados para minimizar la variabilidad en el producto. Los objetivos para los parámetros de control son determinados y sus valores son

seleccionados para obtener el resultado deseado. En esta etapa es posible hacer predicciones sobre el comportamiento futuro del proceso.

Para confirmar los resultados predichos en la etapa anterior, se conduce un experimento de confirmación con el cual se confirman los nuevos valores de los parámetros de control que proveen un desempeño óptimo. La confirmación debe disipar cualquier duda sobre la selección de parámetros, diseño experimental o premisas sobre el desempeño del producto. Un estudio del nuevo sistema deberá ser realizado, debiendo estandarizar las mejoras desarrolladas.

## **2. MATRICES ORTOGONALES**

Un producto puede ser diseñado y fabricado basándose en un grupo de especificaciones demandadas por el cliente. Cada especificación tiene un valor para cierto parámetro, las cuales el fabricante debe ser capaz de satisfacer y por lo tanto el proceso de fabricación debe ser capaz de producir los parámetros deseados, con un valor objetivo igual a las demandas del cliente. Desafortunadamente en la vida real los procesos de fabricación no son ideales, por lo que los productos fabricados tendrán parámetros con una distribución estadística, en la que la media tendrá un valor diferente al valor objetivo del proceso. Debido a este hecho, una de las principales técnicas usadas en el control de calidad de Taguchi consiste en reducir esta variación alrededor del valor objetivo. De acuerdo a Taguchi, la calidad de un grupo de productos puede ser mejorada al lograr que la distribución de los valores de sus parámetros de calidad se encuentre tan cerca del valor objetivo como sea posible. Este objetivo puede ser llevado a cabo, al diseñar y construir la calidad dentro de las especificaciones del producto. Para esto Taguchi emplea diseños experimentales aplicados al proceso de diseño usando tablas especialmente construidas conocidas como "Matrices Ortogonales".

### a. USO DE MATRICES ORTOGONALES

Un experimento realizado durante la etapa de diseño de un producto, relaciona como las materias primas usadas en el proceso de fabricación del producto experimental afectan la calidad final de este. Factores tales como variaciones en relaciones químicas, nivel de ingredientes usados y como las materias son mezcladas contribuyen a la variación de una característica del producto final contra un valor objetivo .

Las matrices ortogonales construidas por Taguchi son un grupo de cuadrados latinos, utilizados para planificar los experimentos de diseño del producto. Al usar esta Tabla, una matriz ortogonal de procedimientos estándar puede ser usado para cierta cantidad de situaciones experimentales. Por ejemplo, la matriz ortogonal de factores de 2 niveles mostrada en la Tabla 1:

FACTORES							
NUMERO DE EXPERIMENTO	A	B	C	D	E	F	G
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1
3	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	1	1	1	0	0
5	1	0	1	0	1	0	1
6	1	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	1	0
8	1	1	0	1	0	0	1

Tabla 4.1 Matriz Ortogonal L8

La matriz designada con el símbolo **L8**, contiene siete factores de 2 niveles cada uno, representados con los números 0 y 1. Esta matriz tiene un tamaño de 8 filas y 7 columnas. Los

números (ceros / uno) en las filas indican los niveles de un factor cualquiera (nivel de voltaje, viscosidad, etc.) y cada columna representa una condición para el experimento. Las columnas verticales representan los factores experimentales que están siendo estudiados. Cada una de las columnas asignadas contiene cuatro celdas con cero (0) y cuatro celdas con uno (1), pudiendo ser combinadas en cuatro maneras posibles (0,0), (0,1), (1,0), (1,1) con 27 posibles combinaciones entre niveles. Se dice que estas columnas son ortogonales o están balanceadas puesto que la combinación de los niveles ocurre el mismo número de veces cuando se forman matrices con dos o más columnas. Por tanto, las siete columnas de una matriz L son ortogonales unas con otras. Es necesario recordar que una matriz  $Q$  ortogonal si es invertible y:

$$Q^{-1} = Q^t$$

La matriz ortogonal facilita el diseño del experimento al asignar factores de acuerdo a las diferentes columnas. En el caso de la Tabla I, puede haber un máximo de 7 factores de 2 niveles (A, B, C, D, E, F, G) asignados de manera arbitraria a las columnas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 u 8 en una matriz L8. A partir de la estructura de la Tabla se deduce que son necesarios 8 experimentos diferentes, tomando cada uno de los factores su nivel (cero / uno) de acuerdo a las columnas de la matriz. La descripción de las condiciones experimentales son determinadas por los niveles de cada factor. Por ejemplo, 0 puede indicar que el factor en mención no es aplicado, mientras que 1 indica la aplicación de este factor. Los factores analizados en el experimento pueden ser variación en concentración química, pureza de un material, presión mecánica, etc. El diseñador del experimento puede repartir los factores entre las diversas columnas, y los 8 experimentos que genera la matriz cubrirá todas las combinaciones independientemente del factor asignado a cada columna. De esta forma, el uso de matrices ortogonales asegura consistencia en los experimentos corridos por diferentes personas, a la vez que asegura que los factores que influyen

la calidad del producto sean correctamente investigados y controlados durante las etapas iniciales del diseño.

## **b. COMPARACION CON METODOLOGIA TRADICIONAL**

Los métodos usados para la investigación de todas las posibles combinaciones y condiciones en un experimento con varios factores son conocidos como diseño factorial. El diseño experimental factorial está basado en la teoría que para un diseño factorial completo el número de posibles combinaciones (N número de experimentos) es:

$$N = L^m$$

donde L = número de niveles para cada factor

m = número de factores analizados

Por lo tanto, si la calidad para cierto producto depende de tres factores, con dos niveles cada uno, se calcula que el número de experimentos necesarios es  $2^3$ , que equivale a 8 corridas experimentales. Si la misma metodología es usada para las condiciones de la Tabla I, (7 factores de 2 niveles) el número de experimentos es de 128. El método de combinación de niveles de factores no se encuentra especificado en el proceso para diseños factoriales, por lo que se pueden obtener diferentes resultados para el mismo experimento cada vez que se hace una corrida. El uso de matrices ortogonales de Taguchi permite simplificar y estandarizar los diseños factoriales en una manera en que se obtengan resultados similares y consistentes aunque los experimentadores sean diferentes.

El concepto de una metodología experimental estándar y resultados uniformes a través de análisis de matrices ortogonales es muy importante puesto que permite a un fabricante hacer dos productos con los mismos estándares de calidad usando las mismas partes, pero con diferentes procesos de fabricación. Esto es posible debido a que a través del análisis experimental con matrices ortogonales los factores que influyen en la calidad de un producto pueden ser identificados y controlados y por lo tanto compensados durante la etapa de diseño. Esto permite que la calidad del producto, en lugar de depender del proceso de fabricación, se pueda "adaptar" al proceso.

### **c. ANALISIS DE MATRICES ORTOGONALES**

Los resultados obtenidos con el uso de matrices ortogonales son analizados para obtener los siguientes objetivos:

- Estimar la contribución de ciertos factores en la calidad del producto en la etapa de diseño.
- Determinar las condiciones óptimas para un producto o proceso, que mantengan las características de calidad deseadas
- Determinar la respuesta de los parámetros de un producto bajo condiciones óptimas

La determinación de la contribución de cada uno de los factores que afectan la calidad de un producto, es esencial para un buen diseño de producto. La técnica de Análisis de varianza (ANOVA) es utilizada para analizar los resultados del diseño experimental con matrices ortogonales y para determinar la contribución de cada factor analizando la variabilidad en las características del producto. Al estudiar los principales efectos de cada uno de los factores sobre cierta característica de calidad es posible determinar un valor óptimo para cada factor que

proporcione el resultado deseado, con lo que los niveles óptimos para cada factor pueden ser determinados con anticipación.

Taguchi recomienda analizar la respuesta media para cada corrida del arreglo interno, sugiriendo también analizar la variación empleando una razón de señal sobre ruido (S/N) elegida de manera apropiada. Estas señales deben ser usadas para medir el efecto de los factores que causan ruido en las características de calidad a evaluar. Los factores de señal a ruido toman en cuenta la cantidad de variabilidad en los resultados experimentales y su cercanía con el valor objetivo. Estas razones de señal sobre ruido, se deducen de la función cuadrática de pérdida y tres de ellas consideradas "estandar" y ampliamente aplicables. Estas son:

1. Cuando el valor nominal es lo mejor:

$$S/N_t = 10 \log (y^2 / s^2)$$

2. Cuando lo mejor es una respuesta grande:

$$S/N_l = -10 \log ( \Sigma ( 1 / y^2 ) / n )$$

3. Cuando lo mejor es una respuesta pequeña:

$$S/N_s = 10 \log ( \Sigma ( y^2 / s^2 ) )$$

donde: S/N: razón de señal a ruido

n: número de corridas

y: respuesta media para cada corrida

s: desviación estándar

Se utiliza S/N t si el objetivo es reducir la variabilidad respecto de un valor deseado, S/N l si el sistema se optimiza cuando la respuesta es tan pequeña como resulte posible. Los niveles factoriales que optimizan la razón S/N apropiada son máximos. Los seguidores de Taguchi, a menudo utilizan el análisis de varianza para determinar los factores que influyen en Y y los que influyen en la razón de señal sobre ruido. Taguchi sostiene que el uso de la razón S/N generalmente elimina la necesidad de examinar interacciones específicas entre los factores controlables y los de ruido, aunque algunas veces analizar estas interacciones mejora la comprensión del proceso.

La razón S/N permite medir la sensibilidad de un efecto a cambios en factores específicos. Esta sensibilidad puede ser expresada en términos de media o cambio en la desviación estándar. Mediante una combinación de estas dos medidas en la fórmula representada por la media dividida por la desviación estándar, Taguchi admite lo que pocos métodos hacen: algunos factores afectan la media, mientras otros afectan la variabilidad de una característica. Los factores que tienen un efecto significativo sobre el valor S/N se conocen como factores de señal. En la selección de los niveles de los factores que permiten lograr la menor variabilidad para una característica dada, los experimentadores buscan las condiciones donde los valores de S/N son altos, es decir con una baja sensibilidad a las variaciones en los factores de ruido.

La elegancia del método de Taguchi radica en que presenta su metodología en forma de receta y ha tomado técnicas estadísticas sofisticadas que muy pocas personas saben utilizar y las simplifica para que la comunidad ingenieril pueda tomar las decisiones en sus propios resultados.

La gran ventaja del método de Taguchi sobre los métodos de experimentación tradicionales se encuentra al momento de diseñar el experimento. Taguchi utiliza un número significativamente reducido de manipulaciones respecto al requerido por los diseños factoriales completos. Esto es conseguido a través del uso como herramientas de los arreglos ortogonales. Los diseños

experimentales estrictos dictan que un gran número de experimentos tienen que realizarse para notar los cambios cuando se varían factores singulares infinitesimalmente. Un arreglo ortogonal, sin embargo, permite un arreglo más realista. Trabajando bajo el entendido de que en situaciones reales, raras son las veces que se permite el manipuleo de un solo factor, la premisa que es particularmente verdadera para un ambiente dinámico de producción, los arreglos ortogonales tienen un enfoque sobre el efecto promedio que ocurre al haber cambio en las otras condiciones.

## **V. PROCESO DE ENSAMBLE DE PILAS SECAS**

El proceso de manufactura de la pila seca puede ser dividido en cuatro áreas, mezcla, extrusión, ensamble y empaçado. El desarrollo experimental se realizará en el área de ensamble, estudiando de manera específica la variabilidad de peso de la mezcla agregada a la pila. En esta sección se explican de manera sencilla las operaciones que tienen lugar en cada una de estas áreas y los controles de calidad utilizados.

### **Area de Mezclado:**

En esta área se combinan los ingredientes que hacen la mezcla base para la pila seca conforme a los porcentajes de la fórmula de fabricación. Entre los ingredientes mezclados se encuentran: Cloruro de Amonio, Cloruro de Zinc, Negro de Humo, Bióxido de Manganeso. Estos ingredientes son colocados en bolsas, las cuales son transportadas a las tómbolas de mezcla con control semi automático. El proceso de mezcla en la tómbola consiste en la homogeneización de los ingredientes en seco durante 8 minutos, posteriormente se le agrega agua y Cloruro de Zinc durante 2.5 min, revolviendo la mezcla húmeda durante 3 minutos. Estas bolsas deben de reposar 24 horas antes de ser utilizadas en las máquinas básicas. El tiempo que tarda una máquina básica en consumir una bolsa de mezcla es de aproximadamente 8 horas.

### **Area de Extrusión:**

En esta área ingresan fichas de zinc, la cuales son lubricadas con una mezcla de grasa y grafito. Posteriormente son trasladadas a una extrusora, la cual da forma al vaso. Estos vasos

son trasladados por una banda sin fin a la cortadora, la cual corta el vaso a la altura requerida. Estos vasos son trasladados al área de máquinas básicas a través de una banda.

