

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
AGROINDUSTRIA**

**FACULTAD DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS**

**MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE SECADO DE VIRUTA  
PARA LA FABRICACIÓN DE TABLEROS AGLOMERADOS EN  
LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A. CON LA  
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DE GRADO DE MÁSTER (M.Sc.) EN**

**INGENIERÍA INDUSTRIAL Y PRODUCTIVIDAD**

**JOSÉ EFRÉN BARBOSA GALARZA**

**ebarbosa@cotopaxi.com.ec**

**ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS**

**WILSON EDMUNDO CHANCUSIG ESPÍN**

**wchancusig@cotopaxi.com.ec**

**DIRECTOR: ING. JAIME CADENA**

**jaime.cadena@epn.edu.ec**

**Quito, junio 2012**

© Escuela Politécnica Nacional (2012)  
Reservados todos los derechos de reproducción

## DECLARACIÓN

Nosotros, José Efrén Barbosa Galarza y Wilson Edmundo Chancúsig Espín, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Ing. José Efrén Barbosa Galarza

---

Ing. Wilson Edmundo Chancúsig Espín

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el siguiente trabajo fue desarrollado por José Efrén Barbosa Galarza y Wilson Edmundo Chancúsig Espín, bajo mi supervisión.

---

Ing. Jaime Cadena  
DIRECTOR DEL PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

A la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A por darnos la oportunidad de desarrollar el tema en su planta.

**Efrén, Wilson.**

## **DEDICATORIA**

A mi querido hijo Stéfano y a  
mi esposa y amiga Mónica.

**Wilson.**

## **DEDICATORIA**

A mí Querida Esposa Blanca.

A mis Hijos: Andrea, Pamela y Efrén.

A mi Camila, Angelito que siempre me guía.

**Efrén.**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
<b>RESUMEN</b>	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XVIII</b>
<b>1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
1.1 Método de administración de Deming	1
1.2 Metodología Six Sigma	3
1.2.1 Fases de la Metodología Six Sigma	5
1.2.1.1 Fase Definir	6
1.2.1.2 Fase Medir	6
1.2.1.3 Fase Analizar	7
1.2.1.4 Fase Mejorar	8
1.2.1.5 Fase Controlar	9
1.2.2 Herramientas y técnicas del Six Sigma	9
1.2.3 Análisis de capacidad de un proceso	10
1.2.3.1 Índice de Capacidad Potencial (Cp) o a corto plazo	11
1.2.3.2 Índice de Capacidad Real (Cpk) o a largo plazo	11
1.2.4 Medición de defectos por millón	13
1.2.5 Gráficas o diagramas de control	13
1.2.6 Histograma	14
1.2.7 Diagramas de Pareto	14
1.2.8 Diagrama de Ishikawa	15
1.2.9 Diagrama de flujo	16
1.2.10 Diagrama SIPOC	16
1.3 La voz del cliente	17
1.4 Control estadístico de procesos	19
1.4.1 Calidad	19
1.4.2 Variabilidad	19
1.4.3 Conceptos básicos de probabilidad	22
1.4.3.1 Distribuciones de probabilidad	22
1.4.3.2 Distribución Binomial	22
1.4.3.3 Distribución de Poisson	23
1.4.3.4 Distribución Normal	25
1.5 Ingeniería robusta	26
1.6 Método de Taguchi	27
1.6.1 Función de pérdida de Taguchi	28
1.6.2 Arreglo ortogonal	30
1.6.2.1 Ventajas	31
1.6.2.2 Desventajas	31
1.6.2.3 Arreglo ortogonal LA(B) <sup>C</sup>	31



1.6.2.4	Arreglos ortogonales serie 2	33
1.7	Diseño experimental	33
1.7.1	Proceso de diseño de experimentos	34
1.7.2	Experimentación factorial	35
1.7.3	Diseño 2 factorial	35
1.7.4	Isoplot	36
1.8	Descripción de la empresa	37
1.8.1	Antecedentes	37
1.8.2	Descripción y clasificación general	38
1.8.3	Descripción del proceso de elaboración del tablero de aglomerado	38
1.8.3.1	Recepción de Materia Prima	38
1.8.3.2	Descortezado y Viruteado	39
1.8.3.3	Secado de Viruta	39
1.8.3.4	Cribado	39
1.8.3.5	Encolado	40
1.8.3.6	Formado del Tablero	41
1.8.3.7	Prensado	41
1.8.3.8	Enfriamiento y Escuadrado	42
1.8.3.9	Lijado	42
1.8.3.10	Almacenamiento y Distribución	42
1.8.4	Estructura organizacional	43
1.8.5	Productos	43
1.8.6	Clientes	44
1.8.7	Proveedores	46
1.8.8	Objetivos de la investigación	47
1.8.8.1	Objetivo General	47
1.8.8.2	Objetivos Específicos	47
1.8.9	Hipótesis de trabajo	48
<b>2.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>49</b>
2.1	Análisis de la situación actual	49
2.2	Fase definir	49
2.3	Fase medir	51
2.4	Fase analizar	52
2.5	Fase mejorar	53
2.6	Fase controlar	55
2.7	Análisis cuantitativo de resultados	55

<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>56</b>
3.1 Análisis de la situación actual	56
3.2 Fase definir	62
3.2.1 Definir el foco de mejora	62
3.2.2 Identificar las características críticas	70
3.2.3 Definir parámetros de desempeño	73
3.2.4 Formalizar el proyecto de mejora	75
3.2.4.1 Objetivo General	75
3.2.4.2 Objetivos Específicos	76
3.3 Fase medir	80
3.4 Fase analizar	82
3.5 Fase mejorar	95
3.6 Fase controlar	108
3.7 Análisis cuantitativo de resultados	111
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>118</b>
4.1 Conclusiones	118
4.2 Recomendaciones	122
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>124</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>127</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b>	Arreglo ortogonal L4	32
<b>Tabla 1.2</b>	Arreglo para experimentos con factores a dos Niveles	32
<b>Tabla 1.3</b>	Arreglo ortogonal serie 2	33
<b>Tabla 2.1</b>	Niveles seleccionados de las variables del sistema de secado de material	54
<b>Tabla 3.1</b>	Árbol CTS	72
<b>Tabla 3.2</b>	Matriz CTY	73
<b>Tabla 3.3</b>	Matriz CTX	74
<b>Tabla 3.4</b>	Datos contrastación NDC MM710 – LAB-MEMMERT	80
<b>Tabla 3.5</b>	Factores y niveles seleccionados en modelo del sistema de secado de Material	99
<b>Tabla 3.6</b>	Datos de humedad media del proceso de secado para las distintas condiciones de operación del arreglo L9	100
<b>Tabla 3.7</b>	Resumen del experimento de Ingeniería Robusta con dos variables independientes y tres niveles	105
<b>Tabla A.1</b>	Metodología DMAMC y herramientas de apoyo	128
<b>Tabla A.2</b>	Arreglo ortogonal L <sub>4</sub> (2 <sup>3</sup> )	130
<b>Tabla A.3</b>	Arreglo ortogonal L <sub>12</sub> (2 <sup>11</sup> )	130
<b>Tabla A.4</b>	Arreglo ortogonal L <sub>16</sub> (2 <sup>15</sup> )	131
<b>Tabla A.5</b>	Arreglo ortogonal L <sub>17</sub> (2 <sup>13</sup> )	132
<b>Tabla A.6</b>	Tableros defectuosos semana 1 a 24, año 2009	133

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Ciclo de Shewhart	1
<b>Figura 1.2</b>	Fases de la Metodología DMAMC	5
<b>Figura 1.3</b>	Capacidad de un proceso	12
<b>Figura 1.4</b>	Gráfico de control típico	14
<b>Figura 1.5</b>	Control de la variabilidad de un proceso	21
<b>Figura 1.6</b>	Distribución binomial con $p=0,5$ y $n=4$	23
<b>Figura 1.7</b>	Distribución de Poisson con $u =0,3$	24
<b>Figura 1.8</b>	Ejemplos de distribuciones normales con diversas desviaciones	25
<b>Figura 1.9</b>	Función de pérdida de Taguchi	30
<b>Figura 1.10</b>	Disminución de la variabilidad mediante el DDE	34
<b>Figura 1.11</b>	Gráfico generado por Isoplot	37
<b>Figura 1.12</b>	Esquema del proceso de elaboración de los tableros de aglomerado	40
<b>Figura 1.13</b>	Organigrama de la Empresa Aglomerados Cotopaxi	44
<b>Figura 1.14</b>	Organigrama 1, 2 y 3 de la Empresa Aglomerados Cotopaxi	45
<b>Figura 3.1</b>	Proceso de Secado vista desde los silos de material húmedo, quemador hasta la salida del material a la cámara de secado	59
<b>Figura 3.2</b>	Proceso de Secado desde el elevador de cangilones hasta los silos de material seco	60
<b>Figura 3.3</b>	Diagrama SIPOC, nivel detallado del proceso de secado	61
<b>Figura 3.4</b>	Volumen de tableros desclasificados del proceso de aglomerado durante las semanas 1 a 24 de 2009	62
<b>Figura 3.5</b>	Diagrama de Pareto de principales defectos de tableros desclasificados durante las semanas 1 a 24 del 2009	63

<b>Figura 3.6</b>	Grafico I-MR de control del defecto tableros flojos de las semanas 1 a 24 de 2009	64
<b>Figura 3.7</b>	Grafico I-MR de control del defecto tableros soplados de las semanas 1 a 24 de 2009	64
<b>Figura 3.8</b>	Grafico I-MR de control del defecto tableros reventados de las semanas 1 a 24 de 2009	65
<b>Figuras 3.9</b>	Diagramas Causa – Efecto de tableros desclasificados por defectos: a) flojos, b) soplados y c) reventados	67
<b>Figura 3.10</b>	Calendario del proyecto	79
<b>Figura 3.11</b>	Gráfico Isoplot de sistema de medición NDCMM710 vs equipo de Laboratorio	81
<b>Figura 3.12</b>	Análisis de capacidad de proceso de la característica humedad del material a la salida del proceso de secado	83
<b>Figura 3.13</b>	Análisis de comportamiento del proceso	84
<b>Figura 3.14</b>	Variables humedad y porcentaje de material de Ingreso	85
<b>Figura 3.15</b>	Variables humedad y temperatura del secadero	86
<b>Figura 3.16</b>	Humedad de entrada y de salida del material	86
<b>Figura 3.17</b>	Grafico I-MR de control de la humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de madera de ingreso fresca (120% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 420°C, temperatura a la salida del secadero 108°C, porcentaje de paso de material 40%	87
<b>Figura 3.18</b>	Análisis de capacidad de proceso de la variable humedad del material a la salida del secadero con las condiciones de: madera de ingreso fresca (120% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 420°C, temperatura a la salida del secadero 108°C, porcentaje de paso de material 40%	88
<b>Figura 3.19</b>	Grafico I-MR de control de la humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de madera de ingreso seca (70% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 320°C, temperatura a la salida del secadero 98°C, porcentaje de paso de material 40%	89

<b>Figura 3.20</b>	Análisis de capacidad de proceso de la variable humedad del material a la salida del secadero con las condiciones de: madera de ingreso seca (70%de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 320°C, temperatura a la salida del secadero 98°C, porcentaje de paso de material 40%	90
<b>Figura 3.21</b>	Grafico I-MR de control de la humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de: madera de ingreso fresca (120% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 400°C, temperatura a la salida del secadero 110°C, porcentaje de paso de material 40%	91
<b>Figura 3.22</b>	Análisis de capacidad de proceso de la variable humedad del material a la salida del secadero con las condiciones de: madera de ingreso fresca (120% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 400°C, temperatura a la salida del secadero 110°C, porcentaje de paso de material 40%	92
<b>Figura 3.23</b>	Grafico I-MR de control de la humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de: madera de ingreso seca 70% de humedad, temperatura a la entrada al secadero de 361°C, temperatura a la salida del secadero 100°C, porcentaje de paso de material 40%	93
<b>Figura 3.24</b>	Análisis de capacidad de proceso de la variable humedad del material a la salida del secadero con las condiciones de: madera de ingreso seca (70% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 361°C, temperatura a la salida del secadero 100°C, porcentaje de paso de material 40%	94
<b>Figura 3.25</b>	Modelo del sistema de Secado de Material Experimento de Ingeniería Robusta arreglo L9, dos variables y tres niveles cada una	97
<b>Figura 3.26</b>	Curvas de distribución de los valores de humedad para las distintas condiciones de temperatura T1, T2 y T3 y cantidad de material M1, M2 y M3	99
<b>Figura 3.27</b>	Valores medios de la humedad del material a la salida en función de la temperatura a la salida del secadero	102
<b>Figura 3.28</b>	Valores medios de la humedad del material a la salida en función de la cantidad de material	102
<b>Figura 3.29</b>	Desviación estándar de la humedad del material a la salida en función de la cantidad de material	103

<b>Figura 3.30</b>	Análisis Multi Vari Coeficiente de Sensibilidad en función de las variables independientes	104
<b>Figura 3.31</b>	Curva de distribución de los valores de humedad para la condición de temperatura T3 y cantidad de material M3. 61	106
<b>Figura 3.32</b>	Muestras tomadas durante el día lunes 27 de julio de 2009	106
<b>Figura 3.33</b>	Curva de distribución de los valores de humedad para la condición de temperatura T3 y cantidad de material M3. 49 muestras tomadas durante el día martes 28 de julio de 2009	107
<b>Figura 3.34</b>	Análisis de capacidad de proceso de los valores de humedad para la condición de temperatura T3 y cantidad de material M3. 44 muestras tomadas durante el día lunes 27 de julio de 2009 y en lotes de dos unidades	107
<b>Figura 3.35</b>	Análisis de capacidad de proceso de los valores de humedad para la condición de temperatura T3 y cantidad de material M3. 50 muestras tomadas durante el día martes 28 de julio de 2009 y en lotes de dos unidades	108
<b>Figura 3.36</b>	Análisis de capacidad de proceso de los valores de humedad para la condición de temperatura T3 y cantidad de material M3. 50 muestras tomadas durante el experimento confirmatorio	109
<b>Figura 3.37</b>	Copia Plan de Calidad para proceso de Aglomerado en lo concerniente al proceso de secado	110
<b>Figura 3.38</b>	Copia del Registro RE-033A de fecha 2009/12/17 del proceso de secado	111
<b>Figura 3.39</b>	Grafico I-MR de control del defecto tableros flojos de las semanas 40 a 53 de 2009	114
<b>Figura 3.40</b>	Grafico I-MR de control del defecto tableros sopladados de las semanas 40 a 53 de 2009	115
<b>Figura 3.41</b>	Grafico I-MR de control del defecto tableros reventados de las semanas 40 a 53 de 2009	116
<b>Figura 3.42</b>	Grafico del indicador de la línea de aglomerado de 2009. Tableros Desclasificados	116

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO I</b>	
Metodología DMAMC y herramientas de apoyo	128
<b>ANEXO II</b>	
Ejemplos de arreglos ortogonales	130
<b>ANEXO III</b>	
Tableros defectuosos semana 1 a 24 año 2009	133
<b>ANEXO IV</b>	
Humedad del material a la salida del secadero 20 al 28 de mayo del 2009	(digital)
<b>ANEXO V</b>	
Datos de humedad del proceso de secado	(digital)



## RESUMEN

El presente trabajo de tesis tuvo por objetivo general: "Mejorar la capacidad del proceso de secado de viruta para la fabricación de tableros aglomerados en la Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. aplicando la metodología Six Sigma"; para lo cual se realizó un estudio del proceso de elaboración de tableros aglomerados en la parte concerniente al secado de viruta. Luego con la ayuda de la estadística descriptiva, se identificó las características críticas y las principales variables del proceso, se definieron los parámetros de desempeño, se determinó la estabilidad y capacidad del proceso e indicadores de desempeño. Se constató que debido a la elevada variabilidad del proceso de secado, los operadores optaban por sobre secar las virutas a un valor medio de 2,29% de contenido de humedad, cuando lo óptimo es 3%, con la consecuente disminución de la capacidad del proceso que se determinó tenía un valor de 0,51, el valor de la desviación estándar era de 0,326.

Posteriormente, a partir del análisis de los resultados, se determinaron las causas de la variabilidad del proceso. Se propuso el diseño de un experimento de Ingeniería Robusta tendiente a mejorar la capacidad del proceso de secado, se justificó modificaciones al proceso, se implementó mejoras y se analizaron los resultados. Del experimento confirmatorio se concluyó que el proceso de secado se vuelve mínimamente sensible para las condiciones de temperatura a la salida del tambor del secadero de 136 °C a 150 °C y cantidad de paso de material entre 64,1 y 96 kg/min. Bajo estas condiciones la desviación estándar tomó valores alrededor de 0,06 y la capacidad del proceso tomó valores cercanos a 2,8.

En la ejecución del presente trabajo, se evidenciaron todos los beneficios de la metodología Six Sigma, una pequeña inversión económica utilizada durante la presente investigación permitieron realizar un ahorro estimado en US\$ 57. 446,40 anuales al disminuir notoriamente los tableros desclasificados por tableros flojos, soplados y reventados. El indicador global de tableros desclasificados pasó de 2,32% obtenido durante el año 2008 a 1,64% obtenido a finales del 2009.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis es realizado en la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A, provincia de Cotopaxi, en la planta procesadora de tableros de partículas conocido en el mercado como “Tablero Aglomerado”. El objetivo general es mejorar la capacidad del proceso de secado de viruta, mediante la aplicación de la metodología Six Sigma. Para lograr este objetivo se ha planteado previamente la consecución de objetivos específicos, los cuales son:

i) Estudiar el proceso de elaboración de tableros aglomerados en la parte concerniente al secado de viruta.

ii) Identificar las características críticas del proceso.

iii) Definir los parámetros de desempeño.

Determinar la estabilidad y capacidad del proceso.

iv) Determinar indicadores.

A partir del análisis de los resultados, determinar las causas de variabilidad del proceso, determinar las causas especiales del mismo y recomendar acciones tendientes a mejorar el proceso de secado.

Proponer el diseño de un experimento de Ingeniería Robusta tendiente a mejorar la capacidad del proceso de secado.

v) Justificar las modificaciones al proceso.

vi) Implementar las mejoras y analizar los resultados.

Para ejecutar este trabajo se utilizó algunas herramientas estadísticas y en especial la metodología Six Sigma la cual permite llegar al objetivo general, a través de cada uno de los objetivos específicos planteados.

Se utilizó un software relacionado directamente a la metodología Six Sigma como es el Minitab que facilita la obtención rápida de valores estadísticos que ayudan a entender cómo está comportándose el proceso.

Con este trabajo se identificaron las causas potenciales de la variabilidad del proceso. Se realizó el diseño de un experimento de Ingeniería Robusta. Se determinó los factores de ruido y los factores de control. Con los resultados obtenidos se diseñó un experimento confirmatorio tendiente a comprobar la disminución de la variabilidad del proceso, lo que permite incrementar el valor medio de la humedad de las virutas de madera sin salirse del rango de las especificaciones, con la consecuente disminución de los costos de producción y consecuente mejora del proceso.

## ABSTRACT

This thesis mainly aims: "Improving the capacity of the drying process for the manufacture of agglomerated chip boards at Aglomerados Cotopaxi SA using Six Sigma methodology." To which begins a study of process of particle boards in the section concerning chip drying. Then, with the help of descriptive statistics, critical features of the process are identified, performance parameters are defined, Stability and Capacity of the process are determined, as well as performance indicators.

Subsequently, by analyzing results, variability causes and special causes of the process are determined and actions aimed at improving the drying process are recommended. Finally, the design of a Robust Engineering experiment is proposed aiming at improving the drying process capacity, changes to the process are justified, improvements are implemented and results are analyzed.

The use of statistical tools and in particular the use of Six Sigma methodology allow to identify the main variables of the process, to determine the causes of its variability, to manage the special causes of the process, to recommend actions aimed to reduce ranges of these variables, and to be able to optimize the process based on transporting the product specifications to ranges of higher performance, not affecting their quality and significantly reducing the amount of nonconforming product.

In the implementation of this project, potential causes of the process variability are identified. A design of a Robust Engineering experiment is made. The noise and control factors are determined. With the results, a confirmatory experiment is designed to reduce the process variability, to increase the value of moisture of wood chips without departing from the range of specifications, to reduce production costs and thus to contribute to improving the process.

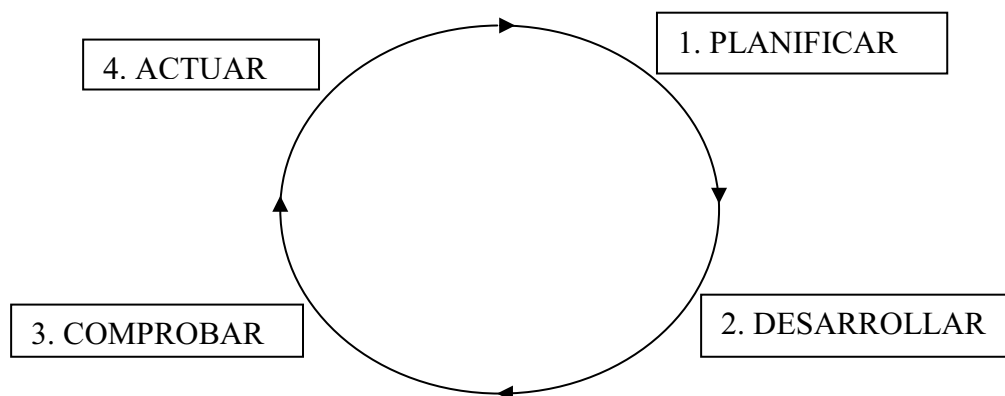
# 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se realiza una recopilación de los principales conceptos teóricos y herramientas de la metodología Six Sigma.

## 1.1 MÉTODO DE ADMINISTRACIÓN DE DEMING

Para implementar la calidad no se requiere mayores costes sino la aplicación de procesos más eficientes y fiables cuyos productos estén libres de defectos. (Brue, 2002). El método Deming a través del ciclo de Shewhart permite aumentar la efectividad de cualquier actividad u organización. Según De Feo (2004), este método utiliza cuatro áreas fundamentales: planificar, desarrollar, comprobar y actuar.

En la Figura 1.1 Ciclo de Shewhart, se muestran las cuatro etapas de un círculo de mejora continua.



**Figura 1.1** Ciclo de Shewhart.

(De Feo, 2004)

- Planificar significa establecer los objetivos y procesos necesarios para conseguir resultados de acuerdo con los requisitos del cliente y las políticas de la organización. En esta etapa se debe:

- Identificar productos.
  - Identificar clientes.
  - Identificar requerimientos del cliente.
  - Trasladar los requerimientos del cliente a especificaciones.
  - Identificar pasos claves del proceso, diagramas de flujo.
  - Identificar y seleccionar los parámetros de medición.
- Desarrollar, significa la ejecución e implementación de las mejoras del proceso. En esta etapa se debe:
    - Determinar la capacidad del proceso.
    - Controlar el proceso.
  - Comprobar, significa chequear el proceso, verificar, realizar el seguimiento y la medición de los productos respecto a las políticas, los objetivos y los requisitos para el producto, e informar sobre los resultados. En esta etapa se debe:
    - Evaluar la efectividad.
    - Identificar oportunidades de mejora.
  - Actuar, significa tomar las acciones correctivas, tomar acciones para mejorar continuamente el desempeño de los procesos. En esta etapa se debe:
    - Institucionalizar la mejora.
    - Identificar otro proceso para comparar.

La aplicación permanente de las cuatro etapas del proceso de mejora continua permite a la empresa:

- Mejorar la calidad.
- Reducir los costos.
- Mejorar la productividad.
- Reducir los precios.
- Aumentar la participación en el mercado.
- Garantizar la supervivencia de la empresa.

- Proveer nuevos puestos de trabajo y.
- Mejorar la rentabilidad de la empresa.

En las cuatro áreas descritas se usan herramientas de apoyo que ayudan a sustentar de manera apropiada un proceso, dentro de las cuales están: tormenta de ideas, gráfico de espina de pescado o Ishikawa, gráficos de Pareto, gráficos de corrida, gráficos de control, histogramas, listas de chequeo, matrices de decisión, etc.

## **1.2 METODOLOGÍA SIX SIGMA**

Según Pande (2004), estadísticamente Six Sigma tiene el propósito de reducir la variación con el fin de conseguir desviaciones estándar muy pequeñas para conseguir que la totalidad de productos o servicios cumplan o excedan las expectativas del cliente

Según Brue (2002), Six Sigma consiste en hablar de una proporción de errores de 3,4 partes por millón, pero en la práctica el término se usa para recalcar que es mucho más que un simple recuento de errores. Esto implica adoptar una cultura de calidad, en la cual, estrategias, procesos, técnicas estadísticas y factor humano conforman un todo que permite mejorar y hacer competitiva una empresa.

Dicho en pocas palabras, es un método basado en datos, para llevar la calidad hacia niveles próximos a la perfección, diferente de otros enfoques ya que también corrige los problemas antes que se presenten. Más específicamente, se trata de un esfuerzo disciplinado para examinar los procesos repetitivos de las empresas.

Six Sigma integra y define las fases donde se aplican los métodos tradicionales de la calidad: métodos de resolución de problemas, las herramientas de la calidad, despliegue de la función de calidad (*QFD*), control estadístico de

procesos, estudios de capacidad de procesos, métodos estadísticos, diseño de experimentos (DDE), equipos de mejora o círculos de calidad y la aplicación del ciclo de mejora continua. Six Sigma interrelaciona dichos métodos y los aplica ya no sólo a un área de la empresa como tradicionalmente podía ser producción, sino a toda ella en su conjunto, priorizando las actuaciones sobre aquellos procesos clave que aporten valor añadido al cliente. Six Sigma se basa en la teoría de las gráficas de control establecidas por W. Shewhart, en los años 30 y en los postulados de W. E. Deming, J. M. Juran y P. B. Crosby, entre otros.

El enfoque Six Sigma parte de la premisa de que las pérdidas de un producto son directamente proporcionales a la variabilidad de la característica de calidad del producto en cuestión. Por ello, en general, la mejora de la calidad pasa por reducir la variabilidad, o desviación estándar. La estrategia básica para la mejora de la calidad pasa por identificar las causas o factores que producen la variabilidad y luego eliminarlos, de modo que se tenga una variabilidad mínima. Las empresas que persiguen la mejora continua basada en esta metodología logran no sólo reducir el nivel de defectos, sino también:

- Reducir costos a través de la eliminación de errores internos.
- Reducir el tiempo de proceso.
- Incrementar su productividad.
- Mejorar el nivel de resultados de los procesos de soporte.
- Mejorar la calidad en el proceso de desarrollo y lanzamiento de nuevos productos.

Lograr un nivel de calidad alto y considerar la calidad como imperativo, ya formaban parte de los objetivos de los programas de Calidad Total. La novedad de la iniciativa Six Sigma radica, en primer lugar, en la capacitación interna de los empleados en todos los niveles de la organización en métodos estadísticos; y, en segundo lugar, en desarrollar una organización interna que sepa enfocar esos recursos humanos, en proyectos que tengan una clara oportunidad de mejora y además un impacto en la cuenta de resultados de la empresa, es decir, que logre resultados tangibles a través de una metodología rigurosa.

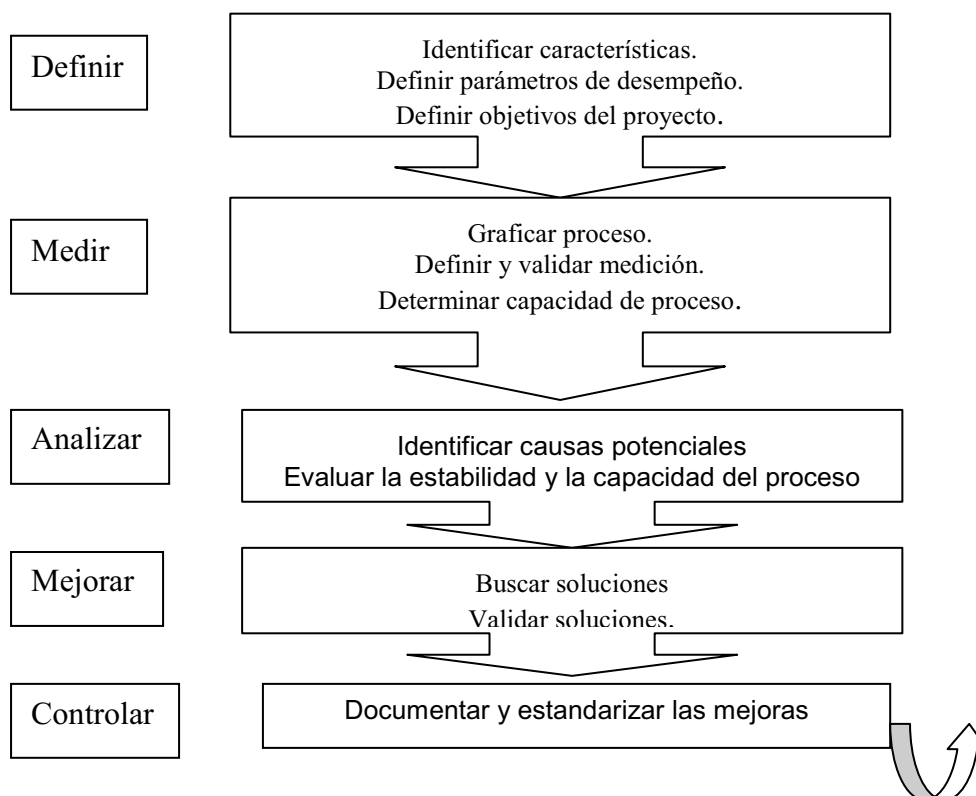


### 1.2.1 FASES DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA

Según Eckes (2003), la metodología Six Sigma, conocida como DMAMC, consiste en la aplicación, proyecto a proyecto, de un proceso estructurado en cinco fases.

- **D**efinir los problemas y situaciones a mejorar.
- **M**edir a fin de obtener datos e información.
- **A**nalizar la información recabada.
- **M**ejorar los procesos.
- **C**ontrolar los procesos mejorados para generar un ciclo de mejora continua.

Las fases del DMAMC se muestran en el gráfico de la Figura 1.2. Fases de la Metodología DMAMC



**Figura 1.2** Fases de la Metodología DMAMC.

### **1.2.1.1 Fase Definir**

Según Brue (2003), en la fase de definición se determinan los posibles proyectos Six Sigma, que deben ser evaluados en conjunto con la dirección para evitar la subutilización de recursos. Se debe empezar por identificar cuáles son los procesos críticos y actuar primeramente sobre ellos, con esto se ahorrará esfuerzos, tiempo y costos.

Una vez seleccionado el proyecto se prepara su misión y se selecciona el equipo más adecuado para el proyecto seleccionado, preferiblemente con personal multidisciplinario e interfuncional y asignándole la prioridad y recursos necesarios. Luego se debe definir las variables del proceso, sus entradas, salidas y características. Seleccionar apropiadamente las características críticas de la calidad (*CTQ, Critical To Quality*) que afectan al cliente. Establecer un método para cuantificar y medir de forma precisa las variables del proceso. En esta fase se define el nivel de aceptación, las variables seleccionadas y cuáles son sus niveles aceptables de desempeño.

En esta fase también se debe evaluar los sistemas de medición, evaluar la capacidad y estabilidad de los sistemas de medición mediante estudios de repetitividad, reproducibilidad, linealidad y exactitud.

### **1.2.1.2 Fase Medir**

Según Manivannan (2007), la etapa medir establece las técnicas para la recolección de datos de cómo se desempeña el proceso y cómo se cumplen las expectativas del cliente.

Según López (2006), la fase de medición consiste en la caracterización del proceso identificando los requisitos clave de los clientes, las características clave del producto (o variables del resultado) y los parámetros (variables de entrada)

que afectan al funcionamiento del proceso y a las características o variables claves.

A partir de esta caracterización se define el sistema de medida y se mide la capacidad del proceso. En esta fase se debe, mapear el proceso, definir y validar la medición, determinar la estabilidad y capacidad del proceso, confirmar el objetivo del proyecto de mejora.

En la fase de Medición se debe plantear cuestiones tales como:

- ¿Cuáles son los procesos con sus responsables y quién es el cliente?
- ¿Quiénes son las personas relacionados con el proceso?
- ¿Cuál es su grado de participación y trabajo en equipo?
- ¿Qué procesos tienen una necesidad de mejora más urgente y su prioridad?
- ¿En qué evidencias se sustenta dicha conclusión?
- ¿Se dispone de forma fiable y por escrito de las especificaciones del cliente?
- ¿En qué datos se basan para afirmarlo?
- ¿Se conocen las causas de variabilidad del proceso?
- ¿Se está en condiciones de tomar los primeros datos?

Esta fase concluye una vez que se identifica el foco de mejora, las características críticas, se define el objetivo de mejora y se formaliza el proyecto de mejora.

### **1.2.1.3 Fase Analizar**

En esta fase, el equipo analiza los datos de resultados actuales e históricos, recolectados en la etapa de medición con el fin de generar una lista de prioridades, aquí se enfoca los esfuerzos de mejora para lo cual se separa las pocas variables vitales de las muchas triviales.

Se determinan las variables significativas. Las variables del proceso definidas en la fase anterior deben ser confirmadas por medio del diseño de experimentos (DDE), diagrama espina de pescado, matriz causa-efecto, lista de variables de entrada Xs críticos, etc. (Benedix y Gabrieli, 2010).

Se debe evaluar la estabilidad y la capacidad del proceso. Con los datos obtenidos en la fase anterior se procede al cálculo de la capacidad del proceso para determinar de forma objetiva la situación en que se encuentra el proceso, conocer si se está produciendo dentro de especificaciones y a la vez evaluar la fracción defectuosa. Se debe llegar a concluir sobre cuáles son las causas y variables de entrada responsables de dicha situación.

En esta fase se pueden realizar las siguientes preguntas:

- ¿Qué variables de entrada del proceso afectan a la media o a la desviación estándar de las variables críticas de salida del proceso?
- ¿Cuáles son los datos que así lo confirman?
- ¿Existen interacciones entre las variables?

#### **1.2.1.4 Fase Mejorar**

Según Brue (2003), en esta fase se confirman las variables claves y se palpa los efectos de esas variables en los resultados críticos para las variables de calidad conocidas como Ys.