#### **Area de Máquinas Básicas:**

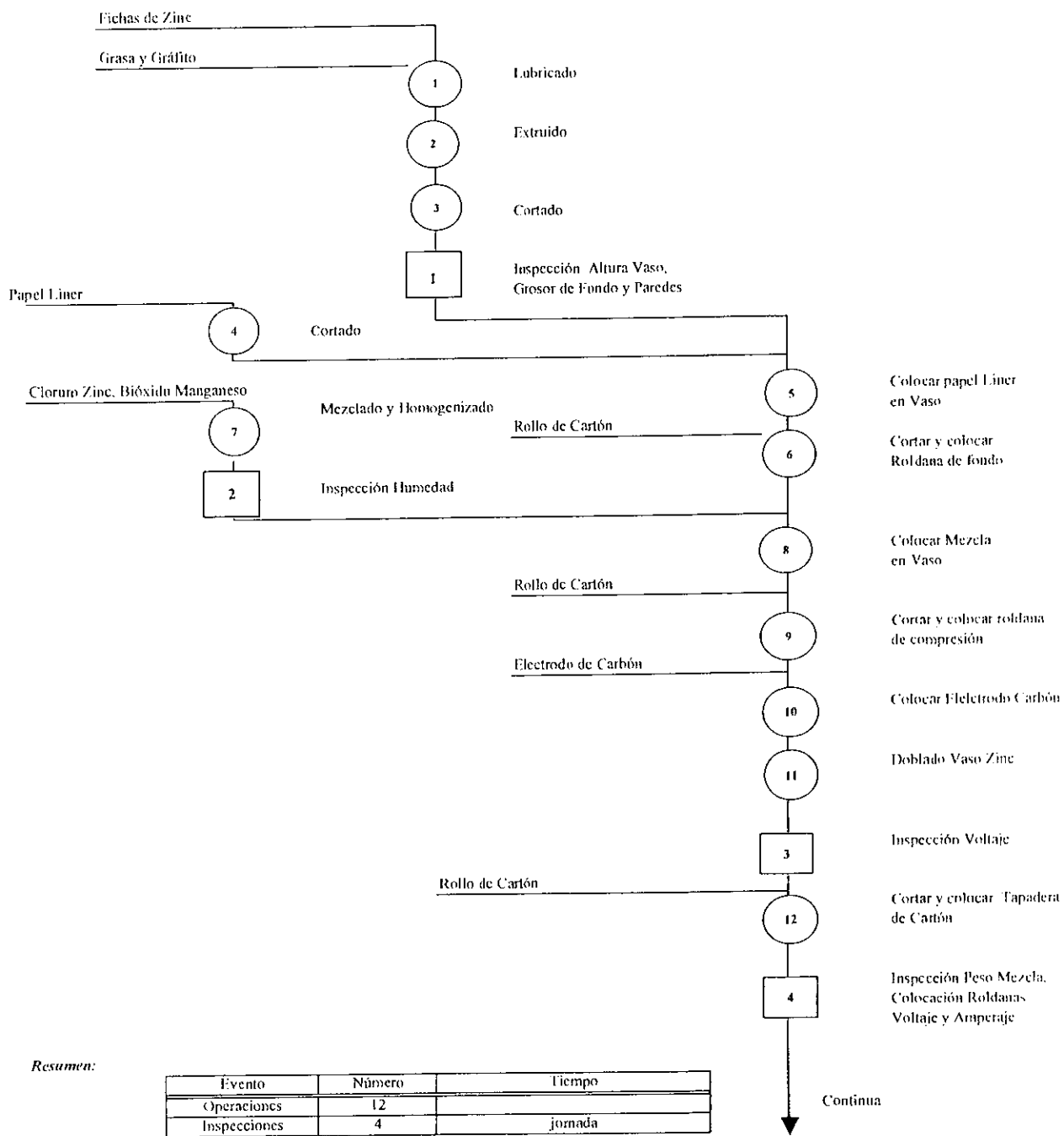
En esta área se ensambla la pila, a la cual solamente es necesario colocarle protección y empaque, pues ya tiene potencial eléctrico. El proceso de ensamblaje de pilas es realizado por una misma máquina, comprendiendo los siguientes pasos:

1. Los vasos provenientes del área de extrusión ingresan a la máquina por arriba, bajando por gravedad en un carril.
2. El papel Liner es doblado y enrollado, siendo colocado enfrente de los vasos vacíos.
3. El papel Liner es introducido dentro del vaso, siendo cortado por estrangulación.
4. El papel Liner es empujado al fondo del vaso, debiendo tener el mismo tamaño que el vaso.
5. El fondo de cartón es desenrollado, cortado y formado, siendo empujado al fondo del vaso.
6. La mezcla es transportada por faja y alimentada a un depósito, de donde es posteriormente colocada a presión dentro del vaso.
7. El cartón para la roldana de compresión es desenrollado y cortado, siendo colocada a presión sobre la mezcla.
8. El electrodo de carbón es insertado en el vaso, entrando a presión y compactando la mezcla.
9. La orilla del vaso es doblada, dejando un espacio para la cámara de aire.
10. La pila ya armada pasa por un sensor de voltaje, el cual expulsa de manera automática la

pila con un potencial muy bajo.

11. El cartón para tapadera es desenrollado , cortado y colocado sobre el vaso.
12. La pila es sacada por una faja y llevada a otra área de la planta.

**DIAGRAMA DE OPERACIONES DE PROCESO**  
 Proceso Manufactura Pila Seca Método Actual  
 Dibujo No. 1  
 Trasado por H. S. Webb



## VI. METODOLOGIA

### A. Descripción del Problema:

La cantidad de mezcla agregada a cada pila, así como su capacidad eléctrica son características de calidad fundamentales en este proceso, las cuales son muy difíciles de ajustar y controlar. Ambas características se encuentran determinadas por el tipo de mezcla que sea utilizada para la pila, la cual depende de la marca y tipo de la materia prima, la fórmula utilizada y el procedimiento utilizado para su mezcla. La variación en las materias primas que componen la mezcla debe ser compensada modificando la fórmula y los parámetros del proceso de manera empírica de acuerdo a la experiencia del encargado de mezcla.

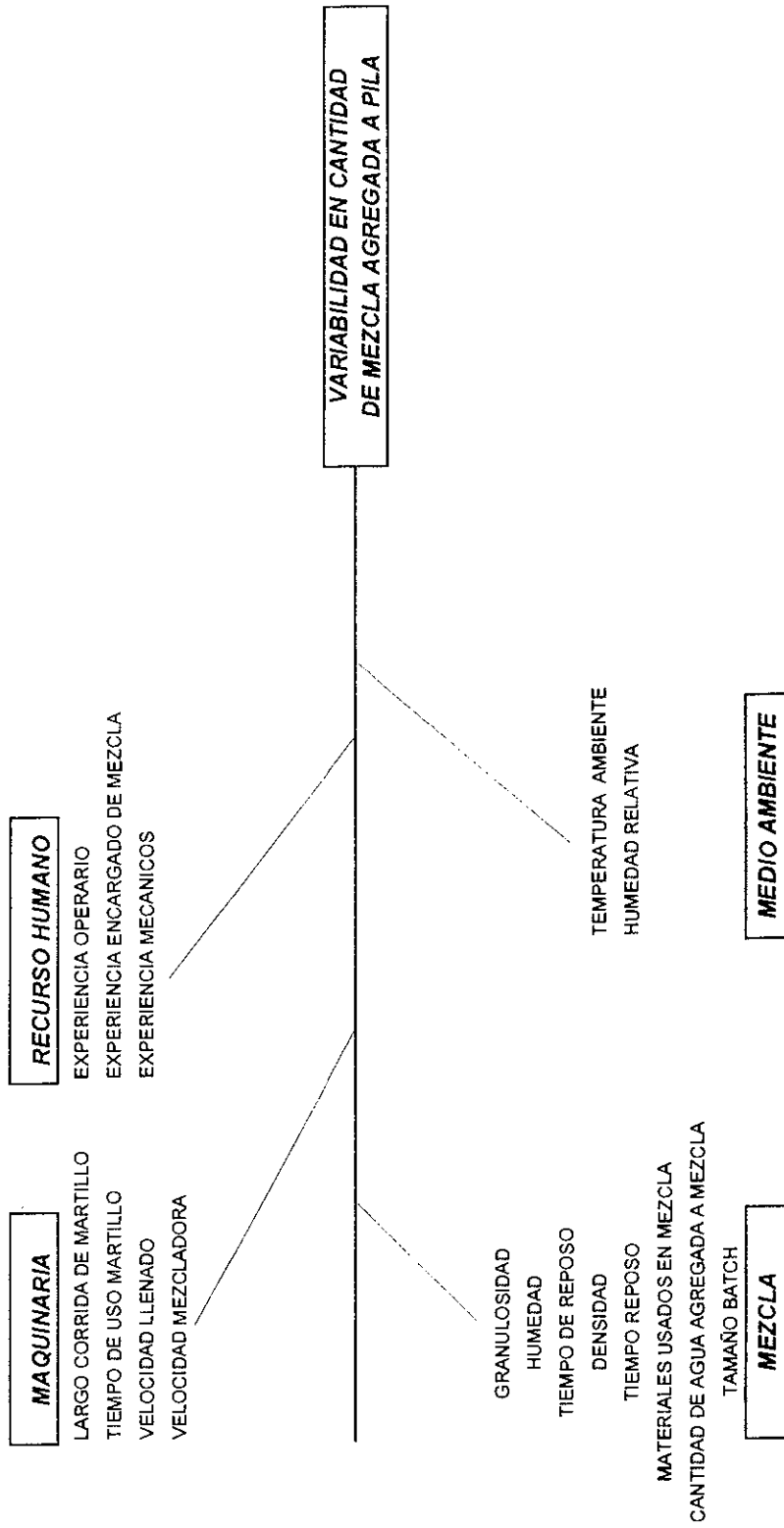
Este análisis empírico de los parámetros del proceso de mezcla, no ha permitido lograr una optimización de los diferentes factores que afectan la cantidad de mezcla agregada a la pila o la capacidad eléctrica de esta, por lo que ambas muestran demasiada variabilidad con cada bolsa de mezcla producida. A través del análisis del efecto de los factores críticos sobre estas características de la pila, se espera determinar las combinaciones y niveles de cada uno de estos factores que maximicen la capacidad de la pila y reduzcan la variabilidad en la cantidad de mezcla agregada, sin alterar las demás variables de calidad de la pila. Los resultados obtenidos en este experimento permitirán a la empresa utilizar la combinación óptima de factores para maximizar la capacidad eléctrica de la pila, minimizar la variabilidad en el peso de la pila y en caso fuera necesario, realizar algún cambio en la mezcla o en el proceso, contar con un procedimiento de experimentación para determinar los nuevos niveles de los factores que afectan el proceso.

Para una mejor comprensión del problema se procedió a tomar muestreos aleatorios de pilas, midiéndose la cantidad de mezcla agregada a cada una. En base a los resultados obtenidos se desarrollaron diagramas de control, los cuales muestran el comportamiento de esta variable a través del tiempo.

Los Factores que afectan la cantidad de mezcla agregada por pila son:

1. Velocidad de llenado de mezcla en vaso
2. Humedad de la mezcla
3. Velocidad de mezcladora dentro de recipiente de mezcla
4. Tiempo de reposo de la mezcla
5. Tiempo de uso de martillo
6. Densidad de mezcla
7. Granulometría de la mezcla
8. Temperatura y presión barométrica ambiente
9. Cantidad de ingredientes agregados a la mezcla.
10. Tamaño del lote de mezcla.
11. Velocidad de dosificación de líquidos.
12. Calidad de materias primas utilizadas.
13. Experiencia del operario encargado de la máquina de ensamble
14. Experiencia del encargado de mezcla
15. Experiencia del mecánico que ajusta la maquinaria

**DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO**  
**VARIABILIDAD EN CANTIDAD DE MEZCLA**  
**AGREGADA A PILA SECA**



## B. Metodología experimental

Como primer paso en la metodología empleada por el profesor Taguchi, se seleccionó una característica crítica de calidad, peso de mezcla en una pila, sobre la cual se analizará el efecto de diversos factores. Esta característica fue seleccionada, pues incide directamente sobre la capacidad eléctrica de la pila, la cual es percibida por el consumidor final en la forma de duración de la pila bajo diversas condiciones de descarga.

El segundo paso fue seleccionar un diseño experimental para los factores controlables. El diseño experimental se realizará utilizando un arreglo ortogonal **L8**, el cual permite un análisis máximo de 7 factores con 2 niveles cada uno. En este caso específico el arreglo ortogonal se utilizará para analizar 4 factores con 2 niveles cada uno, pudiendo además analizar 3 efectos de interacción entre los factores.

El diseño L8 presenta las siguientes combinaciones:

*Diseño L8:*

<i>Experimento #:</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
2	-1	-1	1	1	1	-1	-1
3	-1	1	-1	1	-1	1	-1
4	-1	1	1	-1	-1	-1	1
5	1	-1	-1	1	-1	-1	1
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1
7	1	1	-1	-1	1	-1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 5.1.

donde:

el factor A: Cantidad de agua agregada

- el factor B: Tiempo reposo bolsa  
c/mezcla
- el factor C: Tiempo de uso del martillo de  
compresión
- el factor D: Cantidad de mezcla en depósito

Los factores controlables que se han seleccionado a partir del conjunto de factores que influyen en la capacidad eléctrica de la pila son a base de experiencia ingenieril. En la Tabla anterior 1, indica el nivel alto de cada factor, mientras que -1 es el nivel inferior de cada factor.

Estos son:

<i>FACTORES</i>		<i>NIVELES</i>	
		<i>BAJO</i>	<i>BAJO</i>
A	Cantidad de agua agregado	51 l	53 l
B	Tiempo reposo bolsa c/mezcla	18 h	24 h
C	Uso del martillo de compresión (golpes por martillo)	< 100,000 pilas	> 350,000 pilas
D	Cantidad de mezcla en depósito	8 cm	15 cm

Tabla 5.2 Factores experimentales

Una vez definidos los factores y sus niveles, se procedió a dar las combinaciones posibles según el diseño experimental del arreglo ortogonal L8 (ver tablas anteriores).

Posteriormente se procedió a realizar las pruebas de acuerdo a un orden experimental aleatorio. Cada corrida del experimento tiene como resultado una bolsa con mezcla para pila, las cuales fueron utilizadas para ensamblar pilas, tomándose una muestra de las pilas producidas, las cuales fueron analizadas para determinar la variabilidad en peso y en capacidad eléctrica de las pilas de determinada bolsa. Puesto que uno de los factores a analizar era el tiempo de reposo de una bolsa con mezcla, se decidió tomar las muestras durante el período de una hora,

considerándose que este efecto sería mínimo. Las combinaciones para preparar las 8 bolsas de mezcla a analizar se presentan en la tabla 5.3:

número corrida experimental	número de orden	Cantidad de Agua (l.)	Tiempo de reposo (h.)	Uso martillo (golpes)	Altura de mezcla (cm)
8	1	51	18	< 100,000	8
6	2	51	18	> 350,000	15
5	3	51	24	< 100,000	15
7	4	51	24	> 350,000	8
4	5	53	18	< 100,000	15
3	6	53	18	> 350,000	8
1	7	53	24	< 100,000	8
2	8	53	24	> 350,000	15

Tabla 5.3. Combinación de factores experimentales

Para la toma de muestras se procedió a tomar el peso de un grupo de vasos de zinc, marcándoles con un número diferente cada uno. Puesto que se decidió tomar las muestras de cada bolsa durante el período de una hora, se armaron sub grupos racionales (muestras) de 5 pilas cada uno los cuales serían tomados del proceso cada 10 minutos. El proceso de toma de muestras consiste en colocar un vaso de zinc previamente marcado y tarado en la línea de alimentación de la máquina que está usando la bolsa con mezcla experimental y retirarlo luego que la máquina haya colocado la roldana de compresión. Para el cálculo de la cantidad de mezcla agregada a la pila es necesario pesar el vaso con mezcla y restarle la tara del vaso y el peso promedio del resto de elementos colocados por la máquina (roldanas, electrodo, papel liner, etc). En base a esta información experimental se hacen diagramas de control ( $\bar{X}$  y  $R$ ) para la bolsa experimental.

Luego de realizadas todas las corridas experimentales, se procedió al análisis de los resultados, calculando los valores de la relación S/N (señal sobre ruido) obtenidas de los resultados

experimentales para cada una de las condiciones de prueba de los factores controlables. Este valor fue considerado como parámetro de variación. Puesto que las especificaciones de la pila indican que esta debe llevar una cantidad media de mezcla de aproximadamente 9.2 gramos, se tomó este como valor objetivo para calcular el factor Señal / Ruido del tipo Valor Nominal es mejor.

Un alto valor de la relación S/N significa que una menor variabilidad está presente. Al contar con los valores de la relación S/N, estos fueron analizados para cada uno de los factores. A través de este análisis, se identificaron los factores que afectan la variabilidad de los resultados. Basados en esta información, se procedió a seleccionar el nivel del factor en donde se observa un valor de S/N más alto ya que este proporciona un nivel óptimo (mínima variación).

Las combinaciones e interacciones de los factores seleccionados anteriormente serán analizados y controlados para minimizar la variabilidad en la cantidad de mezcla agregada a la pila con respecto al valor objetivo de 9.2 gramos por pila.

## VIII. RESULTADOS

A continuación se detallan las tablas de respuesta con los resultados (peso de mezcla promedio y factor S / N) para las ocho corridas experimentales desarrolladas:

TABLA DE EFECTOS PRINCIPALES					
		FACTOR	Nivel 1 S / N	Nivel 2 S / N	N 2 - N 1
1	A	Cantidad de agua agregada	18.9430	16.5110	(2.4320)
2	A x C	Interacción cantidad agua y uso martillo	18.1590	17.2950	(0.8640)
3	C	Uso martillo	18.3860	17.0690	(1.3170)
4	A x B	Interacción cantidad agua y tiempo reposo	17.0040	18.4510	1.4470
5	B	Tiempo de reposo	18.3910	17.0630	(1.3280)
6	B x C	Interacción uso martillo y tiempo reposo	19.4550	15.9990	(3.4560)
7	D	Altura mezcla	17.4210	18.0330	0.6120

Tabla 8.1 Efectos principales S/N.

## RESULTADOS EXPERIMENTO # 1

FACTORES: Agua (l): 51      Reposo (h): 18      Uso Martillo (golpes): < 100,000      Altura Tanque (cm): 8

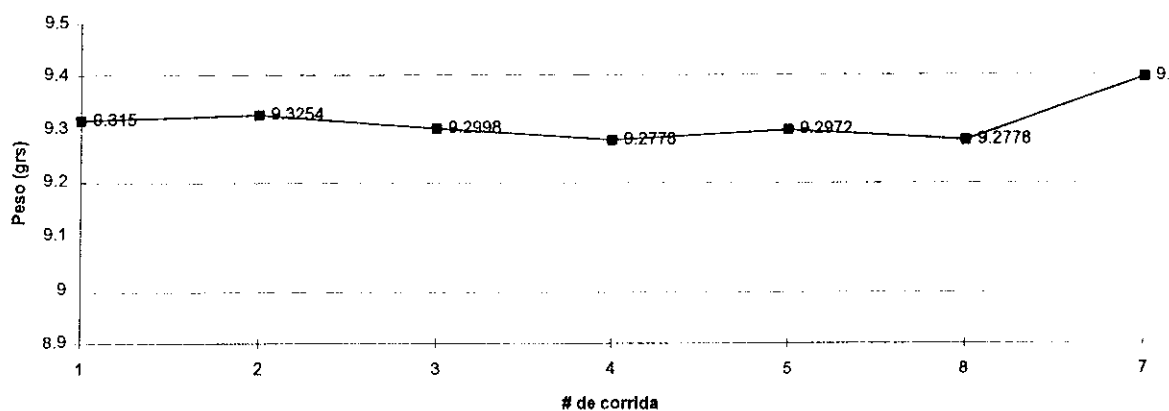
Peso otros componentes: (gr.)

1.8

HORA:	MUESTRA	1	2	3	4	5	Promedio	Max.	Min.	Rango
10:00	<b>1</b>	9.314	9.344	9.309	9.271	9.337	9.315	8.344	9.271	0.073
10:10	<b>2</b>	9.300	9.339	9.397	9.284	8.307	9.3254	8.397	8.284	0.113
10:20	<b>3</b>	9.295	9.291	9.323	9.271	9.319	9.2998	9.323	9.271	0.052
10:30	<b>4</b>	9.270	9.295	9.325	9.190	9.309	9.2778	9.325	9.190	0.135
10:40	<b>5</b>	9.348	9.291	9.321	9.265	9.261	9.2972	8.348	8.281	0.087
10:50	<b>6</b>	9.256	9.385	9.280	9.134	9.331	9.2778	9.385	8.134	0.252
11:00	<b>7</b>	9.409	9.496	9.369	9.440	9.268	9.3964	9.496	8.268	0.228

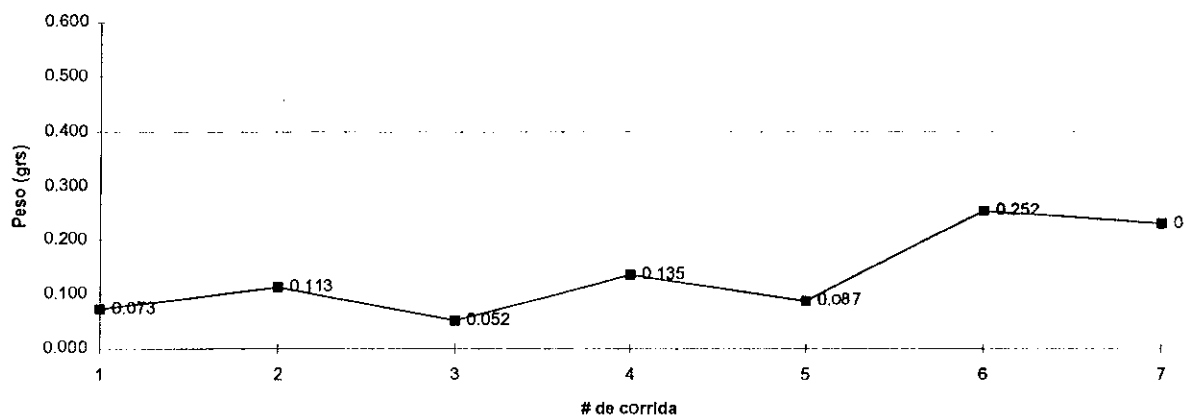
Tabla 8.2

Diagrama de control de Pesos



Gráfica 8.1

Diagrama de control de Rangos



Gráfica 8.2

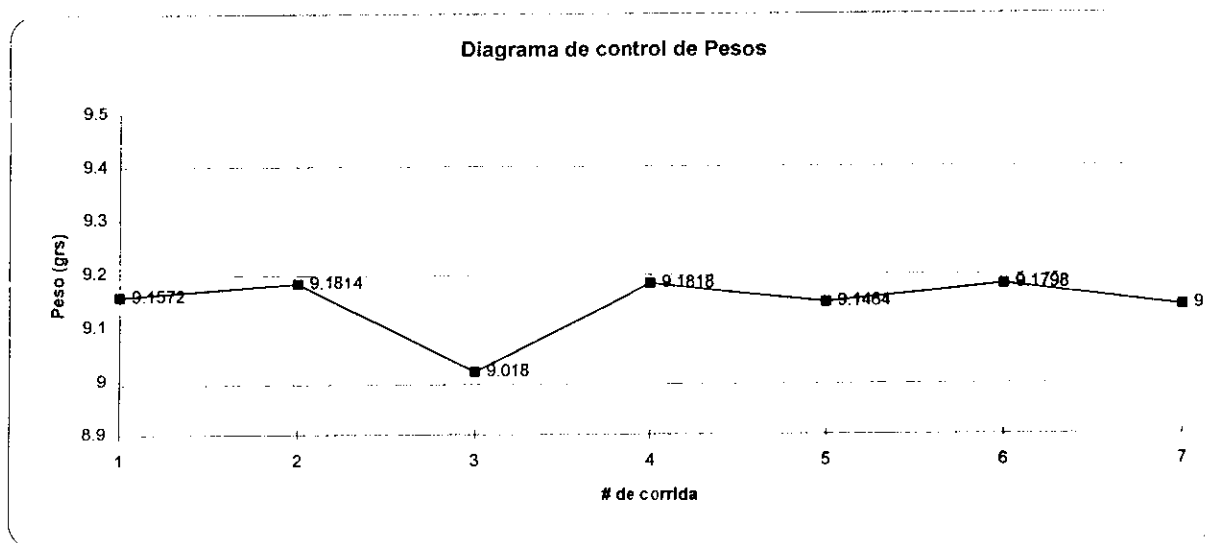
## RESULTADOS EXPERIMENTO # 2

FACTORES: Agua (l): 51      Reposo (h): 18      Uso Martillo (golpes): > 350,000      Altura Tanque (cm): 15

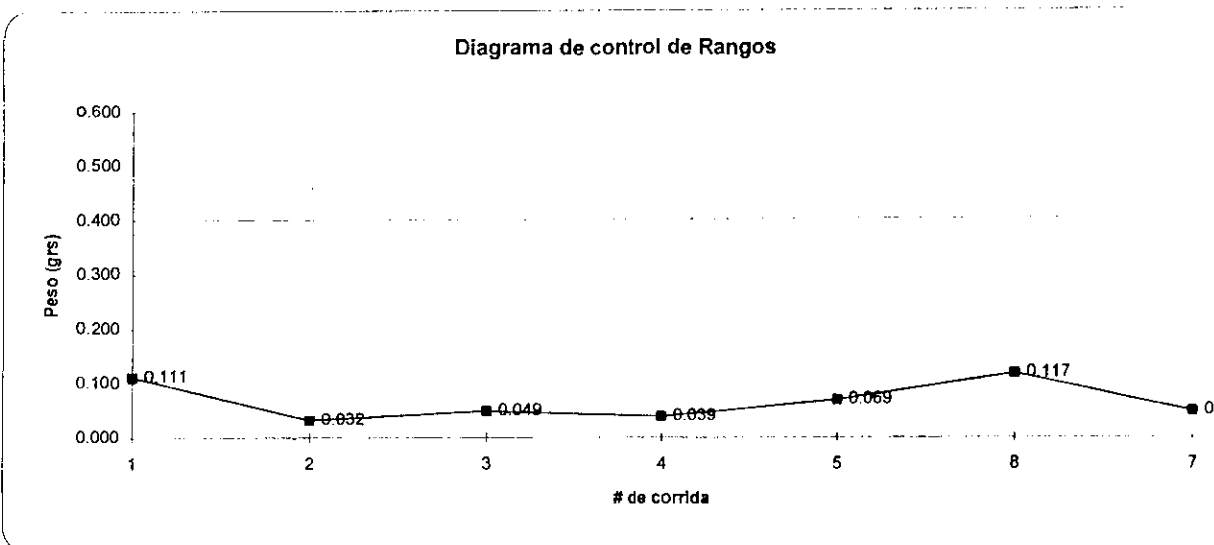
Peso otros componentes: (gr.) 1.8

HORA:	MUESTRA	1	2	3	4	5	Promedio	Max.	Min.	Rango
08:30	<b>1</b>	9.121	9.103	9.163	9.185	9.214	9.1572	9.214	9.103	0.111
08:40	<b>2</b>	9.173	9.173	9.201	9.191	9.169	9.1814	9.201	9.169	0.032
08:50	<b>3</b>	9.008	9.007	9.052	9.020	9.003	9.018	9.052	9.003	0.049
09:00	<b>4</b>	9.205	9.182	9.166	9.188	9.168	9.1818	9.205	9.166	0.039
09:10	<b>5</b>	9.137	9.122	9.132	9.150	9.191	9.1464	9.191	9.122	0.069
09:20	<b>6</b>	9.213	9.192	9.204	9.194	9.096	9.1798	9.213	9.096	0.117
09:30	<b>7</b>	9.129	9.142	9.121	9.189	9.136	9.1394	9.169	9.121	0.048