Si el proceso no es capaz, se debe optimizar para reducir su variación. Identificar los valores de las variables de entrada que optimizarán el proceso. Además se deben establecer los márgenes en los que pueden variar sin afectar la capacidad del proceso. Determinar cómo afectan las variables definidas en la fase anterior para la mejora de la capacidad del proceso. La eliminación de las causas que más influyen en la dispersión de la característica del proceso será una de las tareas fundamentales de esta fase, así como también validar la mejora y realizar nuevamente estudios de capacidad.

### **1.2.1.5 Fase Controlar**

Esta última fase, trata de un diseño y documentación de un sistema de control para que todo lo conseguido en las fases anteriores perdure luego que se hayan implantado los cambios, se debe estandarizar las mejoras para asegurar su consistencia, monitorear y mantener en control el proceso

La fase de control no es un simple cálculo de la mejora del proceso a corto plazo. En esta fase debe determinarse si el proyecto ha sido documentado correctamente para que permita comparar de forma objetiva la situación inicial con la actual. Debe definirse qué mejoras ha presentado el proyecto en la disminución de defectos, aumento de la capacidad de producción, ahorro en inversiones y reducción de pérdidas de material.

En esta fase se mantiene los cambios que se realizó en las Xs con el fin de mantener las mejoras de las Ys resultantes. (Brue, 2003)

Cuando se han logrado los objetivos y la misión se ha finalizado, el equipo informa a la dirección y se disuelve.

## **1.2.2 HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS DEL SIX SIGMA**

En los proyectos Six Sigma se recomienda utilizar herramientas estadísticas y técnicas de resolución de problemas, entre las que cabe citar los estudios de capacidad del proceso, análisis de Pareto, análisis de causa y efecto, diseño de experimentos, entre otras. El uso de software específico como el Minitab es de gran ayuda para el manejo de la información, el procesamiento de datos y los cálculos necesarios para su análisis; software que por su sencillez permite utilizarlo con facilidad, concentrando los esfuerzos de las personas en la interpretación de los resultados, no en la realización de los complejos cálculos que antes eran necesarios.

Las distintas herramientas estadísticas y técnicas de resolución de problemas y su aplicación en las diferentes etapas del proceso Six Sigma, se resumen en el anexo A.

### 1.2.3 ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE UN PROCESO

Según Reyes y Hernández (2007), “La capacidad de un proceso es la aptitud para producir productos dentro de los límites de las especificaciones de calidad”. La capacidad de un proceso mide la frecuencia con que los productos que se obtienen cumplen con las especificaciones, y por tanto si la variabilidad de la característica figura entre los límites de tolerancia establecidos.

El analizar la capacidad del proceso permite determinar la probabilidad de que los productos que se obtienen de un proceso sean aceptables, es decir, entre los límites de especificación o tolerancia. Para determinarlo, se sabe que con una distribución normal centrada, el 99,73% de las muestras se encuentra dentro del intervalo  $6\sigma$ , desde  $-3\sigma$ , hasta  $+3\sigma$ . Para conseguir que el 99,73% de los productos sean aceptables, basta con que el intervalo que define los límites de especificación (LSE – LIE) sea  $\geq 6\sigma$ , cuyos extremos definen los llamados límites de control o los límites de la especificación. (Gutiérrez, 2009)

En este caso debe cumplirse:

$$\frac{LSE - LIE}{6\sigma} \geq 1 \quad [1.1]$$

Sin embargo, se recomienda que el valor de esta relación sea mayor o igual que 1,33 para mayor seguridad y certidumbre sobre los resultados esperados.

Los datos usuales para el cálculo de los diferentes índices son: el Límite Superior Especificado (LSE) y Límite Inferior Especificado (LIE) así como el Valor Central Óptimo (VCO), que se establecen con el cliente. Se debe recalcar que los

cálculos de capacidad deben realizarse cuando el proceso está en estado de control, es decir, una vez eliminadas las causas especiales de variación.

Se debe establecer dos índices de capacidad diferentes:

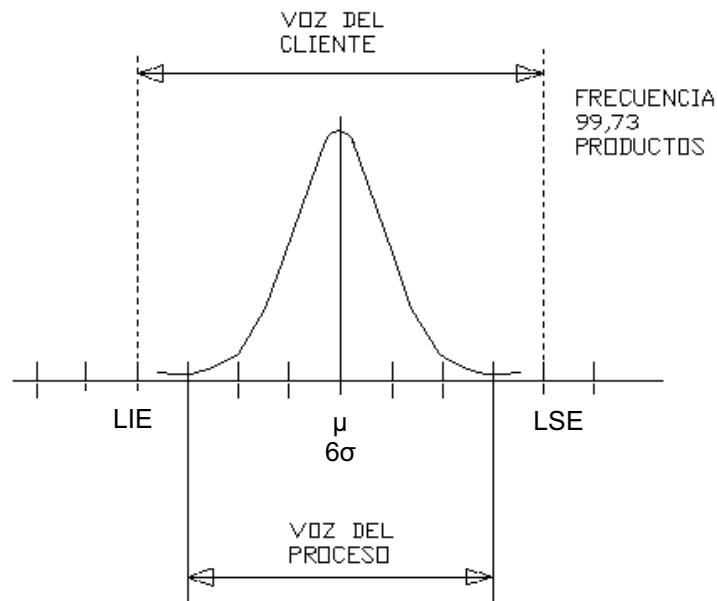
### **1.2.3.1 Índice de Capacidad Potencial (Cp) o a corto plazo**

Evalúa cuantas veces cabría el intervalo  $6\sigma$  dentro del intervalo de especificación (LSE – LIE). La expresión 1.1 corresponde al índice de capacidad Cp a corto plazo; se utiliza cuando el tiempo para observar uno o más defectos es corto y se caracteriza por no utilizar la media ( $\mu$ ) en su cálculo; por tanto, es necesario que la distribución esté centrada, es decir, que el valor central óptimo (VCO) que se desea, coincida con la media de la distribución.

Analizando la Ecuación 1.1, se puede notar que un índice de capacidad  $C_p = 2,0$  corresponde al estudio a corto plazo de un proceso de calidad Six Sigma centrado, ya que  $LSE - LIE = 12\sigma$ , es decir, dentro del rango de tolerancia caben  $\pm 6\sigma$ . Si se calcula el porcentaje de no conformidad, teniendo en cuenta los dos extremos de productos no conformes, se obtendría sólo 0,002 ppm, 0,001 ppm en cada extremo.

### **1.2.3.2 Índice de Capacidad Real Cpk o a largo plazo**

El índice de Capacidad Real del proceso,  $C_{pk}$ , es un cálculo estadístico que evalúa el desplazamiento de la media  $\mu$  con respecto a los límites de especificación. La Figura 1.3 muestra los límites de especificación y su relación con la capacidad del proceso.



**Figura 1.3** Capacidad de un proceso.

(QUALIPLUS, 2006)

$$C_p = \frac{\text{Tolerancia\_especificada}}{\text{Tolerancia\_natural}} = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad [1.2]$$

Se toma en cuenta el hecho de que en la vida real la media no coincide con el valor central óptimo. El  $C_{pk}$  representa la capacidad de un proceso para producir un resultado dentro de los límites predefinidos (LSE y LIE). Este índice juega un papel fundamental en las plantas de producción a la hora de demostrar que un proceso es confiable y está bajo control.

$$C_{pk} = \text{Minimo} \left( \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right) \quad [1.3]$$

$C_{pk}$  calcula que tan lejos está la media  $\mu$  del valor central del rango de especificación de la calidad del producto.

Se dice que un proceso es capaz a largo plazo cuando  $C_{pk} \geq 1$ , por debajo de dicho valor el número de piezas defectuosas que no verifican las tolerancias es lo suficientemente elevado para considerar que el proceso no es capaz de cumplir



los requerimientos. El nivel Six Sigma es más exigente, requiere que el proceso tenga un  $Cpk=1,5$ .

#### **1.2.4 MEDICIÓN DE DEFECTOS POR MILLÓN**

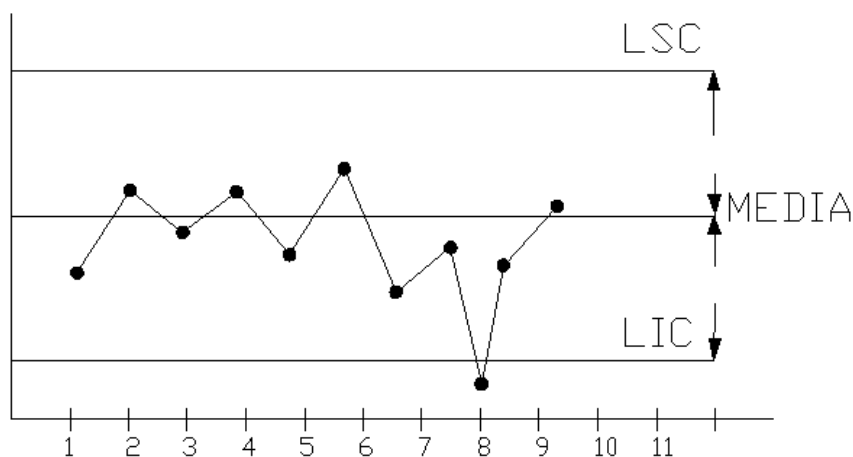
Defectos por millón de oportunidades, o DPMO, es un método para medir el rendimiento de un proceso. También sirve como base para el cálculo de los valores de un proceso sigma, a diferencia de defectos por unidad (DPU), que proporciona el número de productos defectuosos. DPMO tiene en cuenta la realidad de que los defectos que puedan existir sean múltiples en un solo producto. Es necesario indicar que la forma de cómo se miden los defectos no es relevante, sino más bien es importante llevar una estadística que permita reducir continuamente los defectos.

Para un desempeño Six sigma, la capacidad de un proceso es  $Cp=2$ , el índice de capacidad de un proceso es  $Cpk=1,5$  y los defectos  $dpm=3,4$ .

#### **1.2.5 GRÁFICAS O DIAGRAMAS DE CONTROL**

Las gráficas de control son una herramienta importante en el control estadístico de un proceso, indica el rango de variabilidad del proceso, más conocido como la variación de causa común, esto ayuda a determinar si un proceso se desarrolla de manera consistente o si una causa especial ha provocado el cambio en la media o la varianza. Las gráficas de control están delimitadas por los límites de control superior e inferior, ver Figura 1.4. Los datos que caen fuera de estos límites son variaciones debidas a causas especiales, las cuales pueden identificarse y eliminarse, no así las causas comunes que para eliminarse implican cambios fundamentales en el proceso. (Pande, 2004)

Se puede considerar que un proceso está bajo control si toda la variación es aleatoria y si cumple las tres reglas básicas que se mencionan a continuación:



**Figura 1.4** Gráfico de control típico.

(Cariño, 2002)

- No existe ningún punto fuera de los límites de control.
- No existe ninguna secuencia de 7 puntos ascendiendo ni descendiendo.
- No existen tendencias de 7 puntos por encima o por debajo de la media.

## 1.2.6 HISTOGRAMA

El histograma es un gráfico resumido que muestra un recuento de los puntos de datos comprendidos en varias franjas. Los grupos de datos son llamadas clases: Los datos que se obtiene de un histograma son: la forma general de la distribución de frecuencia, la simetría de la distribución, la modalidad de la distribución. (Pande, 2004).

## 1.2.7 DIAGRAMAS DE PARETO

Un diagrama de Pareto es un método que permite diferenciar gráficamente un problema con sus contribuciones relativas de cada componente, está compuesto por gráficos de barras y líneas donde, los valores individuales están

representados en orden descendente por las barras y el total acumulado es representado por las líneas. (Brue, 2003).

Un proceso permite discriminar las causas más significativas y menos significativas, aquí se aplica el concepto del 80-20, esto es que el 20% de las causas generan el 80% del problema. (Gutiérrez, 2009)

### **1.2.8 DIAGRAMA DE ISHIKAWA**

El diagrama de Ishikawa, también conocido como el diagrama de espina de pescado o el diagrama causa-efecto, es una herramienta utilizada para la identificación sistemática y la presentación de todas las posibles causas de un problema particular en formato gráfico. Las posibles causas se presentan en los distintos niveles de detalle en las sucursales conectadas, con el nivel de detalle cada vez mayor, a medida que la rama va hacia el exterior, una rama externa es una causa de la rama interna que está asociada, por lo que una rama externa suele indicar la causa del problema. (Gutiérrez, 2009)

Para una correcta construcción del Diagrama de Ishikawa se recomienda seguir un proceso ordenado con la mayor participación de personas involucradas en el proceso.

El Diagrama de Causa y Efecto es un gráfico con la siguiente información:

- El problema que se pretende diagnosticar.
- Las causas posibles que producen el problema en estudio.
- Un eje horizontal conocido como espina central o línea principal.
- El tema central que se estudia se ubica en uno de los extremos del eje horizontal, que se grafica con un rectángulo y va colocado en el extremo derecho de la espina central.
- Líneas o flechas inclinadas que llegan al eje principal, representan los grupos de causas primarias en que se clasifican las posibles causas del problema.

- A las flechas inclinadas o de causas primarias, llegan otras de menor tamaño que representan las causas que afectan a cada una de las causas primarias. Estas se conocen como causas secundarias.
- El Diagrama de Causa y Efecto debe llevar información complementaria que lo identifique. La información que se registra con mayor frecuencia es la siguiente: título, fecha de realización, área de la empresa, integrantes del equipo de estudio, etc.

### **1.2.9 DIAGRAMA DE FLUJO**

Es una representación simbólica de un proceso, cada paso en el proceso es representado por un símbolo diferente y contiene una breve descripción de la etapa del mismo. Los símbolos utilizados están unidos con flechas que indican la dirección del flujo del proceso. (De Feo, 2004)

Con el diagrama de flujo se puede obtener mejoras en el proceso u obtener un diseño alternativo, muestra operaciones, puntos de decisión, retrasos, controles o inspecciones.

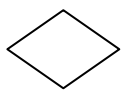
### **1.2.10 DIAGRAMA SIPOC**

El diagrama SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer) es una forma gráfica para identificar los elementos básicos de un proceso. Las actividades son definidas a nivel general o particular, pero en cualquiera de los casos, se deben determinar las entradas y salidas clave del proceso, también deben estar identificados los proveedores de las entradas, y, los clientes, sean estos internos o externos, a los cuales entrega el proceso sus salidas. (Gutiérrez, 2009)

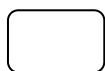
Los símbolos que se usan para generar los SIPOC son los siguientes: (Arthur, 2003)



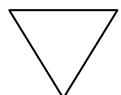
Caja de actividad: Contiene una frase o nombre que identifica una actividad del proceso.



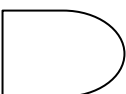
Caja de decisión: Contiene una pregunta cerrada, (respuesta "Sí" o "No")



Caja de Inspección/Verificación: Contiene una frase o nombre que identifica una actividad de inspección/verificación.



Caja de stock: Almacenamiento.



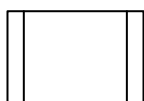
Caja de espera: Identifica tiempo de espera mientras otra actividad es concluida.



Caja de documento impreso: Identifica la emisión o uso de documento, informe o registro.



Caja de datos informatizados: Identifica, consulta/almacenamiento de información o archivos de computador.



Caja de Procesos: Se refiere a otro proceso o procedimiento realizado.



Conector: Indica conexión a otro punto del proceso.

Usar letras minúsculas para entradas, números romanos para salidas y números para conexiones internas del proceso.

### 1.3 LA VOZ DEL CLIENTE

La voz del cliente es una herramienta que sirve para percibir los deseos de los clientes, en sí la voz del cliente es el desarrollo de los pasos de calidad desde las necesidades de los clientes hasta los métodos que aseguren esa calidad. Es una herramienta que traduce los deseos de los clientes, promueve cambios preventivos y reduce el ciclo de desarrollo de los problemas. (Pande, 2004)

Existen tres tipos de clientes: el externo, el intermediario y el interno, la preocupación central debe ser el cliente externo, aquél que está al final de la línea y que, de hecho, va a usar los productos o servicios de la empresa.

El objetivo final es encantar al cliente externo, pero al mismo tiempo, es necesario tener en cuenta que debe ser capaz de hacerlo si también se complace a los otros eslabones de esta cadena. Se debe por lo tanto, buscar la opinión no solamente del cliente externo, sino también las de los clientes intermediarios e internos.

La opinión de los integrantes de cualquiera de estos tres grupos, dará tres datos básicos: su evaluación de nuestro desempeño, qué estamos haciendo mal, y qué falta hacer o cómo podemos mejorar. De los tres, el último dato será la clave no sólo para satisfacer al cliente, sino para deleitarlo.

Escuchar la opinión de los clientes significa dos cosas: la primera, es escucharlo en el sentido literal de la palabra; la segunda, más importante, es actuar después de escucharlo. Se debe tener en cuenta que el cliente es la razón de ser de la empresa y es quien paga todos los costos de la empresa, por tanto la empresa debe estar enfocada al cliente, siendo necesario que las opiniones de los clientes orienten las decisiones de la empresa.