Tabla 8.3



Gráfica 8.3



Gráfica 8.4

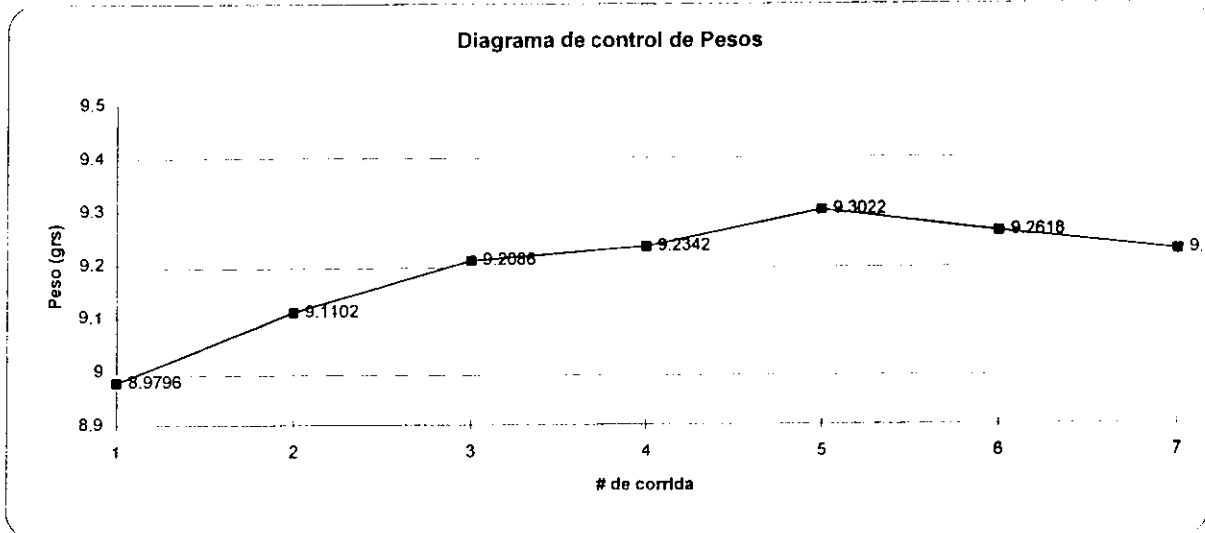
RESULTADOS EXPERIMENTO # 3

FACTORES: Agua (l): 51      Repose (h): 24      Uso Martillo (golpes): < 100,000      Altura Tanque (cm): 15

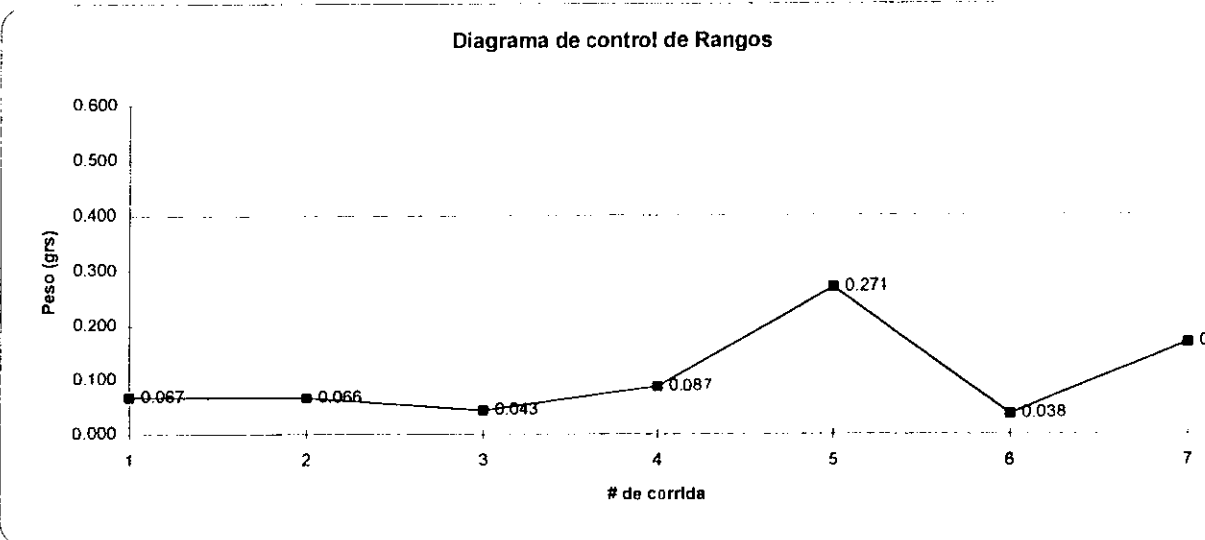
Peso otros componentes: (gr.) 1.8

HORA:	MUESTRA	1	2	3	4	5	Promedio	Max.	Min.	Range
13:39	<b>1</b>	8.944	9.011	9.000	8.990	8.953	8.8796	9.011	8.944	0.067
13:49	<b>2</b>	9.120	9.104	9.146	9.950	9.191	8.1102	9.146	9.080	0.066
13:59	<b>3</b>	9.194	9.191	9.234	9.224	9.200	9.2086	9.234	8.191	0.043
14:00	<b>4</b>	9.223	9.240	9.249	9.186	9.273	9.2342	8.273	8.186	9.087
14:10	<b>5</b>	9.229	9.300	9.496	9.261	9.225	8.3022	8.496	9.225	0.271
14:20	<b>6</b>	8.247	9.281	9.248	9.263	9.259	9.2618	8.283	9.247	0.936
14:30	<b>7</b>	9.271	9.251	9.239	9.271	9.103	9.227	9.271	9.193	0.188

Tabla 6.4



Gráfica 8.5



Gráfica 8.6

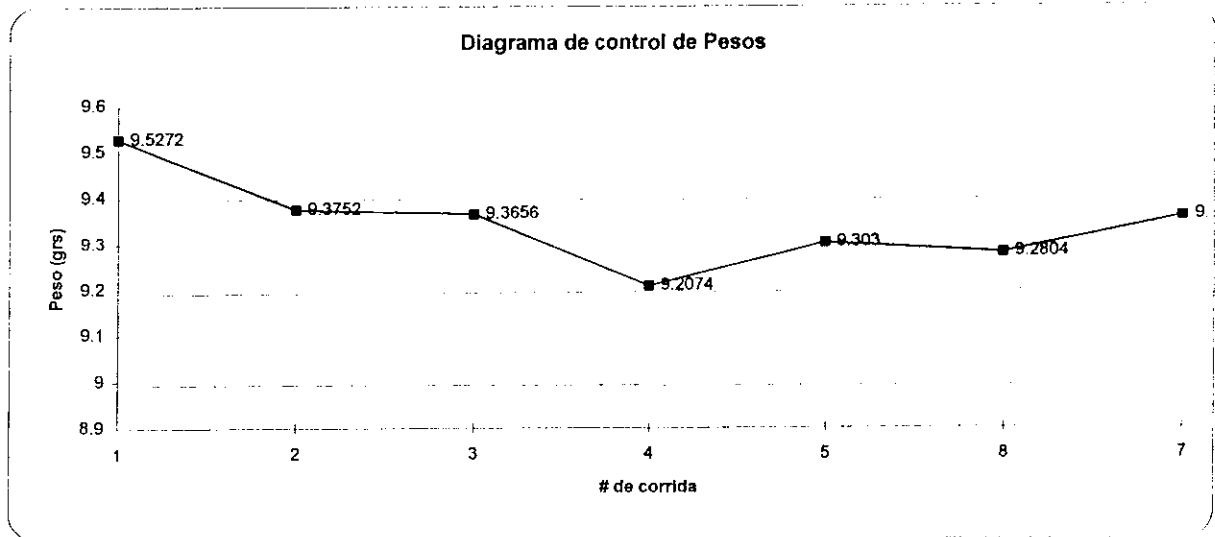
RESULTADOS EXPERIMENTO # 4

FACTORES: Agua (l): 51      Reposa (h): 24      Uso Martillo (golpes): > 350,000      Altura Tanque (cm): 8

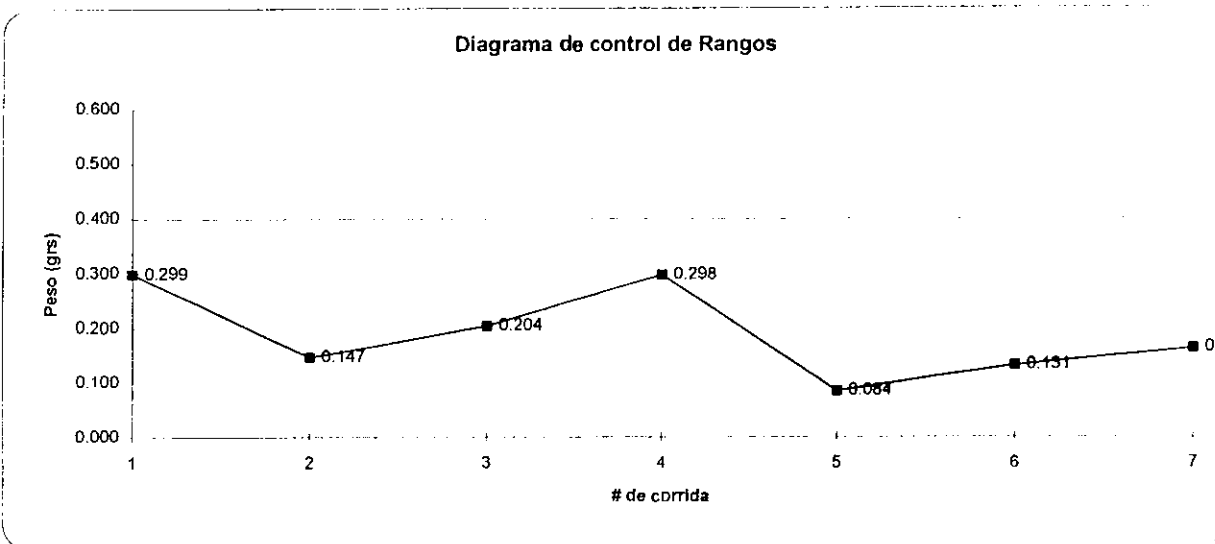
Pasa otros componentes: (gr)      1.8

HORA:	MUESTRA	1	2	3	4	5	Promedio	Max.	Min.	Rango
13:30	<b>1</b>	9.588	8.550	9.522	9.334	9.633	9.5272	9.633	9.334	0.299
13:40	<b>2</b>	9.371	9.450	9.321	9.431	9.303	9.3752	9.450	9.303	0.147
13:50	<b>3</b>	9.385	9.283	9.497	9.340	9.333	9.3656	9.467	9.283	0.204
14:00	<b>4</b>	9.321	9.287	9.277	9.023	9.128	9.2074	9.321	9.023	0.288
14:10	<b>5</b>	9.309	9.345	9.261	9.300	9.300	9.303	9.345	9.261	0.084
14:20	<b>6</b>	9.326	9.304	9.295	8.282	9.185	9.2904	9.326	9.185	0.131
14:30	<b>7</b>	9.406	9.261	9.366	9.337	9.424	9.3568	9.424	9.261	0.183

Tabla 8.5



Gráfica 8.7



Gráfica 8.8

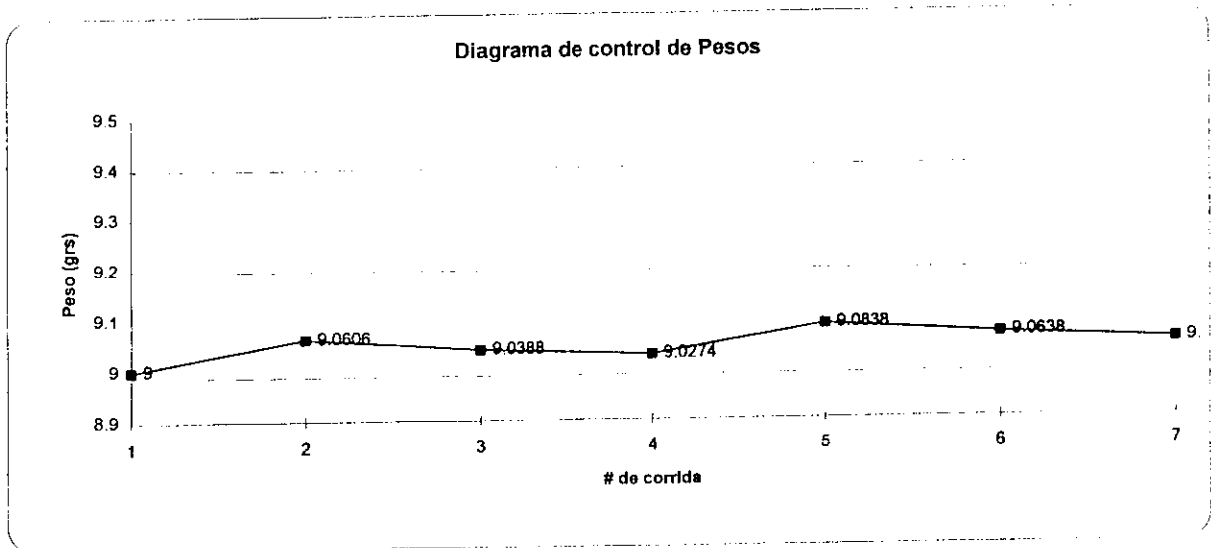
RESULTADOS EXPERIMENTO # 5

FACTORES: Agua (l): 53      Reposo (h): 18      Uso Martillo (golpes): < 100,000      Altura Tanque (cm): 15

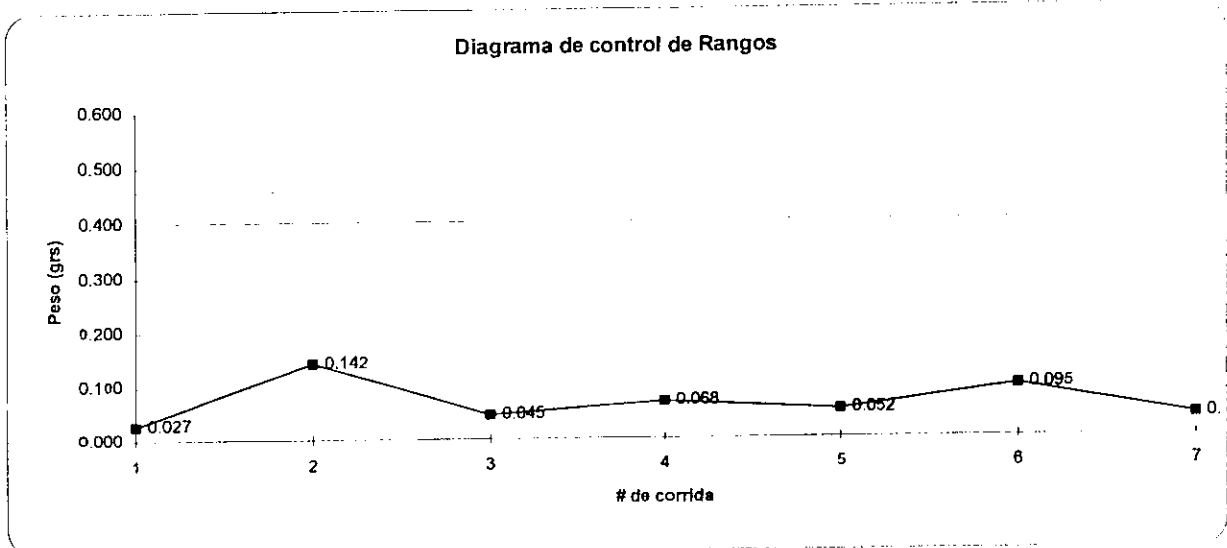
Pesa aros componentes: (gr.)      1.8

HORA:	MUESTRA	1	2	3	4	5	Promedio	Max.	Min.	Rango
13:30	<b>1</b>	9.002	9.999	9.984	9.004	9.011	9	9.011	8.984	0.027
13:40	<b>2</b>	9.870	9.077	9.043	9.112	9.101	9.0606	9.112	8.970	0.142
13:50	<b>3</b>	9.059	9.059	9.032	9.014	9.031	9.0389	9.059	9.014	0.045
14:00	<b>4</b>	9.994	9.953	9.007	9.062	9.021	9.0274	9.062	8.994	0.068
14:10	<b>5</b>	9.097	9.094	9.051	9.103	9.084	9.0638	9.103	9.051	0.052
14:20	<b>6</b>	9.123	9.928	9.051	9.049	9.069	9.0638	9.123	9.029	0.095
14:30	<b>7</b>	9.065	9.032	9.063	9.062	9.028	9.0496	9.065	9.028	0.039

Tabla 9.6



Gráfica 9.9



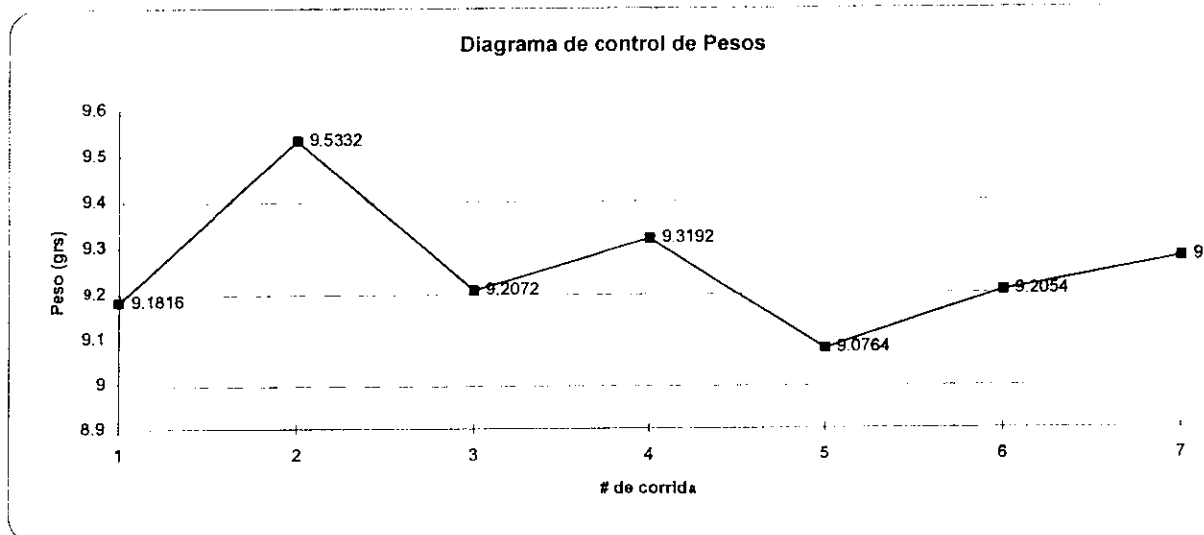
Gráfica 9.10

RESULTADOS EXPERIMENTO #6

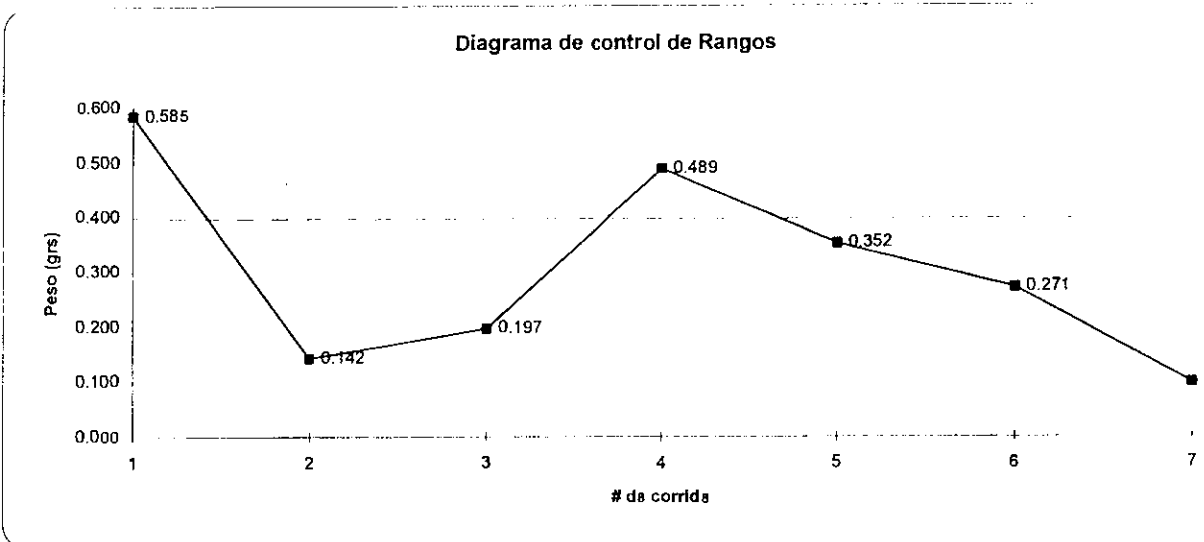
FACTORES: Agua (l): 53      Reposo (h): 18      Uso Martillo(golpes): > 350,000      Altura Tanque (cm): 8

Peso otros componentes: (gr.)		1.8					Promedio	Max.	Min.	Rango
HORA:	MUESTRA	1	2	3	4	5				
11:20	<b>1</b>	9.456	9.309	9.938	9.334	8.871	9.1816	9.456	8.871	0.585
11:30	<b>2</b>	9.534	9.613	9.512	9.536	9.471	9.5332	9.613	9.471	0.142
11:40	<b>3</b>	9.074	9.206	9.271	9.236	9.249	9.2072	9.271	9.074	0.197
11:50	<b>4</b>	9.010	9.261	9.417	9.409	9.499	9.3192	9.499	9.010	0.489
12:00	<b>5</b>	9.892	9.174	9.016	9.244	9.056	9.0764	9.244	8.892	0.352
12:10	<b>6</b>	9.356	9.305	9.121	9.160	9.085	9.2054	9.356	9.085	0.271
12:20	<b>7</b>	9.245	9.330	9.232	9.295	8.284	9.2772	9.330	9.232	0.098

Tabla 8.7



Gráfica 8.11



Gráfica 8.12

RESULTADOS EXPERIMENTO # 7

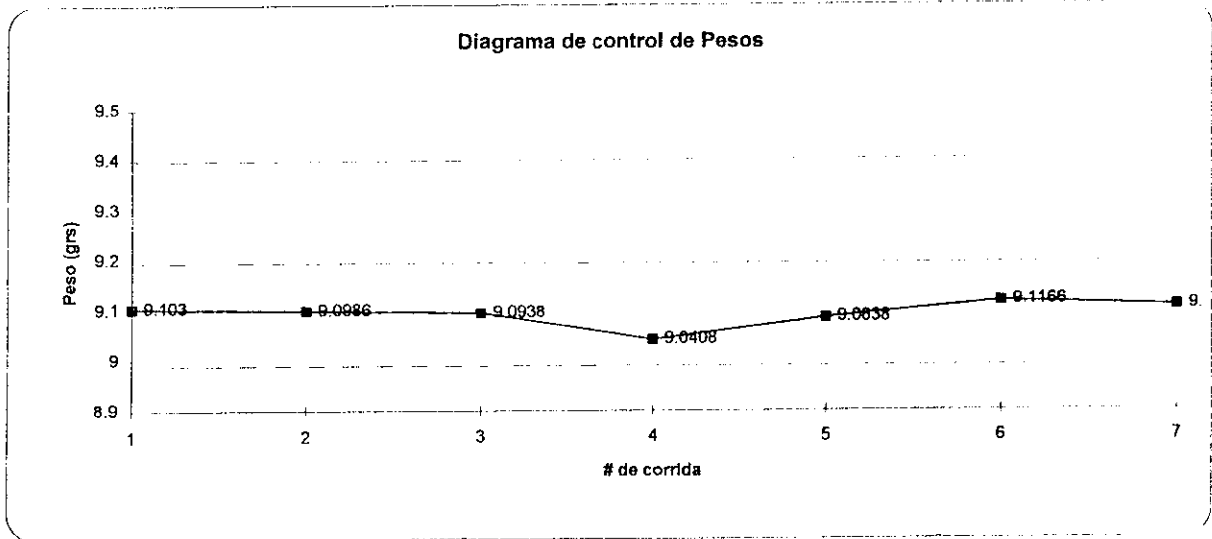
FACTORES: Agua (l): 53      Reposo (h): 24      Uso Martillo (golpes): < 100,000      Altura Tanque (cm): 8

Peso otros componentes: (gr.)

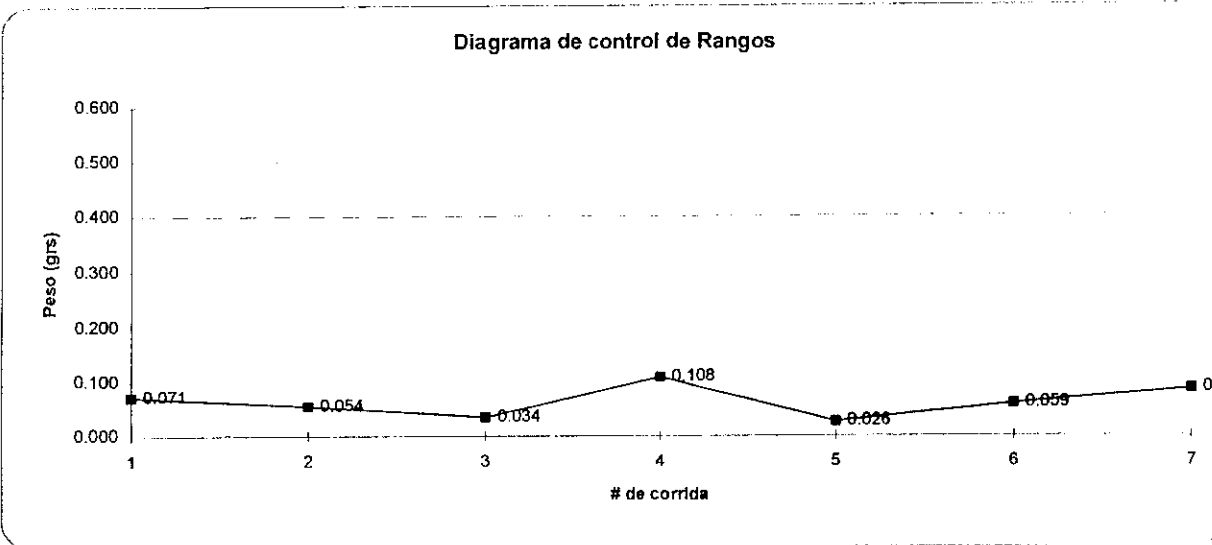
1.8

HORA:	MUESTRA	1	2	3	4	5	Promedio	Max.	Min.	Rango
08:30	<b>1</b>	9.076	9.085	9.107	9.100	9.147	9.103	9.147	9.076	0.071
08:40	<b>2</b>	9.067	9.121	9.121	9.100	9.084	9.0986	9.121	9.067	0.054
08:50	<b>3</b>	9.102	9.079	9.084	9.113	9.091	9.0938	9.113	9.079	0.034
09:00	<b>4</b>	9.000	9.032	9.029	9.108	9.035	9.0408	9.108	9.000	0.108
09:10	<b>5</b>	9.096	9.071	9.097	9.073	9.082	9.0938	9.097	9.071	0.026
09:20	<b>6</b>	9.149	9.090	9.095	9.128	9.121	9.1166	9.149	9.090	0.059
09:30	<b>7</b>	9.139	9.147	9.113	9.061	9.079	9.106	9.147	9.061	0.086

Tabla 8.9



Gráfica 8.13



Gráfica 8.14

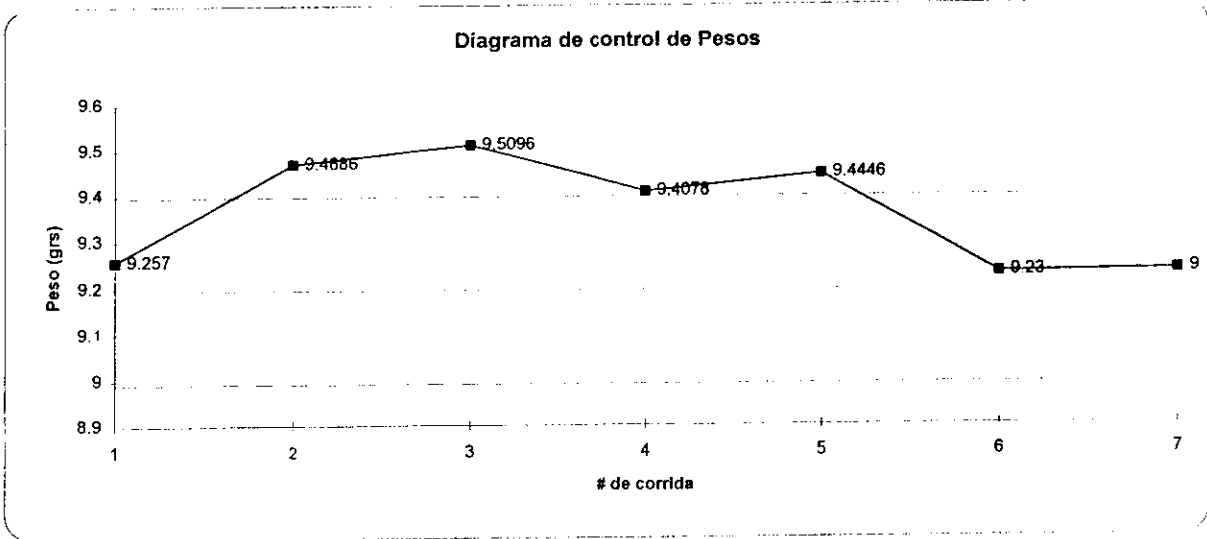
RESULTADOS EXPERIMENTO # 8

FACTORES: Agua (l): 53      Reposo (hr): 24      Uso Martillo (golpes): > 350.000      Altura Tanque (cm): 15