### **Estrategias para tratar al cliente**

Existen diversos niveles para escuchar la voz del cliente para considerarlo como medio de información: (Pande, 2004)

- **Evaluación cuantitativa**, son los enfoques cuantitativos con los cuales se pide al cliente que valore el servicio, puede ser con una calificación de bueno o malo.
- **Información de retorno**, son los enfoques cualitativos que recogen información del cliente en forma de comentarios, sugerencias, quejas, etc.
- **Investigación cualitativa**, son los enfoques cualitativos que utilizan técnicas de información más sofisticadas como encuestas detalladas, entrevistas de profundidad, etc.

- **Información de las operaciones**, son los enfoques que utilizan los conocimientos existentes en la empresa por el personal en contacto con el cliente en los momentos verdaderos de la prestación de servicios.
- **Participación activa del cliente**, son los enfoques con los que se involucra al cliente en cuestiones estratégicas en el desarrollo de productos y servicios, la definición de los mercados, etc.

## **1.4 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS**

### **1.4.1 CALIDAD**

La palabra calidad incorpora dos definiciones: la primera, es que la presencia de las características adecuadas de un producto o servicio crea la satisfacción del cliente, la segunda, es que debe eliminarse las deficiencias en estas características, debido a que la presencia de deficiencias en los productos o servicios crean insatisfacción. Eliminar las deficiencias es el propósito de la mejora de la calidad. (De Feo, 2004)

La satisfacción del cliente se da cuando las características del producto o servicio se ajustan a sus necesidades y expectativas. La alta calidad del producto debe ir a la par de un bajo costo, esto implica bajos desperdicios y máxima consistencia. Un producto de alta calidad es aquel que satisface las necesidades del cliente al más bajo costo, es decir mínimos desperdicios y máxima consistencia.

### **1.4.2 VARIABILIDAD**

La variabilidad es el término aplicado a algunas diferencias que ocurren en los productos, servicios y procesos, esta diferencia debe ser cuantificable entre una medida específica y la desviación de dicha medida a la salida del proceso. (Gutiérrez, 2009)

La variabilidad se puede dar debido a diversos factores en el funcionamiento y gestión del proceso.

En todo suceso se tiene una variación, la misma que tiene su causa, individualmente es imposible prever un resultado final, sin embargo si se analiza un grupo de resultados que tienen su origen en el mismo conjunto de causas, pueden ser previsibles bajo un cierto patrón; si este conjunto de causas es perturbado por alguna causa externa, ese patrón es alterado.

Es importante entender la naturaleza de la variabilidad si se quiere tomar las mejores decisiones, para esto la estadística permite tratarla de forma científica y la forma de preverla. La variabilidad puede llamarse controlada cuando tiene un patrón estable y consistente en el tiempo y se asocia a causas comunes, no controlada cuando no presenta un patrón fijo ni consistente en el tiempo y se le asocia más con causas especiales.

Las causas que pueden originar la variabilidad se subdividen en comunes y especiales:

- **Causas comunes**, son las que siempre están en los procesos, las cuales determinarán su variabilidad característica, es imposible aislar el efecto de todas ellas y si se logra aislar una de ellas es porque se ha aplicado experimentos especialmente planeados.

Cuando un proceso tiene causas comunes, éste se vuelve previsible y los datos tienden a formar una distribución bien formada la cual varía dentro de una franja definida. Esto quiere decir que el proceso se encuentra bajo control.

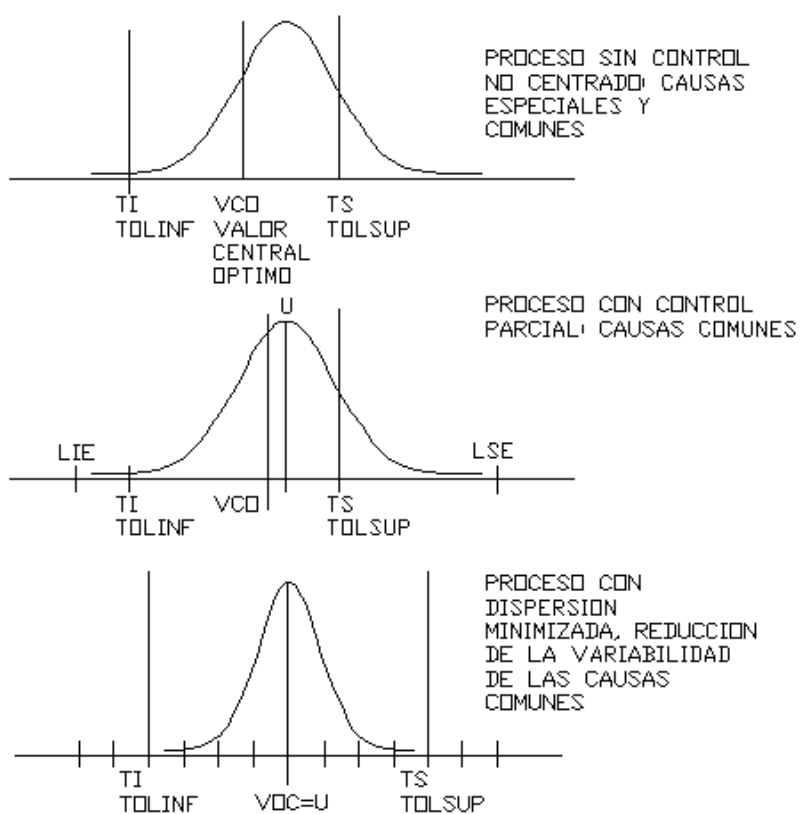
- **Causas especiales**, son las que no siempre están en el proceso, aparecen ocasionalmente y afectan sólo a algunos resultados, pueden ser aisladas y eliminadas. Las causas especiales cambian la distribución natural del proceso, haciéndolo imprevisible y quedando fuera de control. Deben ser



atacadas rápidamente y por lo general la solución no es compleja y puede ser controlada por el personal a cargo del proceso.

El tratamiento para este tipo de causas es más complejo, pues requiere hacer un análisis de todo el conjunto de datos, total conocimiento del proceso, cambios estructurales en los procedimientos, personal, equipos, ambiente, etc.

El personal necesita capacitación para enfrentar estas causas ya que con métodos sencillos no es suficiente. Los métodos a aplicar deben conducir a modificar los conceptos o modificaciones del proceso, o ajustar sus variables intrínsecas. En la Figura 1.5 se muestra curvas características de distintos procesos y sus causas.



**Figura 1.5** Control de la variabilidad de un proceso.

(QUALIPLUS, 2006)

### 1.4.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE PROBABILIDAD

#### 1.4.3.1 Distribuciones de probabilidad

La distribución probabilística muestra los posibles resultados de un experimento y la probabilidad de cada resultado, enumera todos los resultados de un experimento junto con la probabilidad asociada a cada uno.

Las distribuciones que más se utilizan en el control estadístico de la calidad son: la distribución binomial, de Poisson y la normal.

#### 1.4.3.2 Distribución Binomial

La distribución binomial es un caso de probabilidad discreta, pues sólo da como resultado dos posibles valores mutuamente excluyentes. Se describe mediante la siguiente fórmula. (Mason, 2003)

$$P(x) = \left( \frac{n!}{x!(n-x)!} \right) p^x (1-p)^{n-x} \quad \text{para } X= 0,1,2,\dots, n \quad [1.4]$$

Donde,

N, número de ensayos

X, número de éxitos

p, probabilidad de éxito en cada ensayo.

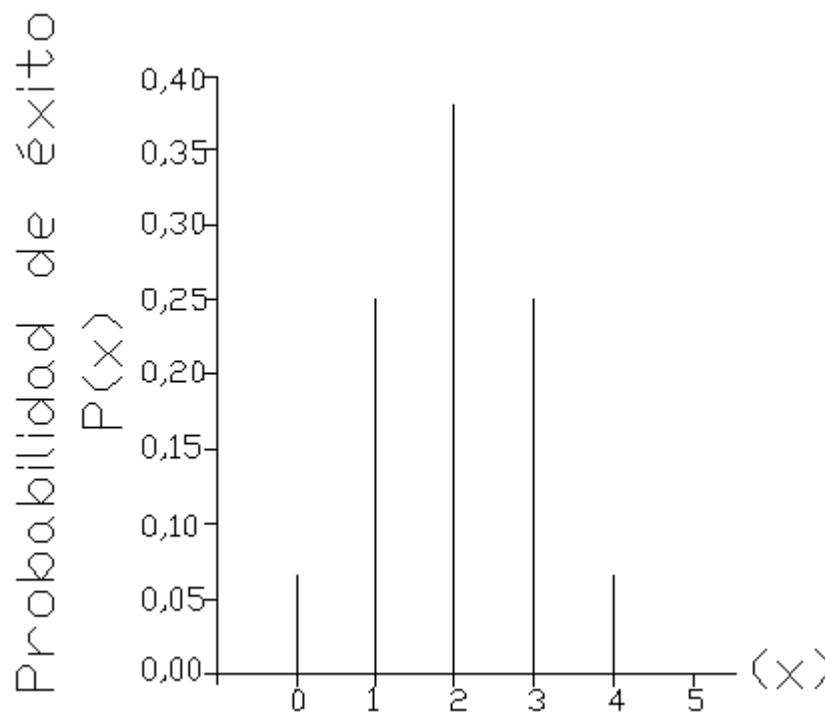
Para establecer una distribución binomial se debe saber: el número de ensayos, la probabilidad de éxito en cada ensayo. Este tipo de distribución es muy apropiada para muestreos de poblaciones muy grandes.

La media, varianza y desviación estándar de la distribución binomial son:

- Media,  $\mu = np$

- Varianza,  $\sigma^2 = npq$
- Desviación estándar,  $\sigma = \sqrt{npq}$

En la Figura 1.6 se puede ver un gráfico de distribución binomial.



**Figura 1.6** Distribución binomial con  $p=0,5$  y  $n=4$ .

(Mason, 2003)

### 1.4.3.3 Distribución de Poisson

Esta distribución conocida también como la ley de eventos improbables, es utilizada para los casos en los cuales se tenga la probabilidad de éxito muy pequeña y las oportunidades de ocurrencia  $n$  muy grande. Poisson es una distribución de tipo discreto porque se forma mediante un conteo de algo. (Mason, 2003)

Se describe mediante la siguiente fórmula:

$$P(x) = \frac{\lambda^x \cdot e^{-\lambda}}{x!} \quad [1.5]$$

Donde,

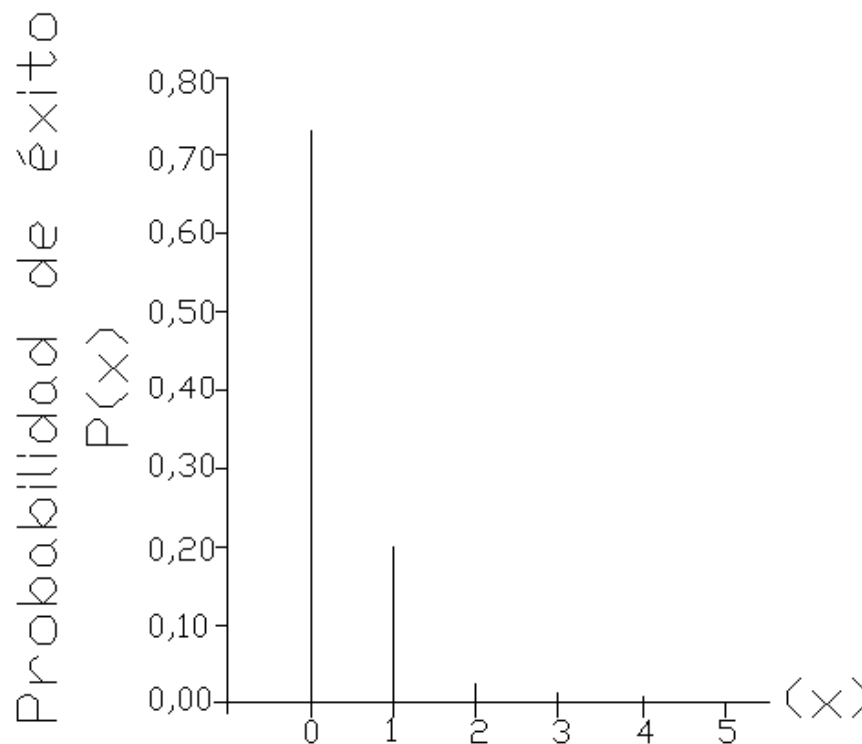
Media,  $\lambda$

Varianza,  $\sigma^2 = \lambda$

Desviación estándar:  $\sigma = \sqrt{\lambda}$

El número medio de éxitos,  $\mu$  puede determinarse en este caso por medio de  $np$ , donde,  $n$  es el número total de ensayos y  $p$  la probabilidad de éxito.

En la Figura 1.7 se puede ver un gráfico de distribución de Poisson cuando  $\mu = 0,3$



**Figura 1.7** Distribución de Poisson con  $\mu = 0,3$ .

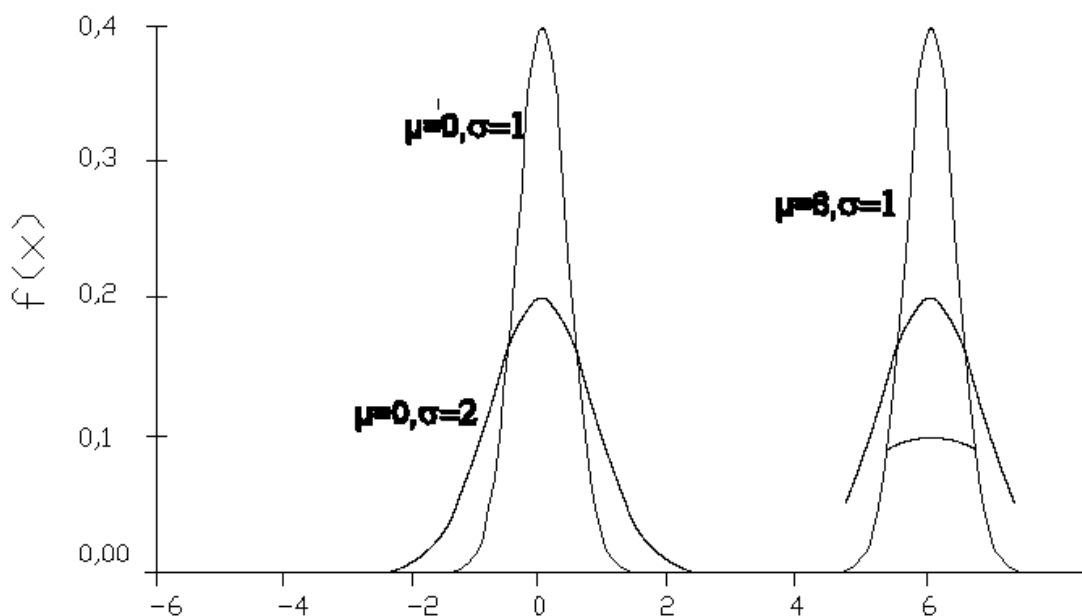
(Mason, 2003)

#### 1.4.3.4 Distribución Normal

Es la distribución continua más importante, tanto en la estadística teórica como en la aplicada. Su campo de aplicación se da en muchos fenómenos naturales y procesos artificiales, ya que siguen un patrón "normal". Si  $X$  es una variable aleatoria normal, su función de densidad de probabilidad está dada por:

$$Y = f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad [1.6]$$

Donde:  $\mu$  es la media, y  $\sigma$  es la desviación estándar; al graficar  $f(x)$  se obtiene una gráfica simétrica y unimodal con forma similar a una campana, el centro del gráfico coincide con  $\mu$ , y la amplitud está dada por  $\sigma$ . (Mason, 2003) En la Figura 1.8 se muestra un gráfico de ejemplos de distribuciones normales.



**Figura 1.8** Ejemplos de distribuciones normales con diversas desviaciones.

(López, 2007)

Para determinar la probabilidad entre un intervalo [a, b] se usa la expresión:

$$P(a < x < b) = \int_a^b f(x)d(x) \quad [1.7]$$

Cualquier distribución normal puede convertirse en una distribución normal estándar, restando la media a cada observación y dividiendo luego entre la desviación estándar; se estandariza la distribución a una distribución normal estándar, utilizando el valor Z, el cual se calcula con la siguiente fórmula.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad [1.8]$$

Dónde:

Z= Distancia a partir de la media, medida en unidades de la desviación estándar

## 1.5 INGENIERÍA ROBUSTA

La ingeniería robusta desde el punto de vista estadístico, es la capacidad de un producto o proceso para realizar una función asignada, de manera efectiva considerando ciertos parámetros operativos y ambientales. Operacionalmente consiste en diseñar un producto que sea robusto a los ruidos ambientales y humanos. Estos métodos se usaban para el mejoramiento de la calidad, en la actualidad se utiliza para mejorar la confiabilidad del producto.