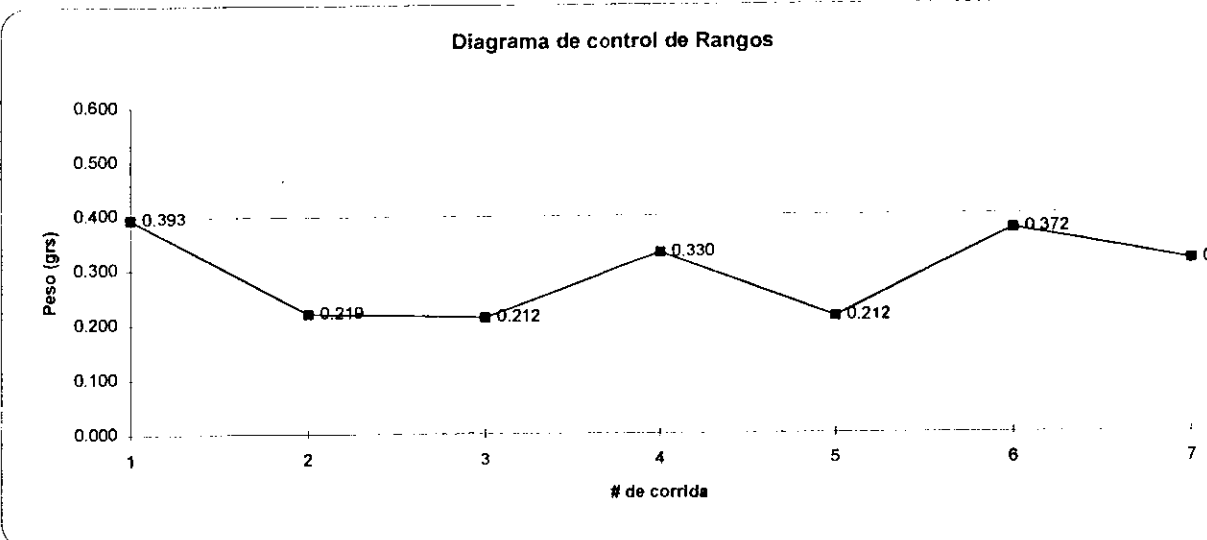
Peso otros componentes: (gr)      1.8

HORA:	MUESTRA	1	2	3	4	5	Promedio	Max.	Min.	Rango
13:30	<b>1</b>	9.369	9.258	9.384	9.283	8.991	9.257	9.384	8.991	0.393
13:40	<b>2</b>	9.518	9.379	9.471	9.379	9.597	9.4686	9.507	9.378	0.219
13:50	<b>3</b>	9.421	9.633	9.508	9.441	9.545	9.5096	8.833	9.421	0.212
14:00	<b>4</b>	9.483	9.440	9.446	9.170	9.500	9.4078	9.500	9.170	0.330
14:10	<b>5</b>	9.529	9.317	9.510	9.464	9.403	9.4446	9.528	9.317	0.212
14:20	<b>6</b>	9.299	9.375	9.301	9.003	9.202	9.23	9.375	8.003	0.372
14:30	<b>7</b>	9.104	9.236	9.285	9.124	9.417	9.2332	8.417	9.104	0.313

Tabla 8.9



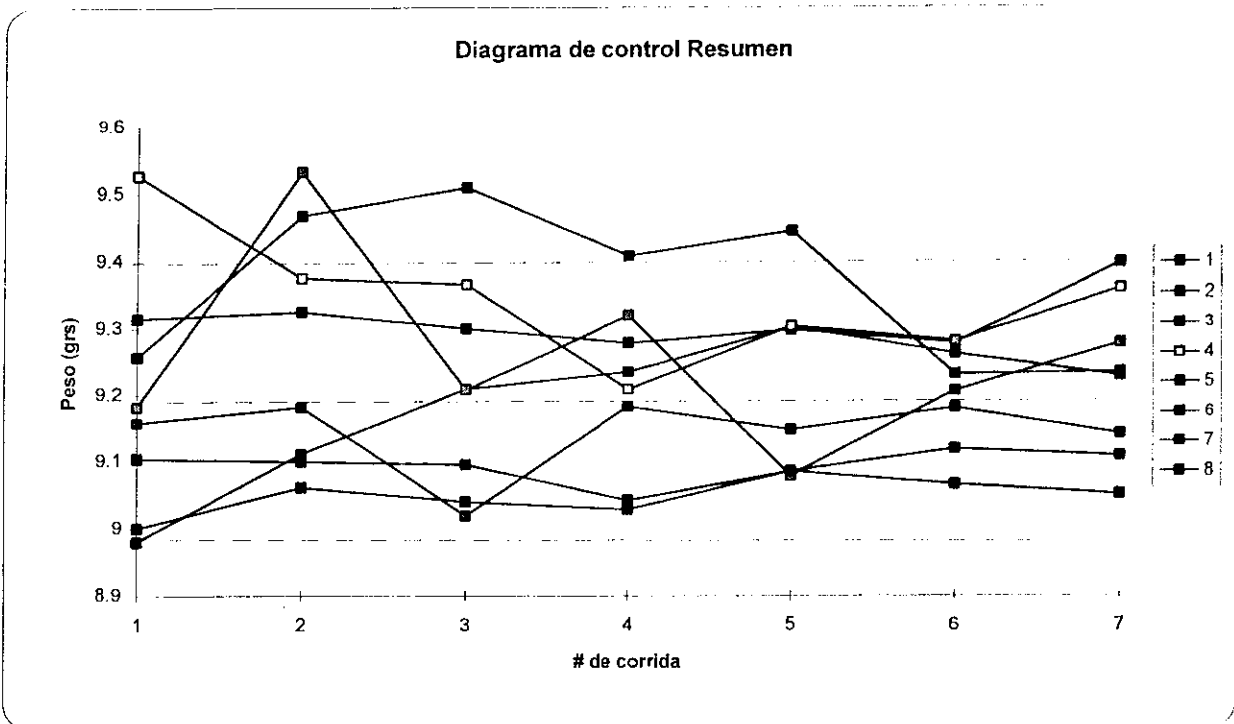
Gráfica 8.15



Gráfica 8.18

Número Experimento	RESULTADOS EXPERIMENTALES							Media muestral	Desviación estandar	Logaritmo de desviación	Factor Señal / Ruido
	1	2	3	4	5	6	7				
1	9.315	9.3254	9.2998	9.2778	9.2972	9.2778	9.3964	9.3128	0.04086	(1.38875)	18.523
2	9.1572	9.1814	9.018	9.1818	9.1464	9.1798	9.1394	9.143	0.05800	(1.23657)	22.139
3	8.9796	9.1102	9.2086	9.2342	9.3022	9.2618	9.227	9.189	0.10958	(0.98028)	19.818
4	9.5272	9.3752	9.3656	9.2074	9.303	9.2804	9.3588	9.345	0.09988	(1.00148)	15.295
5	9	9.0606	9.0388	9.0274	9.0838	9.0638	9.0496	9.048	0.02734	(1.56319)	18.12
6	9.1816	9.5332	9.2072	9.3192	9.0764	9.2054	9.2772	9.257	0.14378	(0.84235)	18.784
7	9.103	9.0986	9.0938	9.0408	9.0838	9.1166	9.106	9.092	0.02469	(1.60749)	19.083
8	9.257	9.4686	9.5096	9.4078	9.4446	9.23	9.2332	9.364	0.12048	(0.91915)	14.058

Tabla 8.10



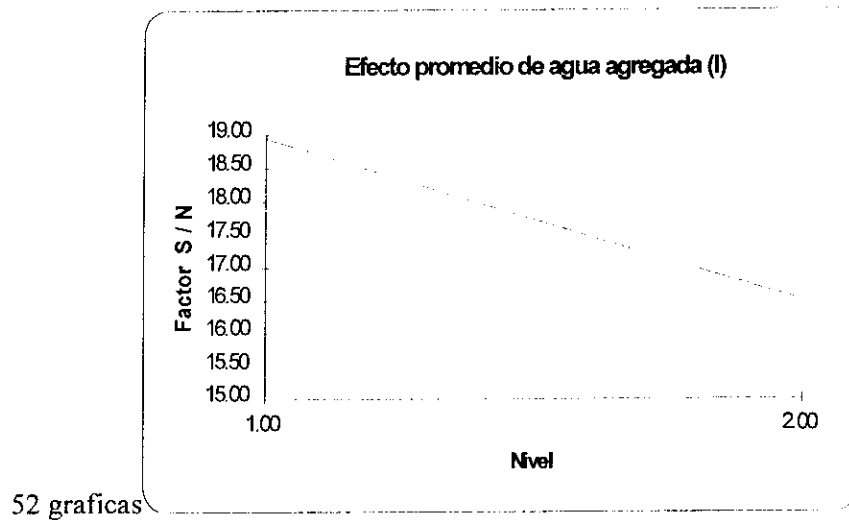
Gráfica 8.17

número corrida experimental	número de orden	Valor de respuesta:	A: Cantidad de Agua (l.)	B: Tiempo de reposo (h.)	C: Uso martillo (golpes)	A x B:	A x C:	B x C:	D: Altura de mezcla (cm)
		Peso Mezcla	51 53	18 24	< 100,000 > 350,000	1 2	1 2	1 2	8 15
8	1	9.3128	9.3128	9.3128	9.3128	9.3128	9.3128	9.3128	9.3128
6	2	9.1434	9.1434	9.1434	9.1434	9.1434	9.1434	9.1434	9.1434
5	3	9.1891	9.1891	9.1891	9.1891	9.1891	9.1891	9.1891	9.1891
7	4	9.3454	9.3454	9.3454	9.3454	9.3454	9.3454	9.3454	9.3454
4	5	9.0463	9.0463	9.0463	9.0463	9.0463	9.0463	9.0463	9.0463
3	6	9.2572	9.2572	9.2572	9.2572	9.2572	9.2572	9.2572	9.2572
1	7	9.0918	9.0918	9.0918	9.0918	9.0918	9.0918	9.0918	9.0918
2	8	9.3644	9.3644	9.3644	9.3644	9.3644	9.3644	9.3644	9.3644
<b>TOTAL:</b>		73.7503	36.9907	36.7597	36.9907	36.8379	36.9124	36.6815	37.0071
<b># VALORES</b>		8	4	4	4	4	4	4	4
<b>PROMEDIO</b>		9.2188	9.2477	9.1899	9.2477	9.2095	9.2281	9.1704	9.2518
<b>EFFECTO</b>			(0.0578)	0.0578	0.1176	0.0186	0.1241	0.0968	(0.0660)

Tabla 8.11 Respuestas experimentales para peso de mezcla

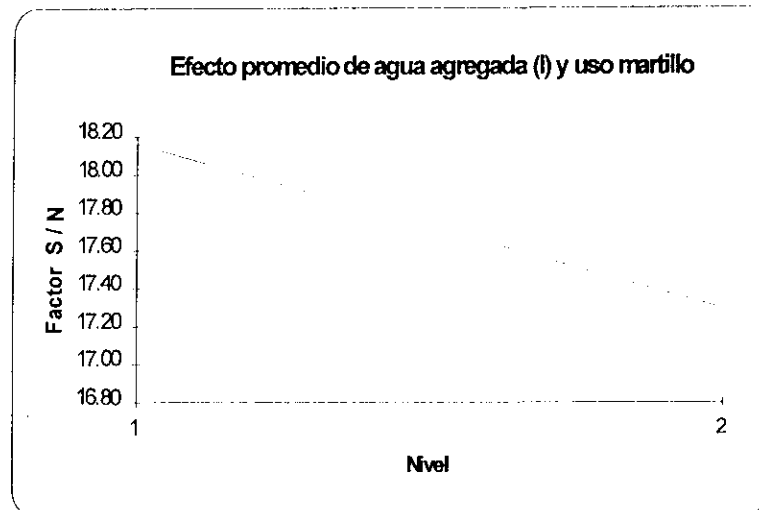
número corrida experimental	número de orden	Valor de respuesta:	A: Cantidad de Agua (l.)	B: Tiempo de reposo (h.)	C: Uso martillo (golpes)	A x B:		A x C:		B x C:		D: Altura de mezcla (cm)
						1	2	1	2	1	2	
		factor	51	18	< 100,000	1	1	1	1	1	1	8
		S / N	53	24	> 350,000	2	2	2	2	2	2	15
8	1	18.5230	18.5230	18.5230	18.5230	18.5230	18.5230	18.5230	18.5230	18.5230	18.5230	18.5230
6	2	22.1390	22.1390	22.1390	22.1390	22.1390	22.1390	22.1390	22.1390	22.1390	22.1390	22.1390
5	3	19.8160	19.8160	19.8160	19.8160	19.8160	19.8160	19.8160	19.8160	19.8160	19.8160	19.8160
7	4	15.2950	15.2950	15.2950	15.2950	15.2950	15.2950	15.2950	15.2950	15.2950	15.2950	15.2950
4	5	16.1200	16.1200	16.1200	16.1200	16.1200	16.1200	16.1200	16.1200	16.1200	16.1200	16.1200
3	6	16.7840	16.7840	16.7840	16.7840	16.7840	16.7840	16.7840	16.7840	16.7840	16.7840	16.7840
1	7	19.0830	19.0830	19.0830	19.0830	19.0830	19.0830	19.0830	19.0830	19.0830	19.0830	19.0830
2	8	14.0580	14.0580	14.0580	14.0580	14.0580	14.0580	14.0580	14.0580	14.0580	14.0580	14.0580
TOTAL:		141.8180	75.7730	68.2520	73.5420	68.2760	68.0150	73.8030	72.6370	69.1810	77.8220	69.6850
# VALDRES		8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
PROMEDIO		17.7273	18.9433	17.0630	18.3855	17.0690	17.0038	18.4508	18.1593	17.2953	19.4555	17.4213
EFECTO			(2.4320)	(1.3285)	(1.3165)	1.4470			(0.8640)		(3.4565)	0.6120