El diseño robusto, usa diseño de experimentos en la etapa de diseño y en la etapa de manufactura para determinar los parámetros de diseño que maximicen la calidad. La idea de robustez la desarrolló el Dr. Genichi Taguchi de Japón, a través de sus conceptos o métodos. Los métodos Taguchi se basan en diseños estadísticos, los cuales por medio de combinaciones óptimas de desempeño de los respectivos parámetros de control reducen la variabilidad y mejora los diseños

de productos, lo que da como resultado un alto desempeño y bajo costo. (Villa y Escobar, 2003)

## 1.6 MÉTODO DE TAGUCHI

El método Taguchi, además de enseñar cómo mejorar en forma rápida el diseño de los productos y de los procesos, proporciona un enfoque y un lenguaje comunes que propician la integración del diseño del producto y de los procesos de manufactura. Taguchi recomienda el uso de arreglos ortogonales para hacer matrices que contengan los factores de control y los factores de ruido en el diseño de experimentos. Ha simplificado el uso de este tipo de diseño al incorporar arreglos ortogonales y gráficas lineales. Finalmente, en contraste con los enfoques tradicionales, ve las interacciones como equivalentes del ruido siempre que estas interacciones sean relativamente suaves, el análisis de los efectos principales proporcionará las condiciones óptimas y una buena reproducibilidad en un experimento. (Montgomery, 2003)

El método Taguchi es una metodología científica que permite elegir los ensayos experimentales con el propósito de establecer relaciones Causa – Efecto. El método de Taguchi es un proceso de experimentación en ingeniería, su mayor contribución no radica en la formulación matemática del diseño, sino en la filosofía que lo sustenta, la cual contiene determinados conceptos que dan lugar a una profunda y poderosa disciplina de mejora en la calidad.

La metodología de Taguchi se basa en los siguientes puntos:

- La calidad debe diseñarse en el producto antes que inspeccionarse en él.
- Se logrará mejor calidad al minimizar el desvío de un determinado estándar, o lo que es lo mismo, reducir la variación natural del proceso de ejecución.
- El costo de calidad, debe medirse como una función del desvío estándar y las pérdidas deben determinarse en todo el sistema relacionado.

Taguchi se basó en las observaciones de Deming, que sostienen que el 85% de la no calidad es atribuible a los procesos de la organización y sólo el 15% a los empleados o trabajadores involucrados en dichos procesos. Por lo tanto, y sobre la base de los tres conceptos expuestos, Taguchi desarrolló "robustos" sistemas de producción, que resultan ser inmunes a las circunstancias cambiantes del entorno y demás factores que pudieran afectarlos.

### 1.6.1 FUNCIÓN DE PÉRDIDA DE TAGUCHI

Taguchi desarrolló un modelo matemático en el cual la pérdida, es una función cuadrática que permite cuantificar los costos de la no calidad, por el incumplimiento de las especificaciones, por la diferencia entre el valor real y el nominal y por la desviación estándar entre las unidades fabricadas. Esta función llamada "función de pérdida", establece la pérdida que la sociedad sufre como consecuencia de la mala calidad. Un producto de calidad, es aquél que cumple con las expectativas de rendimiento cada vez que lo utiliza, sin fallas y en cualquier condición o circunstancia. Los productos que no cumplen con dichas expectativas, causan pérdidas, tanto para los clientes y los productores, como para, eventualmente, el resto de la sociedad. (Peace, 1993)

Taguchi se apartó de la sabiduría convencional, que suponía que calidad equivalía a producir dentro de los márgenes de tolerancia, y postuló que el costo de la mala calidad se incrementa con el alejamiento del valor del diseño, produciendo una pérdida para el cuerpo social. La función de pérdida vale cero cuando el desvío con respecto al parámetro objetivo es nulo y se incrementa cuadráticamente cuando los valores de los productos fabricados se acercan a los límites de tolerancia. En otras palabras, los productos cercanos a los límites de tolerancia son productos casi defectuosos y los gerentes deben trabajar para reducir la variabilidad de sus procesos de producción. La función de pérdida se define como:

$$F(y) = k(y-T)^2 \quad [1.9]$$



Donde:

- $F(y)$ , indica la pérdida (en unidades monetarias) que sufre la sociedad;
- $K$ , es una constante específica de cada caso considerado;
- $T$ , es un valor objetivo que la dimensión de interés debe tener.  $T$  mide la calidad nominal o de diseño.
- $Y$ , es el apartamiento que la dimensión de interés presenta con respecto al valor objetivo,  $T$ .

En la Ecuación 1.10 se puede observar que el valor de  $k$  se puede calcular solamente si se dispone de las pérdidas ocasionadas por  $y$ , por lo que es importante conocer los costos de la no calidad de los productos o servicios.

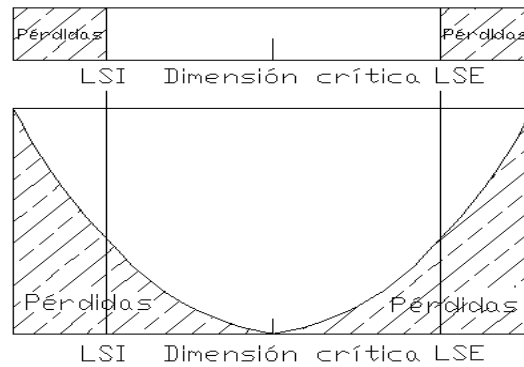
$$k = \frac{F(y)}{(y-T)^2} \quad [1.10]$$

Para un conjunto de unidades, la fórmula de la función de pérdidas es:

$$F(y) = k[\sigma^2 + (\mu - T)^2] \quad [1.11]$$

De la fórmula 1.11 se deduce que mientras mayor sea la diferencia entre la media  $\mu$  y su valor nominal  $T$ , mayores serán los costos. La función de pérdida es cero cuando  $\mu=T$  ya que  $\sigma=0$ .

En la Figura 1.9 se observan las pérdidas generadas por la desviación de su valor real con respecto al objetivo y crece exponencialmente mientras se aleje del mismo.



**Figura 1.9** Función de pérdida de Taguchi.  
(QUALIPLUS, 2006)

## 1.6.2 ARREGLO ORTOGONAL

Ortogonalidad, significa que los factores pueden ser evaluados independientemente, es decir, el efecto de un factor no influye en la estimación del efecto de otro factor. Los resultados obtenidos para los arreglos ortogonales, son analizados para obtener los siguientes objetivos:

- Estimar la contribución de los factores individuales que influyen en la calidad en la etapa del diseño del producto.
- Obtener la mejor condición para un proceso o un producto, así que las características de una buena calidad puedan ser garantizadas.

El arreglo ortogonal es una herramienta de ingeniería que simplifica y en algunos casos elimina gran parte de los esfuerzos de diseño estadístico, con la ortogonalidad se examina simultáneamente muchos factores a bajo costo. El uso de arreglos ortogonales para hacer matrices debe contener los controles y los factores de ruido en el diseño de experimentos. El diseño estadístico se ha simplificado al incorporar los arreglos ortogonales y las gráficas lineales.

Los arreglos ortogonales son herramientas que permiten evaluar qué tan robustos son los diseños del proceso y del producto con respecto a los factores de ruido.

Los arreglos ortogonales son un conjunto especial de cuadros construidos por Taguchi para planear los experimentos del diseño del producto. El análisis del arreglo ortogonal de Taguchi es usado para producir los mejores parámetros para el diseño óptimo del proceso, con el mínimo número de experimentos o pruebas ortogonales.

#### **1.6.2.1 Ventajas**

Se puede aplicar los arreglos ortogonales al diseño experimental involucrando un gran número de factores.

#### **1.6.2.2 Desventajas**

La desventaja del arreglo ortogonal, es que puede ser únicamente aplicado en la etapa inicial del diseño del sistema del producto o proceso. Un arreglo ortogonal permite asegurar que el efecto de "B" en "A1" es el mismo efecto de "B" en "A2". Así se podrá estar seguro de que se está haciendo comparaciones entre efectos de niveles de un mismo factor.

#### **1.6.2.3 Arreglo ortogonal $LA(B)^C$**

Un arreglo ortogonal es una tabla donde se presentan las combinaciones de todos los factores con sus respectivos niveles. La normalización que se utiliza para nombrar los arreglos ortogonales es  $LA(B)^C$ , en donde:

L, Indica que es un arreglo ortogonal

A, Número de corridas experimentales

B, Número de niveles para cada factor

C, Número de columnas o factores de un arreglo ortogonal.

En la Tabla 1.1 se muestra un arreglo ortogonal L4.

**Tabla 1.1** Arreglo ortogonal L4

No.	A	B	C	Resultado
1	1	1	1	Y1
2	1	2	2	Y2
3	2	1	1	Y3
4	2	2	1	Y4

1, 2 = Niveles de los factores  
(Reyes, 2006)

En general, para un arreglo a dos niveles, el número de columnas (efectos o factores) que se pueden analizar, es igual al número de filas de la tabla menos 1.

De acuerdo con la notación empleada por Taguchi, al arreglo mostrado como  $LA(B)^C$  ha desarrollado una serie de arreglos para experimentos con factores a dos niveles, los más utilizados y difundidos según el número de factores a analizar se puede ver en la Tabla 1.2. Lo importante es determinar las variables independientes que afectan el resultado del proceso y determinar los niveles lógicos que pueden tomar dichas variables, establecer todas las combinaciones posibles con el número mínimo de corridas. (Reyes, 2006)

**Tabla 1.2** Arreglos para experimentos con factores a dos niveles

Nº DE FACTORES A ANALIZAR	ARREGLO A UTILIZAR	Nº DE CONDICIONES A PROBAR
Entre 1 y 3	L4	4
Entre 4 y 7	L8	8
Entre 8 y 11	L12	12
Entre 12 y 15	L16	16
Entre 16 y 31	L32	32
Entre 32 y 63	L64	64

(Reyes, 2006)

#### 1.6.2.4 Arreglos ortogonales serie 2

El arreglo ortogonal más básico de la serie (2) es el  $L_4(2)^3$ , que según definiciones anteriores  $(LA(B)^C)$ , indica que se manejan 3 factores, con dos niveles cada uno con cuatro corridas experimentales. La Tabla 1.3 muestra un arreglo ortogonal serie 2.

**Tabla 1.3** Arreglo ortogonal serie 2

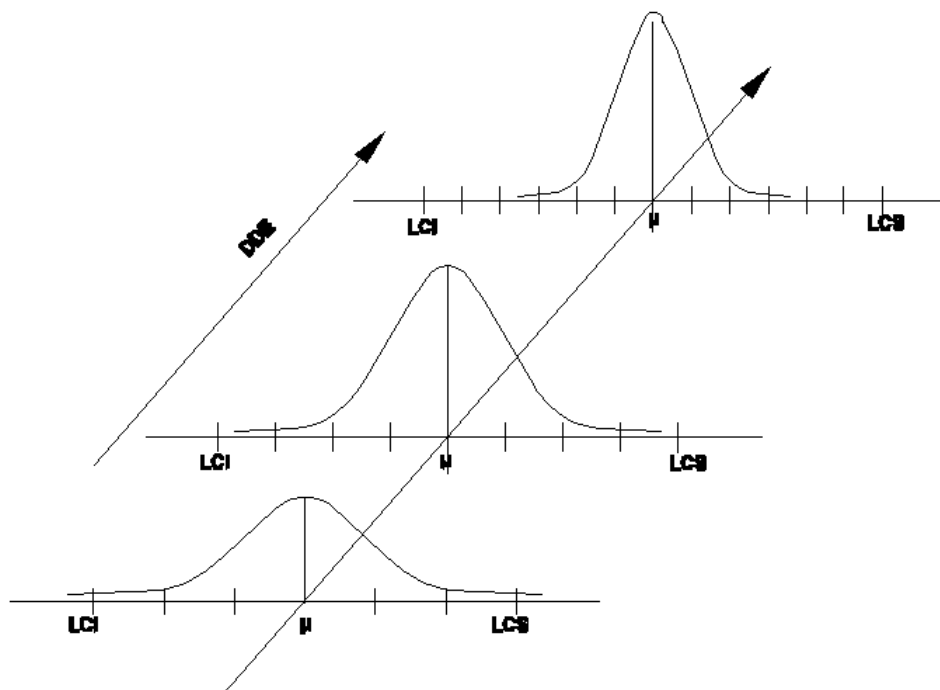
No.	1	2	3
1	1	2	2
2	2	1	2
3	2	2	1

(Reyes, 2006)

## 1.7 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental, es una metodología estadística que se encarga de la comprensión de las relaciones, a veces complejas, entre los factores o variables que afectan los procesos y el de obtener la combinación más efectiva y eficiente entre ellos para obtener el mejor resultado posible, con el mínimo coste, garantizando la máxima fiabilidad en las conclusiones que se obtengan. (Ferré y Ruiz, 2002)

El diseño experimental consiste en una prueba o una serie de pruebas, en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, para observar y analizar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida, buscando siempre el reducir la dispersión y consecuentemente los costos de la no calidad. En la Figura 1.10 se puede ver cómo se reduce la variabilidad mediante el uso del DDE. (De Feo, 2004)



**Figura 1.10** Disminución de la variabilidad mediante el DDE.

(QUALIPLUS, 2006)

Entre los objetivos que busca el diseño experimental se pueden señalar:

- Determinar cuáles variables  $X$  tienen mayor influencia en las salidas  $Y$ .
- Determinar la ubicación de las  $X$  para centrar a un  $Y$  en el objetivo.
- Determinar dónde poner las  $X$  para minimizar la variabilidad de  $Y$ .
- Determinar dónde situar las  $X$  para minimizar los efectos de las variables de ruido o variables sin control.

El diseño de Experimentos permite reducir los costos de la no calidad, aumentar la productividad, detectar interacciones entre parámetros, elegir los ensayos sobre bases científicas para detectar los efectos de los parámetros y cuantificarlos.

### 1.7.1 PROCESO DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para realizar correctamente el diseño de un experimento, es necesario seguir los siguientes pasos: (UDLAP, 2009)

- Definir claramente el resultado o salida que se quiere obtener
- Identificar un número manejable de factores, los cuales son causas potenciales a explorar.
- Identificar dos niveles para cada factor
- Escoger el diseño experimental.
- Realizar el experimento.
- Analizar los resultados.
- Plantear conclusiones y recomendaciones.

### **1.7.2 EXPERIMENTACIÓN FACTORIAL**

La experimentación factorial se utiliza cuando existen algunos factores de interés en un experimento. La característica de un experimento factorial, es que en cada réplica del experimento se analiza todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores. Por ejemplo, si hay dos factores *A* y *B* con “*a*” niveles del factor *A* y “*b*” niveles del factor *B*. Cada réplica contiene toda combinación *axb* posible. Al experimento resultante, se conoce como experimento factorial completo. (Jiménez, 2006)

El número de factores a analizar debe ser optimizado lo máximo posible, porque de otra manera, el costo puede ser exagerado. Dentro de los diseños factoriales los experimentos de dos niveles o  $2^k$  factoriales son muy utilizados.

### **1.7.3 DISEÑO 2 FACTORIAL**

Esta estrategia consiste en variar los factores en conjunto, en lugar de variar uno a la vez. En el diseño se usan todas las combinaciones de los niveles de los factores. Por ejemplo, un diseño factorial  $2^2$  es un diseño de dos factores, cada uno con dos niveles (Montgomery, 2003). En un diseño experimental se pueden realizar una o más réplicas para dar más seguridad al estudio. Un diseño de este

tipo permite analizar los efectos principales o efectos individuales. En general, si hay  $k$  factores, cada uno con dos niveles, el diseño factorial requeriría  $2^k$  corridas. Cuando el número de factores aumenta, también aumenta el número de corridas (Montgomery, 2003). Este tipo de experimentos estima los efectos principales y todas las interacciones posibles, todas ortogonales entre una y otra.

Es usual considerar dos niveles de factores, con el fin de mantener acotados el número de ensayos necesarios para obtener información de los efectos y sus interacciones. Para esto se usa el diseño  $2^k$  factorial, donde cada factor tiene dos niveles.

#### **1.7.4 ISOPLOT**

El Isoplot es una herramienta sencilla que sirve para evaluar si un sistema de medición tiene poder de discriminación adecuado, es decir evalúa pequeños errores con relación a la variabilidad del parámetro que está siendo medido. Con esto se previene interpretaciones y decisiones erradas, debido al error o a la incertidumbre de la medición.

Para construir un Isoplot se debe cumplir los siguientes pasos:

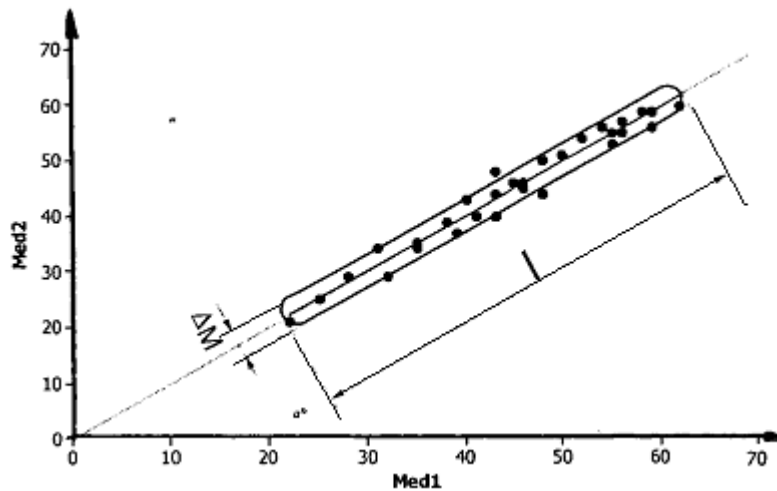
- Retirar una muestra estratificada de por ejemplo 30 piezas del proceso a ser medido, enumerándolas en secuencia. La muestra debe cubrir toda la variación esperada en las mediciones resultante del proceso.
- Medición 1. Elegir un operador y pedirle que mida cada pieza en orden aleatorio.
- Medición 2. El mismo operador debe medir nuevamente cada pieza en forma aleatoria.
- Construir un diagrama de dispersión con los valores de Medición 1 en el eje  $x$  y los de la medición 2 en el eje  $Y$ . Cada punto  $(x,y)$  corresponderá a una pieza, medida dos veces (Medición1, Medición 2). (QUALIPLUS, 2006).



En la figura con forma de una salchicha se debe medir:

- $\Delta M$  (diámetro de la salchicha), y
- $l$  (longitud de la salchicha)

El criterio de aceptación es:  $l/\Delta M \geq 8,5$ , y se observa en la Figura 1.11



**Figura 1.11** Gráfico generado por Isoplot.  
(QUALIPLUS, 2006)

## 1.8 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

### 1.8.1 ANTECEDENTES

La Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. inicia su producción en el año 1979, elabora el tablero de partículas aglomeradas con una moderna línea de producción para la comercialización en el mercado nacional. En la actualidad, Aglomerados Cotopaxi cuenta con tres líneas de producción que son: aglomerado, tablero de densidad media (MDF), y aserrado de piezas de madera sólida de pino.

El MDF es un tablero de densidad media, elaborado con fibras de madera de pino agrupadas a través de un adherente sintético de resinas, las cuales se compactan al ser sometidas a un proceso de prensado que usa alta presión y temperatura.

En la línea de aserrado, la unidad principal produce listones de madera sólida. Los desperdicios de las líneas de producción es utilizado como materia prima para la producción de tablero aglomerado, así como también para la generación de energía térmica, fuente de consumo interno de la planta.

## **1.8.2 DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN GENERAL**

El tablero aglomerado, está formado por múltiples capas de partículas de madera seleccionada: aserrín, virutas y astillas de diferentes tamaños que mediante la adición de un adhesivo en base de una resina de Urea Formaldehído se lo compacta a través de procesos de alta presión y temperatura, cumpliendo estándares y normas internacionales (DIN 68761, DIN 68750, ANSI A208.1(M-3), ANSI A208.1(M-S)). (SGI ACOSA, 2009).

Para el terminado de los tableros de aglomerado se utiliza chapas de madera decorativa, melaninas y papeles decorativos.

## **1.8.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL TABLERO DE AGLOMERADO**

El proceso de elaboración del tablero aglomerado está constituido por varios subprocesos que se muestran en la Figura 1.12 y son los siguientes: recepción de materia prima, descortezado y viruteado, secado, cribado, encolado, formación del tablero, prensado, enfriamiento y escuadre, lijado, recubrimiento, almacenamiento y distribución.

### **1.8.3.1 Recepción de Materia Prima**

La madera, en su mayoría proveniente de los bosques propios de la empresa, es clasificada en base a criterios como: diámetro, longitud, edad y tipo de especie,

pino o eucalipto, para posteriormente tratarlo y destinarlo a la línea de producción donde se requieran.

### **1.8.3.2 Descortezado y Viruteado**

En este proceso se retira la corteza de las trozas, las trozas de pino pasan por un proceso de aserrado para convertirse en madera sólida y ser expandida, los residuos son conducidos por medio de bandas transportadoras al molino, conocido como viruteador, el cual los transforma en chips (astillas de madera de 40mmx40mmx49mm) y luego en virutas, elemento para la constitución del tablero aglomerado.

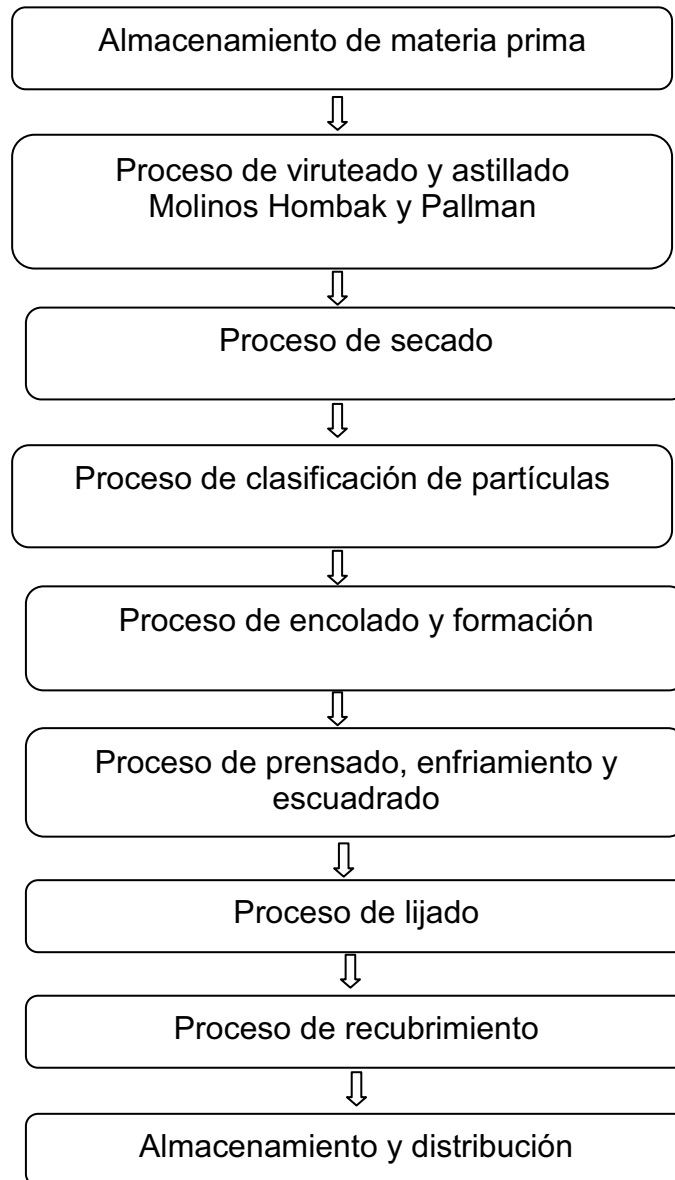
### **1.8.3.3 Secado de Viruta**

La viruta de madera ingresa a través de una banda transportadora hacia un tambor rotativo que recepta el aire caliente de un quemador, este permite disminuir el porcentaje de humedad desde 120% hasta dejarlo entre 2,5% y 3,5% siendo así apto para continuar con el proceso.

### **1.8.3.4 Cribado**

La viruta seca pasa por dos subetapas de clasificación: el cribado y paso por el árbol de rastros (clasificador de astillas por medio de aspiración). Todo el material seco llega a la criba, equipo que contiene tres tamices (de 50x50, 10x10 y 3x3 mm) que permiten clasificarlo en base al tamaño; las partículas finas son aspiradas por un ventilador hacia un silo de almacenamiento, las medianas son enviadas hacia el molino de doble corriente y las grandes al molino de martillos, las partículas gruesas llegan hacia el árbol de rastros en donde por aspiración se discrimina el tamaño de las astillas para las más pequeñas almacenarlas en el silo de gruesos, las astillas restantes muy gruesas pasan nuevamente por el molino

de martillos y los residuos muy finos son utilizados como material de combustión para el caldero. (SGI ACOSA, 2009)



**Figura 1.12** Esquema del proceso de elaboración de tableros aglomerados.

#### 1.8.3.5 Encolado

Las partículas secas y clasificadas, son extraídas desde los dos silos de almacenamiento, simultáneamente son pesadas para por medio de recetas

combinarlas con un pegamento formado de: resina formaldehído, parafina y agua; la formulación de las partículas gruesas incluye catalizador. La proporción de los dos tipos de partículas son de acuerdo al espesor del tablero. La mezcla de los mismos es transportada hacia la máquina formadora. (SGI ACOSA, 2009)

#### **1.8.3.6 Formado del Tablero**

En esta etapa la mezcla llega hacia la formadora, equipo constituido por un clasificador por aire y tamices ubicados dentro de un vehículo que se mueve accionado hidráulicamente sobre unas rieles ubicadas en el piso; el proceso de clasificación por aire según la granulometría, se encarga de dar la forma al tablero, considerando que las partículas finas permanezcan en los bordes y las gruesas constituyan el centro del tablero. La mezcla de material ingresa por unas bandas transportadoras que lo dejan caer sobre un coche vaivén, que esparce el material en forma horizontal uniforme sobre una última banda de transporte de velocidad regulable; sobre esta banda el material se va depositando de manera uniforme debido a la acción de cilindros que controlan el nivel de la mezcla, posteriormente esta banda, deja caer por gravedad la mezcla sobre una serie de tamices a lo que se suma el efecto de aire a una presión que hace que las partículas pequeñas se alejen y las partículas gruesas se depositen cerca. Como la clasificadora se mueve sobre una mesa de formación, las partículas finas se van depositando abajo, luego se depositan las partículas gruesas y luego nuevamente se depositan las partículas finas, constituyendo el colchón de material listo para continuar hacia el prensado. (SGI ACOSA, 2009)

#### **1.8.3.7 Prensado**

El colchón de material, por medio de una banda de cinta transportadora, se lleva a una prensa hidráulica de gran capacidad que lo comprime hasta el espesor adecuado. El tiempo de prensado, las presiones de 280 Bares y temperaturas de alrededor de 190<sup>0</sup>C, son definidas por los controles de este proceso, todo con el

objeto de curar o fraguar la resina y dar forma definida al tablero. (SGI ACOSA, 2009)

#### **1.8.3.8 Enfriamiento y Escuadrado**

Cuando el tablero sale de la prensa se mide en línea su espesor y su peso, se controlan que estén dentro de los parámetros definidos por el plan de calidad, luego el tablero pasa hacia el volteador, donde se procede a su enfriamiento. El tablero frío pasa a las sierras de formateo, donde se logra el escuadre; es decir, el corte de ancho y largo de éste, mediante sierras múltiples.

#### **1.8.3.9 Lijado**

Luego del escuadrado, el tablero necesita un tiempo de reposo de aproximadamente dos días que permiten que éste tome dimensiones físicas de espesor definitivas. Luego, el tablero pasa por tres etapas de lijado, al final de este proceso se imprime en éste el grosor del tablero y se procede a su almacenamiento.

Es importante recalcar que el desecho del lijado es aspirado y almacenado en un silo de polvo. El polvo es utilizado como combustible para los calderos de generación de energía térmica.

#### **1.8.3.10 Almacenamiento y Distribución**

A continuación del lijado, el tablero es inspeccionado y manualmente clasificado según los estándares de calidad que tiene la empresa. Si el tablero es aprobado se lo almacena como producto terminado crudo. Estos tableros pueden requerir acabado decorativo; de ser así, los tableros pasan a la línea de recubrimiento donde se lo recubre con chapas decorativas o papeles melamínicos. Los tableros

acabados son embalados, etiquetados, almacenados, y se los tiene listo para la distribución.

#### **1.8.4 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL**

La administración de la empresa se realiza en base a un modelo organizacional funcional piramidal, por departamentos con delegación de responsabilidades por funciones. En las Figuras 1.13 y 1.14 se muestra el Organigrama de la Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A.

#### **1.8.5 PRODUCTOS**

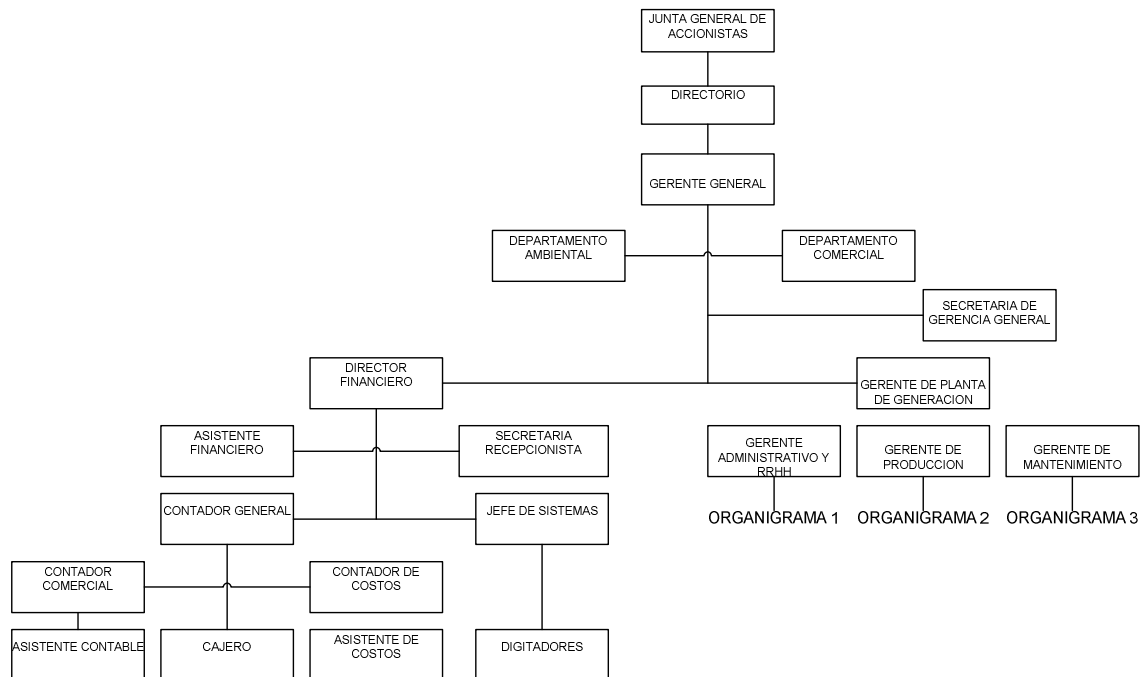
La empresa elabora tableros aglomerados de los siguientes tipos: Duraplac Crudo, Duraplac Foil, Duraplac Melamina, Duraplac Chapa y Duraplac RH (Resistente a la humedad). Los espesores disponibles son 4, 6, 9, 12, 15, 19, 25 y 30 mm. Las medidas estándar de largo y ancho son 2 440x2 150 mm.

Los tipos de tableros MDF que se producen son: Fibraplac Crudo, Fibraplac Foil, Fibraplac Melamina, Fibraplac Chapa, Fibraplac Ranurado y Fibraplac Light. Los espesores disponibles son 4, 6, 9, 12, 15, 19, 25, 30 y 35 mm. Para este tipo de tablero es posible cualquier espesor dentro del rango de 3 a 35 mm. Las medidas estándar de largo y ancho son 2 440x1 830 mm.

Los listones de madera sólida se elaboran en medidas que van desde espesores de 10 a 25 mm. El ancho puede variar desde 120 a 400 mm. Y la longitud puede variar desde 1 000 a 4 000 mm. (SGI ACOSA, 2009)