Tabla 8.12 Respuestas experimentales para factor S/N



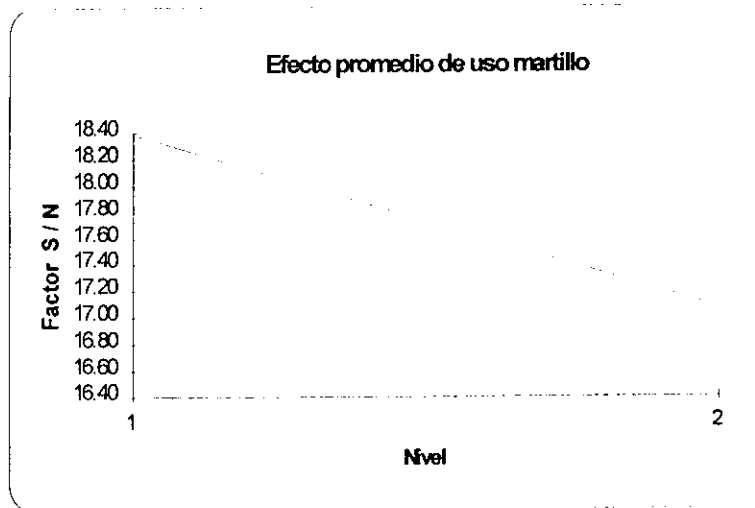
Gráfica 8.18

<i>Nivel</i>	<i>Factor S/N</i>
1.00	18.94
2.00	16.51



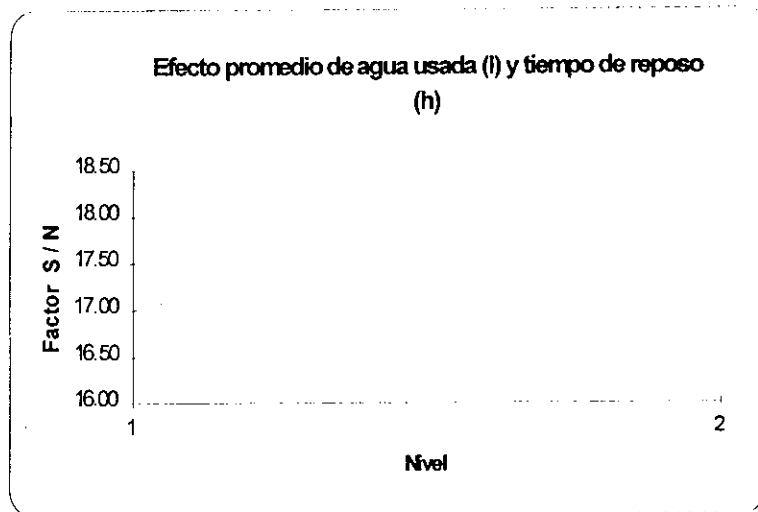
Gráfica 8.19

<i>Nivel</i>	<i>Factor S/N</i>
1	18.16
2	17.30



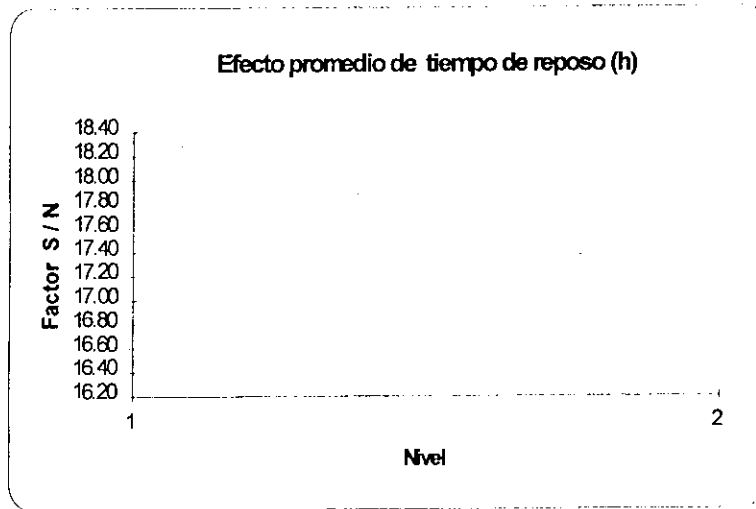
Gráfica 8.20

<i>Nivel</i>	<i>Factor S/N</i>
1	18.39
2	17.07



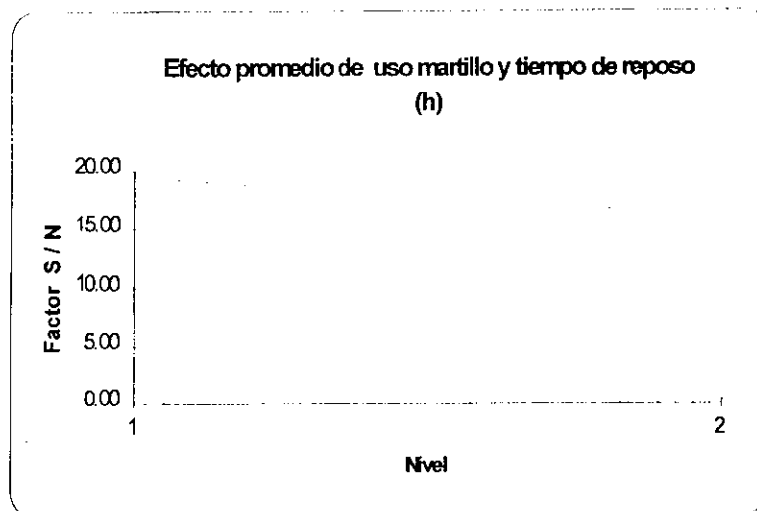
Gráfica 8.21

<i>Nivel</i>	<i>Factor S/N</i>
1	17.00
2	18.45



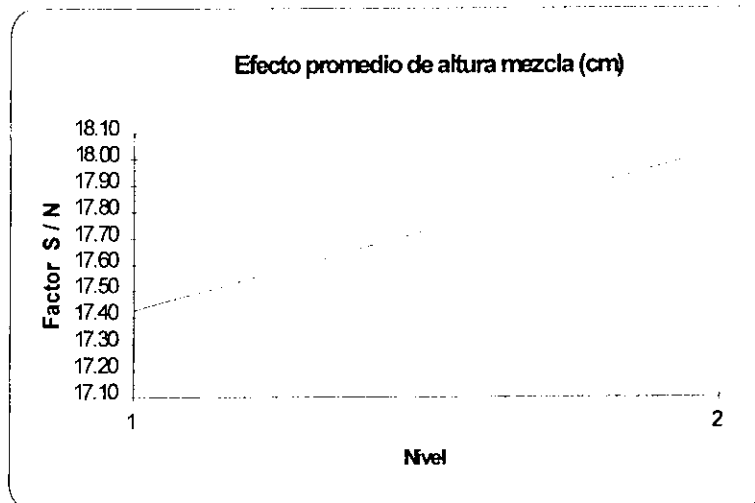
Gráfica 8.22

<i>Nivel</i>	<i>Factor S/N</i>
1	18.39
2	17.06



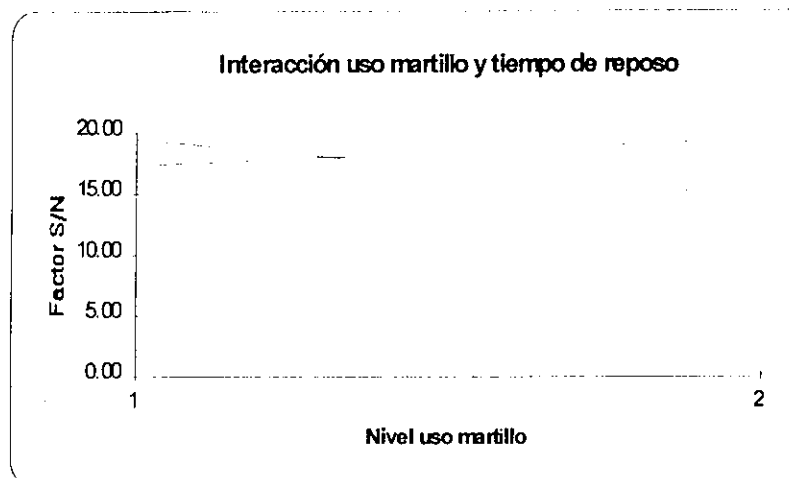
Gráfica 8.23

<i>Nivel</i>	<i>Factor S/N</i>
1	19.46
2	16.00



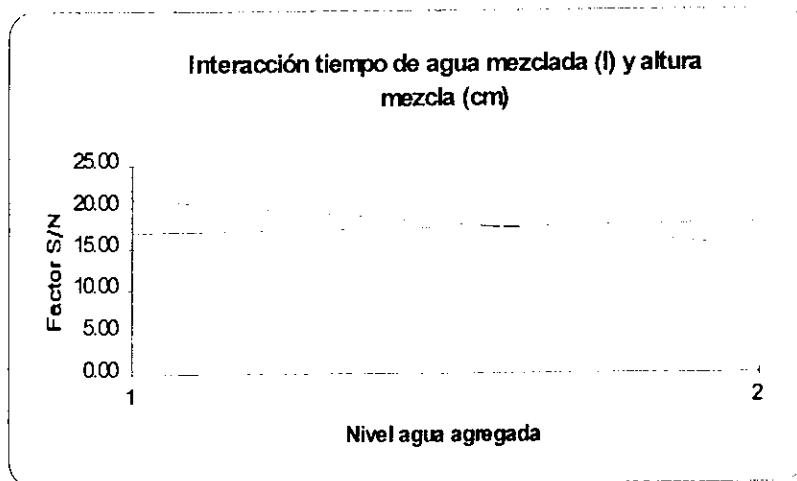
Gráfica 8.24

<i>Nivel</i>	<i>Factor S/N</i>
1	17.43
2	18.03



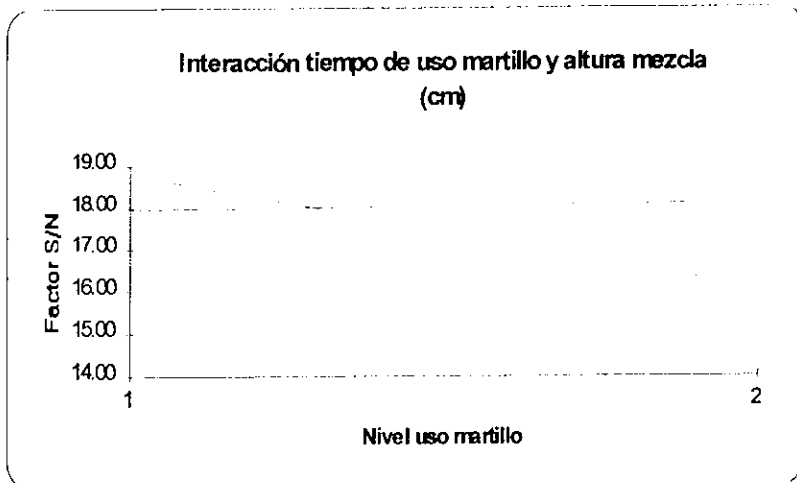
Gráfica 8.25

<i>Nivel</i>	<i>Nivel 1</i>	<i>Nivel 2</i>
1	19.45	17.32
2	14.67	19.46



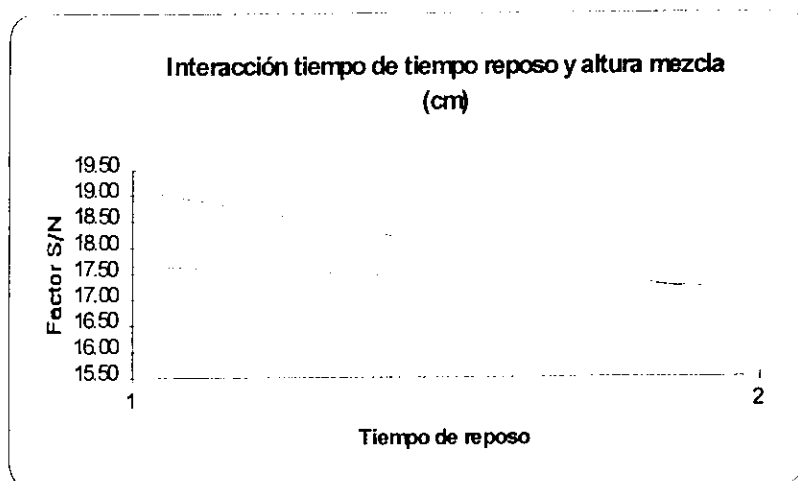
Gráfica 8.26

Nivel	Nivel 1	Nivel 2
1	16.90	20.97
2	17.93	15.08



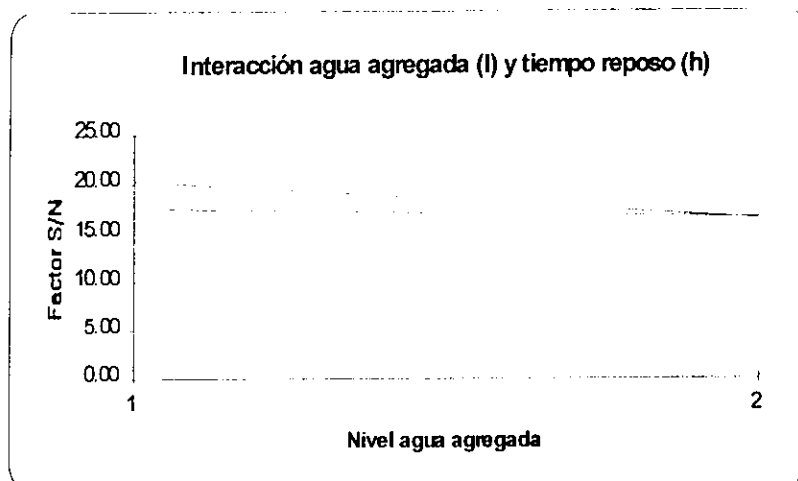
Gráfica 8.27

Nivel	Nivel 1	Nivel 2
1	18.80	17.96
2	16.03	18.09



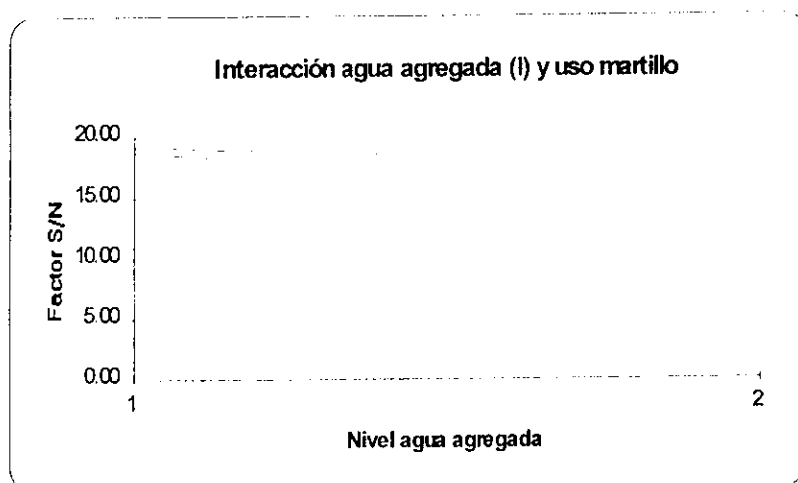
Gráfica 8.28

Nivel	Nivel 1	Nivel 2
1	19.12	17.65
2	16.93	17.18



Gráfica 8.29

Nivel	Nivel 1	Nivel 2
1	20.33	17.55
2	16.45	16.57



Gráfica 8.30

<i>Nivel</i>	<i>Nivel 1</i>	<i>Nivel 2</i>
1	19.17	18.71
2	17.60	15.42

Con base en los resultados experimentales y las interacciones presentes se ha determinado que los niveles óptimos para cada uno de los factores experimentales deben ser:

		FACTOR	Descripción	Nivel	Contribución S / N
1	A	Cantidad de agua agregada	51 l	1	1.2160
2	A x C	Interacción cantidad agua y uso martillo		1	0.4310
3	C	Uso martillo	< 100,000	1	0.6580
4	A x B	Interacción cantidad agua y tiempo reposo		2	0.7230
5	B	Tiempo de reposo	18 h	1	0.6640
6	B x C	Interacción uso martillo y tiempo reposo		1	1.7280
7	D	Altura mezcla	15 cm	2	0.3060

Tabla 8.13 Niveles óptimos.

La columna de contribución es el valor que cada uno de los factores contribuye al valor de Señal / Ruido para la prueba experimental.

## IX. DISCUSION DE RESULTADOS

En la tabla VII es posible observar los niveles de cada uno de los factores experimentales que maximizan el factor Señal / Ruido para la prueba y su contribución individual. De acuerdo con esta Tabla el factor que tiene una mayor influencia en la variabilidad del peso de mezcla es la interacción entre el uso de martillo y el tiempo de reposo que tiene la bolsa con mezcla. La contribución de esta interacción al factor S/N experimental es de 1.728 . A pesar de que el uso del martillo es uno de los factores que tiene una menor contribución al valor Señal / Ruido (0.658) su interacción con el tiempo de reposo de la mezcla hace que se potencialize el efecto de ambos. En la gráfica de interacción entre estos dos factores se puede observar un efecto de interacción negativo entre estos factores. Esta interacción negativa implica que cuando la mezcla tiene 24 horas de reposo, el efecto del cambio en el uso del martillo tiene un mayor efecto negativo (disminuye el factor S/N) que cuando la mezcla tiene 18 horas de reposo. En otras palabras, una mezcla que ha reposado más tiempo se vuelve más sensible a un cambio en el tiempo de uso del martillo, disminuyendo el valor del factor S/N y aumentando la variabilidad en la cantidad de mezcla agregada a la pila conforme aumenta al uso del martillo. Esto se debe a que conforme aumenta el tiempo de reposo de la mezcla, disminuye su humedad relativa debido a la evaporación, haciendo que la mezcla se vuelva menos pastosa, pierda consistencia y sus granos se vuelvan más finos (disminución en tamaño de grano). Conforme aumenta el uso del martillo, este se gasta en las orillas debido al contacto con la mezcla abrasiva, por lo que aumenta la separación entre el martillo y la orilla del vaso que es llenado. Este aumento de la distancia entre vaso y martillo y la disminución en el tamaño del grano de mezcla hacen que se aumente la variabilidad en la cantidad de mezcla agregada a la pila, puesto que cambia la compresión de mezcla dentro del vaso de zinc. .

El segundo factor que tiene un mayor efecto en la variabilidad de la cantidad de mezcla agregada a la pila es la cantidad de agua agregada. En la Tabla de efectos promedio se puede encontrar una relación negativa entre la cantidad de agua agregada y el factor S/N. Esta relación implica que conforme se agrega una mayor cantidad de agua a la bolsa de mezcla, se puede esperar un aumento en la variación del peso de las pilas (disminución del factor S/N). Este aumento en la variación se debe a que en la operación de compresión de la mezcla dentro del vaso de zinc, la cantidad de agua presente en la mezcla tiene un efecto significativo la cantidad de mezcla agregada. Este efecto obedece a que cuando la mezcla tiene mucha agua esta tiende a quedar pegada y manchar las paredes del vaso de zinc con lo que varía la cantidad de mezcla agregada a la pila. Además de afectar la variabilidad en la cantidad de mezcla agregada se determinó que las manchas de mezcla en las paredes de zinc crean un "corto circuito parásito", el cual disminuye el potencial eléctrico de la pila en muy poco tiempo por lo que esta no es apta para uso. Cuando se realizaron las corridas experimentales con 53 litros de agua se observó un aumento significativo en la cantidad de pilas "manchadas" en las orillas, especialmente cuando la máquina utilizaba un martillo gastado (> 350,000 golpes).

La cantidad de agua utilizada en la mezcla tiene una relación negativa con la altura de la mezcla dentro del depósito de la máquina. En la gráfica de interacción de estos factores se puede observar que cuando la altura del tanque de reserva está en su nivel alto (15 cm) el efecto de un aumento en la cantidad de agua en la mezcla tiene un efecto negativo significativo en el factor S/N (aumenta la variabilidad en el peso). Cuando la altura de la mezcla se encuentra en su nivel bajo (8 cm) este efecto pierde significancia pues aumenta el factor S/N aunque no de manera significativa.