### 1.8.6 CLIENTES

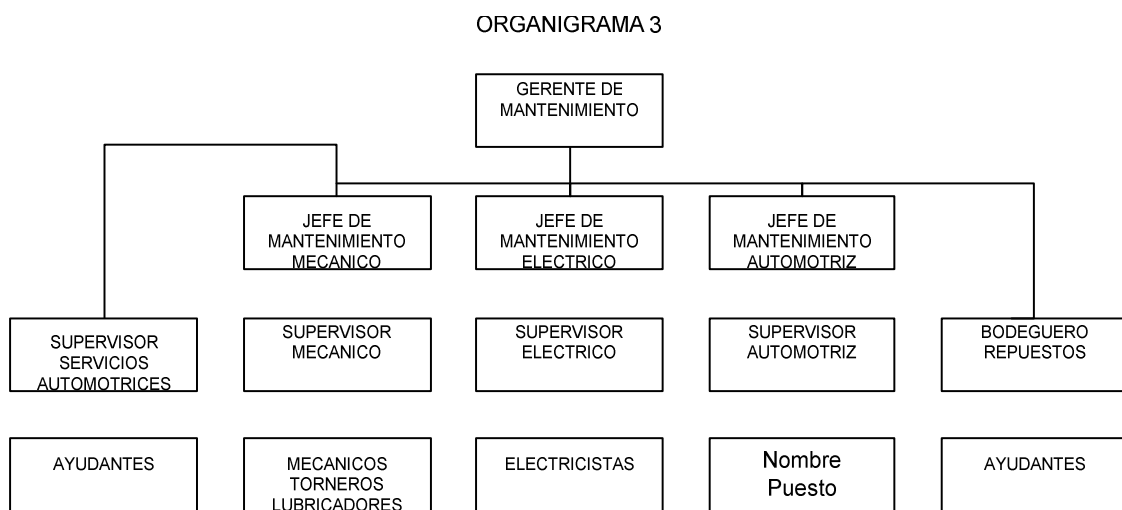
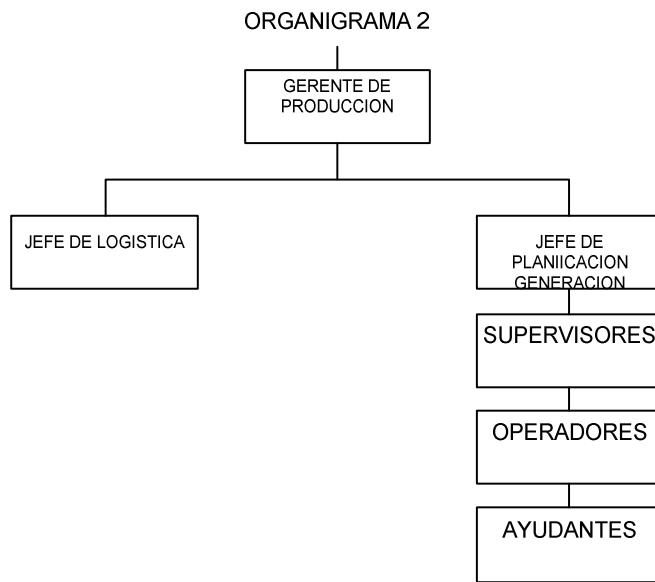
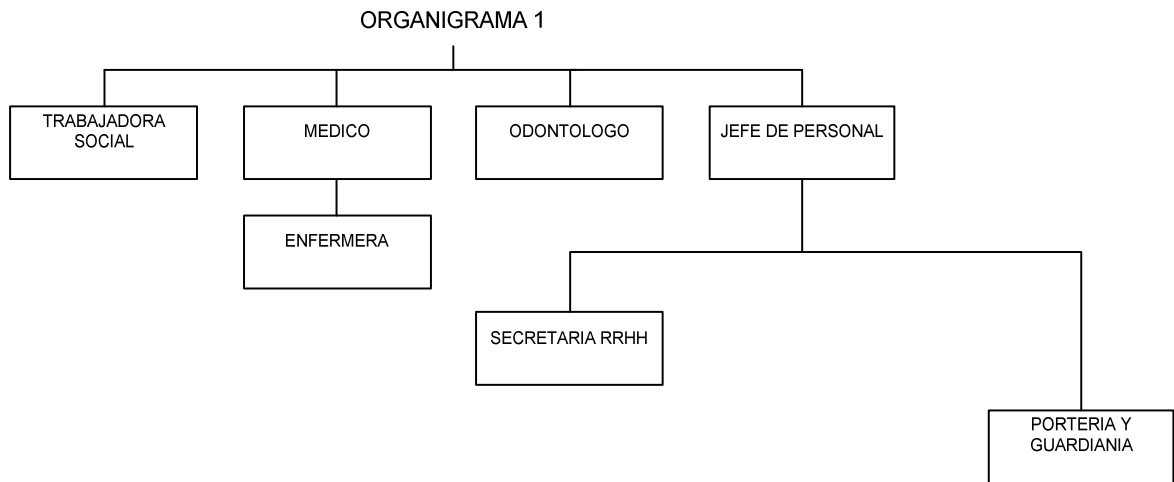
Como cliente único de Aglomerados Cotopaxi S.A. está su distribuidor principal Edimca que se encarga de la distribución en el mercado nacional con agencias en Quito, Guayaquil y Cuenca.



**Figura 1.13** Organigrama de la empresa Aglomerados Cotopaxi.

(SGI ACOSA, 2009)





**Figura 1.14** Organigrama 1, 2 y 3 de la empresa Aglomerados Cotopaxi.  
(SGI ACOSA, 2009)

Para la distribución en el mercado Colombiano se realiza por medio de su distribuidor Cotopaxi Colombia, en el mercado Peruano se distribuye por medio de su principal cliente Interforest. Se exporta también a Estados Unidos, Honduras, Méjico, Cuba, Venezuela, Japón, Corea y Panamá. (SGI ACOSA, 2009)

### **1.8.7 PROVEEDORES**

La madera, principal materia prima de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. es proveniente de sus bosques propios, con 18 000 hectáreas de bosques de pino radiata cultivados desde 1978. La resina en base a formaldehído es suministrada por la empresa multinacional Interquimec. La parafina y emulsión de parafina es suministrada por la empresa brasileña Iso Gama, por la industria argentina Parafina del Plata y por la empresa china Sasol. Las sierras son provistas por las empresas alemanas Leuco, Iks y Felde. Insumos como cuchillas, piezas de desgaste y tamices, son suministradas por la empresa alemana Pallman.

Como proveedores de repuestos constan empresas transnacionales fabricantes de líneas de producción: Pallman, Siempelkamp, Hombak, Imal, Pagnoni, Burkle, Bendorband, Imeas, Incomac, entre otras, la mayoría de procedencia europea y que son adquiridos en gran parte por medio de las comercializadoras Inserco en Alemania e Imal en Italia.

Como proveedores de materiales refractarios constan J.J. Medina, representante de A.P. Green U.S.A.

Como suministradores de partes también están los distribuidores locales representantes de las marcas: Siemens, ABB, Telemecanique, Festo, Rexroth, Smc, Sick, Falk, Skf, y entre otros son Siemens Ecuador, La llave, Iván Bohman, Sensicontrol, Maquinarias Enríquez, Motores Diesel, Ingelcom, Induelec, Inproel, Indusquímica, Incasa.

Como proveedores de servicios constan Multitecniservicios, Metalbosco, Inelmo, Ecuatran, Inselec, Improselec, Induacero, etc.

## **1.8.8 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.8.8.1 Objetivo General**

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo general el contribuir a la mejora de la capacidad del proceso de secado de viruta para la fabricación de tableros aglomerados en la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A.

### **1.8.8.2 Objetivos Específicos**

Para lograr el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el proceso de elaboración de tableros aglomerados en la parte concerniente al secado de viruta.
- Aplicar la metodología Six Sigma.
- A partir del análisis de los resultados, determinar las causas de variabilidad del proceso, determinar las causas especiales del proceso y recomendar acciones tendientes a mejorar el proceso de secado.
- Identificar las características críticas del proceso.
- Definir los parámetros de desempeño.
- Determinar la Estabilidad y Capacidad del proceso.
- Determinar indicadores.
- Proponer el diseño de un experimento de Ingeniería Robusta tendiente a mejorar la capacidad del proceso de secado.
- Justificar posibles modificaciones al actual proceso en caso de ser necesarios.

### 1.8.9 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Para la realización de este trabajo investigativo se plantean las siguientes

Hipótesis de trabajo:

- La aplicación de la Metodología Six Sigma optimiza el desempeño del proceso.
- Del análisis de los resultados se determinan las causas de variabilidad del proceso, con las acciones tendientes a eliminarlas o minimizarlas, será posible disminuir la variabilidad del proceso y poder mover la media dentro del rango de tolerancia, a valores que permitan el incremento de los volúmenes de material seco y disminuir los costos de producción.
- El identificar las características críticas del proceso, permite incrementar la estabilidad y la capacidad del proceso.
- El disponer de indicadores permite controlar el proceso.
- Un experimento de Ingeniería Robusta incrementa la capacidad del proceso de secado.

## **2. METODOLOGÍA**

En este capítulo se describen los métodos que fueron utilizados durante las diferentes fases o etapas de la metodología Six Sigma conocidas como DMAMC (DEFINIR, MEDIR, ANALIZAR, MEJORAR y CONTROLAR).

### **2.1 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL**

Con base en las metodologías de la observación y la deducción, se realizó visitas diarias al proceso de secado durante dos meses como parte del trabajo rutinario del equipo investigador. Se analizó detenidamente el proceso, se realizó una descripción detallada del proceso de secado de viruta. Por medio de entrevistas con los operadores del proceso y con la ayuda de la herramienta grafica diagrama de flujo SIPOC, se identificó los proveedores del proceso, las entradas, las salidas y los clientes.

Una vez detallado el proceso, se procedió a aplicar las fases DMAMC, que es un abordaje estructurado que promueve el uso integrado de varios métodos y herramientas en proyectos de mejoramiento, cuyo objetivo es reducir drásticamente la variabilidad en el desempeño de atributos relevantes para la satisfacción de los clientes.

### **2.2 FASE DEFINIR**

En esta fase de la Metodología Six Sigma, la investigación utilizó el método deductivo, siguiendo un proceso reflexivo sintético analítico; se identificaron aquellos problemas u oportunidades de mejora más directamente vinculados a la satisfacción del cliente u obtención de ahorros económicos en el proceso y se estableció las posibles causas que influían en el problema. La metodología Six Sigma recomienda en la fase Definir el uso de la herramienta Análisis de Pareto

para identificar el foco de mejora, que es un método analítico y sintético en consideración que, por medio de esta herramienta se procedió a analizar las principales causas de defectos en los tableros producidos en las semanas 1 a 24 del año 2009 de la línea de producción de tableros aglomerados. Se organizaron los datos por orden descendente, de izquierda a derecha por medio de barras sencillas después de haber reunido los datos para calificar las causas, de modo que se pudo asignar un orden de prioridades, lo que nos permitió separar los “pocos vitales” de los “muchos triviales”.

Posteriormente a través de reuniones con todo el personal que trabaja en el proceso de secado utilizando como técnica los organizadores gráficos, se procedió a realizar el diagrama Causa – Efecto de los tableros flojos, soplados y reventados.

El Diagrama Causa-Efecto permitió realizar el análisis del problema, y determinar las diversas causas de distinta importancia, trascendencia o proporción. Algunas causas determinadas en esta etapa podían o no tener relación con la presentación u origen del problema y otras, con los efectos que estos producían, por lo que se solicitó que todos los presentes vayan enunciando sus sugerencias, sin analizar con profundidad su validez. El problema principal que se deseaba analizar, fue colocado en el extremo derecho del diagrama, encerrado en un rectángulo para visualizarlo con facilidad. Los conceptos e ideas que aparecían se fueron colocando en diversos lugares, agrupándolos según su naturaleza de maquinaria, materia prima, método, medio ambiente y mano de obra. Información que posteriormente fue verificada y validada con datos. Finalmente se verificó que todos los factores que puedan causar dispersión hayan sido incorporados al diagrama. Las relaciones *Causa-Efecto* quedaron claramente establecidas.

Con las metodologías de la observación y la posterior deducción a través del diagrama de Causa-Efecto que es de por sí educativo, permitió para que la gente conozca con profundidad el proceso en el que trabajaba, visualizando con claridad las relaciones entre los Efectos y sus Causas. Sirvió también para guiar las discusiones, al exponer con claridad los orígenes del problema de calidad. Y

permitió encontrar más rápidamente las causas reales cuando el proceso se apartaba de su funcionamiento habitual.

Durante la ejecución de los diagramas causa- efecto, realizados con el personal de producción y mantenimiento, se pudo observar la causa raíz del problema. Una vez determinada la causa raíz del problema, se procedió a utilizar la técnica interrogativa de los Cinco Por Qué. Se reunió a los operadores y personal de mantenimiento más experimentados. Se inició planteando únicamente la primera pregunta del Por qué el problema, la respuesta dada por el grupo de trabajo, se volvía a formular como pregunta y así sucesivamente hasta hacer visible la causa raíz de dicho problema.

Por medio de esta técnica interrogativa de los Cinco Por Qué, se llegó a determinar las principales debilidades o problemas del proceso de secado y la característica crítica del proceso, lo que permitió formular el Objetivo de Mejora.

De acuerdo a la técnica experiencial, siguiendo la metodología Six Sigma, se procedió a elaborar el CT Flowdown, que es el despliegue simplificado de las características críticas para la satisfacción del cliente, asociándolas a los parámetros clave del producto y sus respectivos procesos. Posteriormente se define los parámetros de desempeño a partir del criterio de experiencia del personal operativo y de los manuales de operación del fabricante. Se seleccionó los indicadores de desempeño en base al comportamiento estadístico anual del proceso. Se determinó el objetivo general y los objetivos específicos.

### **2.3 FASE MEDIR**

Con el organizador gráfico diagrama de flujo, en esta etapa del proceso se buscó asegurar el entendimiento del proceso, visualizado en detalle: suministradores, entradas, actividades, salidas y clientes.

En base a la técnica experimental, para validar los datos a medir, se analizó la reproductividad y repetitividad del sistema de medición utilizado para medir la humedad del material, para lo cual, se realizó un Isoplot (Shainin), herramienta que permitió evaluar si el sistema de medición tiene poder de discriminación adecuado, es decir, error pequeño con relación a la variabilidad de la magnitud que está siendo medida, previniendo con esto interpretaciones y decisiones erradas, debido al error o la incertidumbre de la medición. Según esta herramienta, se procedió a contrastar el valor medido de humedad con el equipo de medición NDC MM750 y comparándolo con el valor medido en el equipo de laboratorio LAB-MEMMERT, el mismo que es calibrado en el INEN, lo que da al equipo de medición NDC MM750 la trazabilidad adecuada con patrones internacionales.

Con la ayuda de la estadística descriptiva, se determinó que existen causas especiales de variación actuando sobre el proceso. Una vez que se eliminaron las causas especiales, se demostró que el proceso es capaz de cumplir la tolerancia especificada.

## **2.4 FASE ANALIZAR**

Con base en la metodología de la estadística descriptiva, en la Fase Analizar, se identificaron las causas primarias del problema de baja capacidad del proceso de secado. Con ayuda del software estadístico MINITAB y las gráficas de control que este proporciona, se analizó el rango de variabilidad del proceso más conocido como la variación de causa común, lo que ayudó a determinar que el proceso no se desarrolla de manera consistente y que existen causas especiales que provocaban el cambio en la media. Se determinaron los límites superior e inferior de las gráficas de control. Se demostró que los datos que caen fuera de estos límites eran variaciones debidas a causas especiales, las cuales fueron identificadas y eliminadas, no así las causas comunes que para eliminarse implicarían cambios fundamentales en el proceso. Se realizó cálculos de valor medio, desviación estándar y capacidades del proceso, lo que indicó que el



proceso tenía un comportamiento normal, con un rendimiento del proceso muy bajo, con una alta variabilidad y una media fuera de tolerancia y desplazada hacia el límite inferior.

Con la metodología experimental, se determinó la Ortogonalidad de las variables del proceso, al verificar que las variables pueden ser evaluadas independientemente. Se realizó un análisis de comportamiento en el tiempo de la variable de salida al modificar las variables de entrada en forma individual. Se realizó experimentos con una variable fija y modificando la otra variable dentro de los rangos permitidos para analizar el comportamiento del proceso.

## **2.5 FASE MEJORAR**

Mediante la operacionalización de las variables, en esta fase de mejora se determinó la relación causa-efecto, relación entre las variables de entrada (variable independiente) y la variable de respuesta (variable dependiente) para predecir, mejorar y optimizar el funcionamiento del proceso. Por último se determinó el rango operacional de los parámetros o variables de entrada del proceso.

Con la metodología de organizadores gráficos, por medio del instrumento tormenta de ideas, realizadas con los operadores y supervisores del secadero se encontraron las causas de la variabilidad de la humedad del material a la salida del proceso.

Con la metodología experimental y la deducción, se realizó el desarrollo del experimento de Ingeniería Robusta. Se seleccionó un arreglo L9, se determinaron dos variables, cantidad de material y temperatura a la salida del secadero. En la Tabla 2.1 se muestran los tres niveles que fueron seleccionados para cada variable. Se realizó una serie de pruebas o corridas con cambios intencionados a las variables de entrada y en cada ejecución se recopilaron datos de la variable humedad de salida. Cada corrida tuvo una duración mínima de 4 horas. Se

verificó cada una de las diferentes combinaciones posibles; en total se probó 9 combinaciones de las dos variables de entrada.

**Tabla 2.1** Niveles seleccionados de las variables del sistema de Secado de material

Temperatura a la salida del secadero.	T1: De 100°C a 116,6°C	T2: De 116,7°C a 133,6°C	T3: De 133,7°C a 150°C
Cantidad de material de ingreso al secadero	M1: De 10 a 32 kg/min	M2: De 32,1 a 64 kg/min	M3: De 64,1 a 96 kg/min

Para la medición de la humedad del material a la salida del proceso se utilizó el equipo NDC710. Para la medición de los parámetros de temperatura a la entrada y a la salida del secadero se utilizó los termómetros propios del equipo, los mismos que son calibrados periódicamente como parte del Sistema de Gestión Integrado.

Con la ayuda del software estadístico MINITAB, se realizó un análisis estadístico del comportamiento del proceso, en especial, se realizó el análisis de la relación señal/ruido de la variable humedad del material a la salida del proceso. Se seleccionó la combinación de condiciones con las cuales se obtuvo la menor variabilidad del proceso, volviéndolo mínimamente sensible (robusto) a los factores que causan variabilidad en el producto de salida. De las dos variables de entrada seleccionadas como independientes, por medio del análisis Multi-Vari, se determinó que variable es un factor tipo 1 (que afecta a la variabilidad) y que variable es un factor tipo 2 (que afecta a la media). Posteriormente se colocó la variable tipo 1 en los niveles que minimizan la variabilidad, para luego usar el factor tipo 2 para ajustar la media en el valor nominal.

## **2.6 FASE CONTROLAR**

Con base en el proceso administrativo, en la fase control, se documentaron los controles necesarios para asegurar que lo conseguido mediante el proyecto Six Sigma, se mantenga una vez que se hayan implantado los cambios. Se estandarizaron las mejoras para asegurar su consistencia, monitorear y mantener en control al proceso. Se socializaron los resultados a través de reuniones con el personal.

Para trabajar en forma permanente en las nuevas condiciones de operación fue necesario realizar ciertas modificaciones al proceso y la compra de equipos.