La tercera combinación de factores que tienen un mayor efecto sobre la variabilidad de la mezcla agregada a la pila se encuentra cuando se analiza la interacción entre la cantidad de agua agregada y el tiempo de reposo de una bolsa de mezcla se observa una relación negativa, en la cual conforme aumenta la cantidad de agua agregada a la mezcla aumenta de variabilidad del peso de mezcla sin importar cuanto tiempo de reposo haya tenido la mezcla. Este aumento en la variabilidad es más significativo cuando la bolsa ha reposado sólo 18 horas, puesto que el valor de respuesta media ( S/N ) disminuye de 20.33 a 16.45 mientras que cuando la bolsa ha reposado 24 horas este cambio es de 17.55 a 16.57. Esta diferencia indica que la cantidad de mezcla agregada a las pilas es más sensible a un cambio en la cantidad de agua de 51 a 53 litros cuando sólo ha reposado 18 horas debido a que la humedad presente en la mezcla no se ha evaporado tanto como cuando ha reposado 24 horas. A pesar de que también existe una variación negativa en el factor S/N cuando la bolsa ha reposado 24 horas, el aumento en la variabilidad es menor por el cambio de 51 a 53 litros debido a que conforme aumenta el tiempo de reposo de la mezcla el agua tiende a evaporarse. Es necesario recordar que a pesar que cuando la bolsa con mezcla se deja reposar esta se encuentra tapada, esta pierde humedad debido a la evaporación. De igual manera ocurre cuando se analiza la interacción entre la cantidad de agua agregada y el tiempo de uso del martillo, haciéndose más notable el cambio de cantidad de agua cuando se utiliza un martillo viejo. Al utilizar un martillo viejo y cambiar la cantidad de agua en la mezcla de 51 a 53 litros se observa una reducción del factor S/N de 18.17 a 15.42 con lo que aumenta la variación presente en la cantidad de mezcla por pila.

Con base en los resultados experimentales (respuestas promedio) se determinó que existe una relación negativa entre el tiempo de uso del martillo y el factor S/N sin tomar en cuenta el efecto causado por la variación en los otros factores analizados. Estos resultados muestran que cuando se utiliza un martillo antiguo aumenta la variabilidad en los pesos de mezcla en las pilas, debido a que al gastarse el martillo este ya no puede compresionar la mezcla dentro del vaso de manera

efectiva. El efecto de este factor sobre el valor S/N es de solamente 0.66, colocándole en quinto lugar de importancia. Esto implica que a pesar de que existe una menor variación en el valor S/N utilizando martillos nuevos, el aumento en la variación del peso de mezcla debido al desgaste no es tan significativo como para cambiar martillos a intervalos menores. En este caso la decisión sobre el intervalo para el cambio de martillos se debe hacer sobre factores económicos, pues la variación resultante del desgaste no es significativa. Para la determinación de intervalos de cambio que no sean significativos en la variación del peso y que a la vez sean económicos será necesario realizar un diseño experimental en el que el factor a analizar sea el uso del martillo.

De acuerdo con los resultados experimentales y el valor S/N asociado con los factores analizados se determinó que el factor que tiene una menor influencia en la variación del peso de mezcla agregado a las pilas es la Altura de la mezcla en el tanque de reserva. La contribución de este factor al valor S/N fue de 0.31, lo que indica que a pesar de tener una relación positiva con la variación en el peso (a mayor altura, mayor valor S/N) esta relación no es significativa. En este caso la selección del nivel del factor se hace no en base al valor S/N sino tomando en cuenta factores de otra índole tales como costo o facilidad de uso. En el caso de las máquinas básicas usadas en el ensamble de pilas, la altura de la mezcla en el depósito de reserva es de 8 cm, por lo que no es necesario cambiarlo pues habría que hacer modificaciones a las máquinas, las cuales no tendrán un efecto significativo en la variación del peso de mezcla.

## X. CONCLUSIONES

1. De acuerdo con los resultados experimentales los niveles de los factores analizados que minimizan la variabilidad en el peso de mezcla agregado a las pilas secas son: 51 litros de agua por bolsa de mezcla, uso de martillos nuevos con menos de 100,000 golpes, tiempo de reposo de 18 horas por bolsa de mezcla y una altura de mezcla en tanque de reserva de 15 cm.
2. Para la determinación de los niveles de los factores analizados se utilizó el valor Señal / Ruido del tipo Nominal es mejor, con un valor de 9.2 gramos / pila. El valor actual S/N promedio basado en los resultados experimentales es de 17.78, lográndose un valor S/N óptimo de 23.45 al utilizar los factores en sus niveles óptimos.
3. De los factores analizados con un posible efecto sobre la variabilidad en el peso de mezcla agregado a las pilas secas los que tienen un mayor efecto son: la interacción entre el uso del martillo y el tiempo de reposo (contribución de 1.73 al valor S/N) y la cantidad de agua agregada por bolsa (contribución de 1.22 al valor S/N).
4. De los factores analizados los que tienen una menor influencia en la variabilidad del peso de mezcla en las pilas secas son la altura de la mezcla en el tanque de reserva (contribución de 0.306 al valor S/N) y el uso del martillo (contribución de 0.66 al valor S/N).

## **XI. RECOMENDACIONES**

Este trabajo ha mostrado que la metodología empleada por el Profesor Taguchi para el diseño estadístico de experimentos es eficiente, flexible, rápida y económica por lo que se recomienda su aplicación para el análisis del comportamiento y optimización de procesos productivos.

## XII. BIBLIOGRAFIA

- Duncan, A. Control de Calidad y Estadística Industrial, México, D.F. Editorial Alfaomega, 1989 1,084 pp.
- Fetter, R. The Quality Control system , New York: Richard Irwin Inc. 452 pp. 1967
- Hy, P. SPC for the rest of us: a personal path to Statistical Process Control, New York: 1996 Quality Press, 430 pp.
- Ishikawa, K, ¿Qué es el control total de calidad ? , Colombia: Editorial Norma, 209 pp. 1989
- Juran, J.M. y F.M. Gryna, Análisis y Planeación de la Calidad, México, D.F. 1995 Editorial Mc Graw Hill, 655 pp.
- Keats, J. "Statistical Process Control Scheme Design" , Journal of Quality Technology, 1995 July 1995, Vol. 27 No. 3 pp.214-225
- Lochner, R. y J. Matar, Designing for Quality, an introduction to the best of Taguchi and western methods of experimental design , New York, Editorial Quality Resources, 241 pp. 1995
- Loizelier, B. Control estadístico de la Calidad, Madrid: Editorial Nebrija S.A., 465 pp. 1954
- Montgomery, D. Control estadístico de la Calidad, México, D.F. Editorial Iberoamérica, 1991 615 pp.
- Montgomery, D. Diseño y análisis de experimentos, México, D.F. Editorial Iberoamérica, 1991 580 pp.
- Niebel, B. Ingeniería Industrial Métodos, Tiempos y Movimientos, México, D.F. 1990 Editorial Alfaomega, 814 pp.

Ross, P. Taguchi techniques for Quality Engineering, New York, Editorial Mc Graw Hill,  
1996 329 pp.

IMPRESA "GORA"  
25 Av. 25-71, Zona 5 - TELEFAX: 335-5733