## **2.7 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RESULTADOS**

Con base en los datos estadísticos obtenidos durante el experimento confirmatorio y de los meses posteriores de productividad del proceso, se procedió a realizar un análisis cuantitativo de los datos.

Se midieron las pérdidas por tableros desclasificados a causa de los defectos flojos, soplados y reventados y se comparó con los resultados después de la implementación de las mejoras, se consideró como indicador del proceso la relación de volumen de tableros desclasificados por tableros flojos, soplados y reventados, comparándolos con el volumen total de tableros producidos. Se realizó un análisis económico del impacto del proyecto.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se describe en forma detallada el proceso de secado de viruta, así mismo se aplica el DMAMC para el mencionado proceso con sus respectivos gráficos en Excel y en el software estadístico Minitab.

#### **3.1 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL**

El proceso de secado está a continuación de los procesos de viruteado y astillado, el mismo es un proceso físico que permite retirar la humedad de la madera y se muestra detallado en las Figuras 3.1 y 3.2. El material húmedo se almacena en los silos provistos de pisos móviles accionados por cilindros neumáticos, que depositan el material sobre un tornillo sin fin, cuya velocidad es regulada por un sistema motor-reductor-driver.

Existen dos silos de material húmedo: uno es el de viruta (221), y el otro es el de astilla (201), éstos se muestran en el sector 1 y 2 de la Figura 3.1. El material que ingresa al tambor de secado (203 m1) proviene de los dos silos de partículas húmedas (201 y 221) y es mezclado con aserrín extraído desde una tolva profunda (241 m1); el contenido de humedad, la temperatura de secado así como el espesor de tablero a producir, constituyen fundamentos para que el operador, según un plan de calidad regule la cantidad de cada tipo de material a secar; el mismo que es transportado por una banda (202 m1) hacia la esclusa de entrada al tambor de secado (203 m1) mostrado en el sector 3 de la Figura 3.1. (SGI ACOSA, 2009)

El material húmedo atraviesa la cámara de secado o tambor giratorio (203 m4), que está provisto de unas bandejas internas inclinadas para facilitar su flujo. Un ventilador (203 m3) ubicado sobre la cámara hace circular aire caliente a 500<sup>0</sup>C proveniente del quemador y que se muestra en el sector 5 de la Figura 3.1, así también extrae los gases que se desprenden de la combustión y ayuda al flujo del

material y se observa en el sector 4 de la Figura 3.1. La temperatura interior en la cámara de secado o tambor giratorio debe ser adecuada para mantener un rango de humedad del material de salida entre 2,5% y 3,5%.

El quemador de diesel, que se muestra en el sector 5 de la Figura 3.1, es el encargado de producir aire caliente, y debe pasar por una secuencia de encendido cumpliendo condiciones necesarias para este tipo de equipos y que son: un pre barrido con aire, detección de ausencia de fuego y presión positiva de los ventiladores de aspiración.

La chispa generada por un electrodo enciende la llama piloto de un quemador a gas, que posteriormente permite la combustión del diesel atomizado con una presión que no excede los 2 bares; el diesel proviene desde los tanques de almacenamiento con la ayuda de unas bombas que funcionan en forma alternada (203 m9 y 203 m10) que son redundantes para facilitar la limpieza periódica de sus filtros, todo el quemador está equipado con un controlador independiente que coordina la secuencia de encendido del quemador.

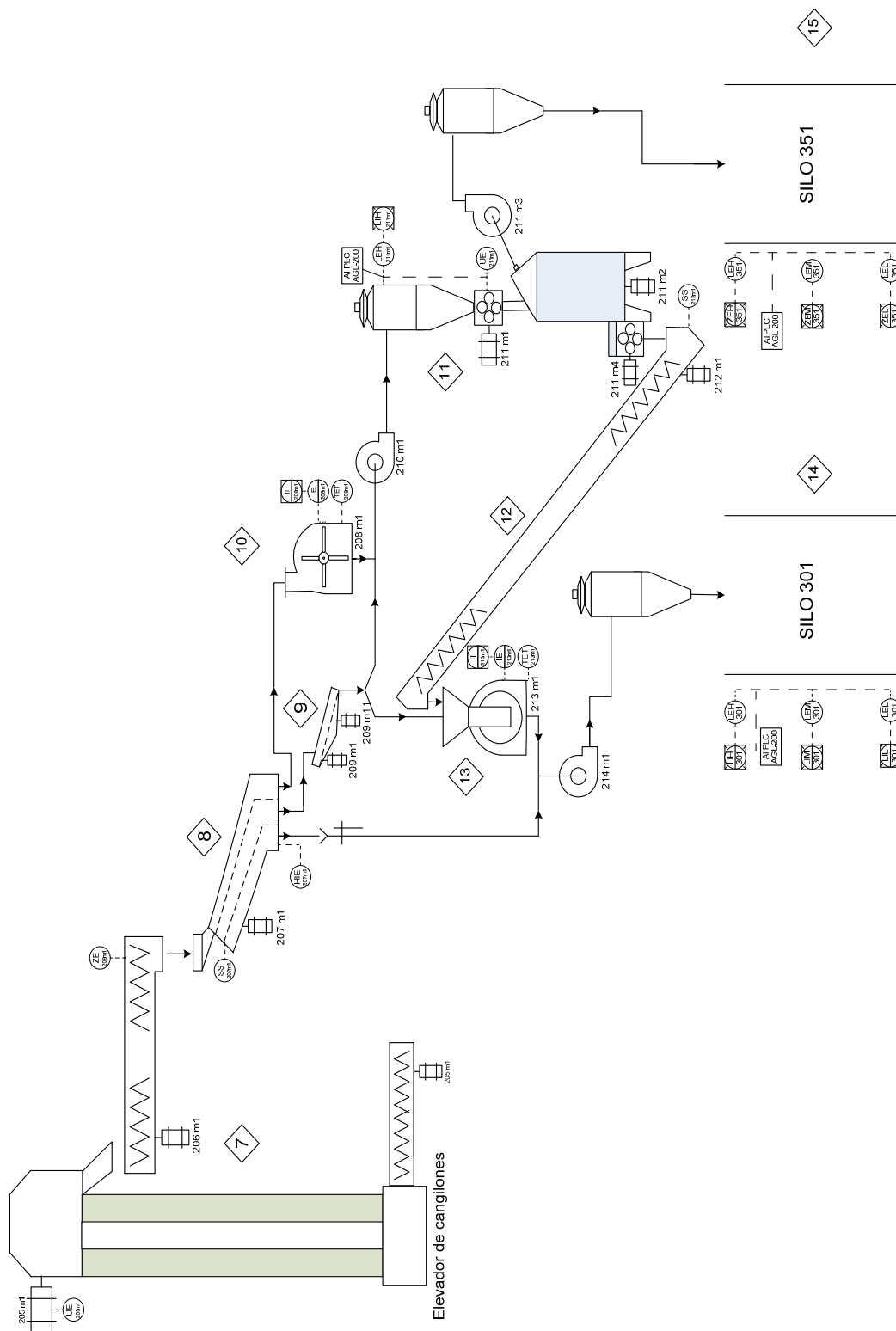
Se dispone también de un sistema de combustión de polvo que se observa en el sector 6 de la Figura 3.1, permite quemar el polvo procedente de un silo que recopila los residuos del proceso de lijado, el mismo que ingresa a la cámara de combustión por medio de un tornillo sin fin y un transportador neumático. El porcentaje de mezcla polvo diesel, depende del criterio del operador, de un plan de calidad y de la disponibilidad del polvo.

A la salida del tambor de secado, el material grueso es extraído por un tornillo sin fin que se muestra en el sector 6 de la Figura 3.1, el cual lo dirige hacia el elevador de cangilones (205 m1), que se muestra en el sector 7 de la Figura 3.2, y que lo envía hacia la criba (207 m1), que se observa en el sector 8 de la Figura 3.2, el material fino es separado mecánicamente del aire caliente por medio de un ciclón y depositado sobre el tornillo sin fin (204 m1) hacia el elevador de cangilones. En la criba (207 m1) el material se filtra a través de tres tamices encargados de clasificarlo en tres tamaños de partículas: muy grueso,

medianamente grueso y fino, para darles distinto tratamiento a fin de conseguir los dos grosores finales apropiados para formar la mezcla con la que se fabrican los tableros de aglomerado. (SGI ACOSA, 2009)

Luego de pasar por el proceso de cribado, el material ingresa a dos molinos, el molino de martillos (208 m1) y al molino de doble corriente (213 m1), los mismos que según los requerimientos del proceso, permiten las diversas granulometrías de las partículas. Los materiales recogidos en el árbol de rastros, son clasificados por medio de un sistema de clasificación por flujo de aire en grueso y muy grueso. El material muy grueso es enviado por medio de un tornillo sin fin al molino 213 m1 que se muestra en el sector 13 de la Figura 3.2, y el material grueso es almacenado en el silo 351 indicado en el sector 15 de la Figura 3.2, obteniendo así el otro componente para la fabricación del tablero.

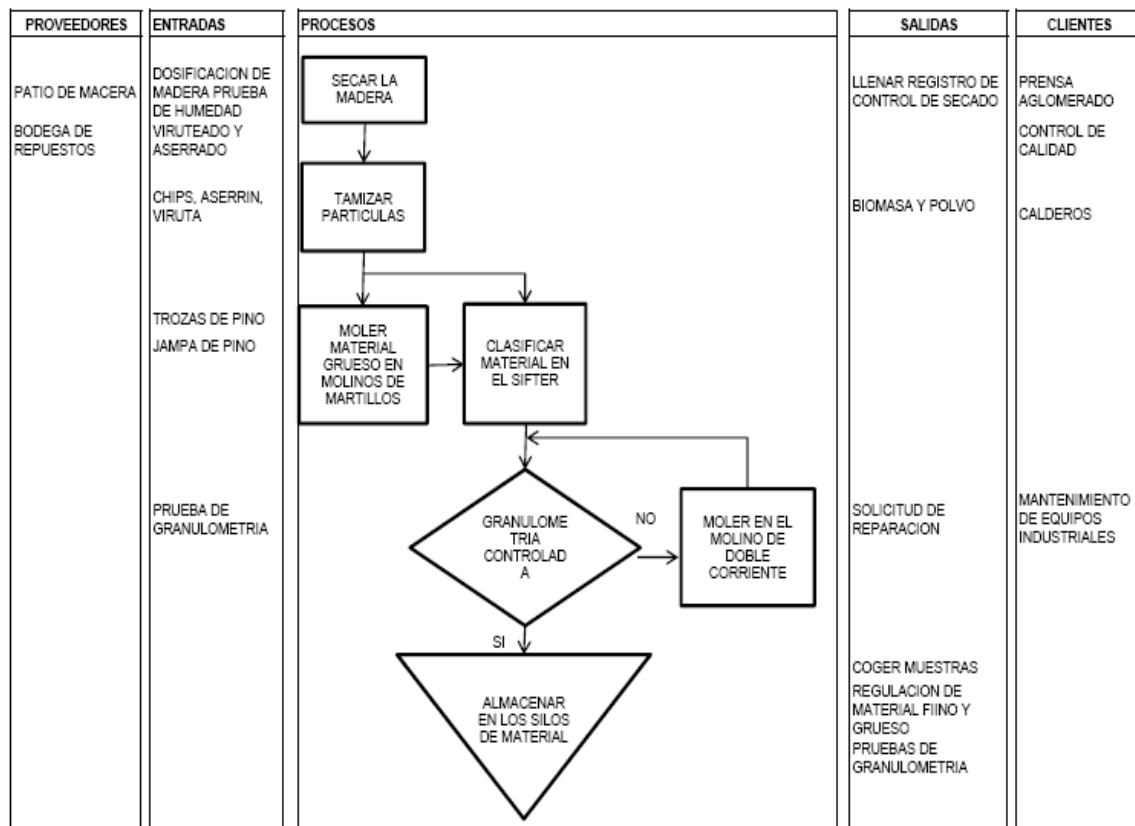




**Figura 3.2** Proceso de Secado desde el elevador de cangilones hasta los silos de material seco.  
(SGI ACOSA, 2009)



En la Figura 3.3 se observa el SIPOC detallado del proceso de secado.



**Figura 3.3** Diagrama SIPOC detallado del proceso de secado.

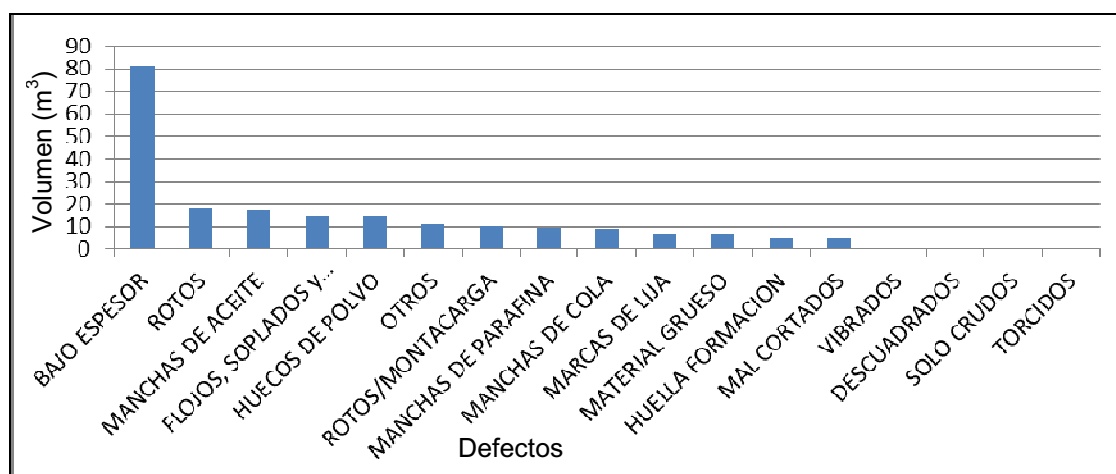
(SGI ACOSA, 2009)

## 3.2 FASE DEFINIR

Se identificaron aquellos problemas u oportunidades de mejora más directamente vinculados a la satisfacción del cliente u obtención de ahorros económicos en el proceso. Para lograrlo, se desarrolló las siguientes actividades:

### 3.2.1 DEFINIR EL FOCO DE MEJORA

Se analizaron las principales causas de defectos en los tableros producidos en las semanas 1 a 24 del año 2009 de la línea de producción de tableros aglomerados, los mismos se muestran en el Anexo C. En la Figura 3.4, se muestra los volúmenes de tableros desclasificados y los principales defectos.



**Figura 3.4** Volumen de tableros desclasificados del proceso de aglomerado durante las semanas 1 a 24 de 2009.  
(SGI ACOSA, 2009)

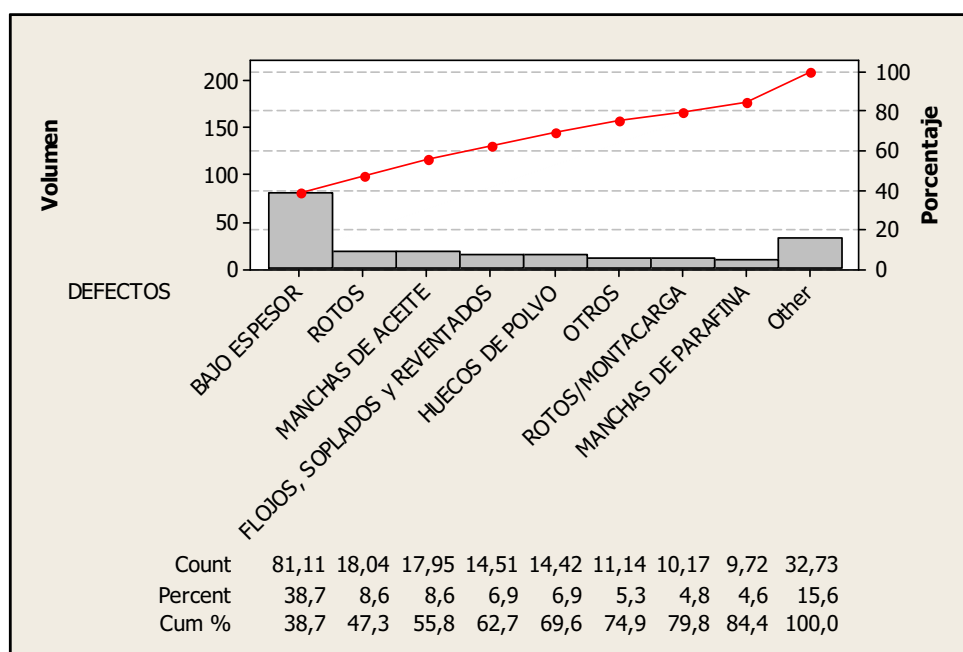
Para determinar los principales defectos y su incidencia, se realizó el Diagrama de Pareto de la Figura 3.5. Según el citado diagrama, se puede observar que los principales defectos que constituyen el 80% de los tableros desclasificados son: bajo espesor, rotos, manchas de aceite, flojos, sopladados y reventados, huecos de polvo, otros, rotos por monta carga.

En la Figura 3.6 se muestra el Grafico I-MR de control del defecto tableros flojos de las semanas 1 a 24 de 2009. Su análisis estadístico de Test de causas especiales muestra que:

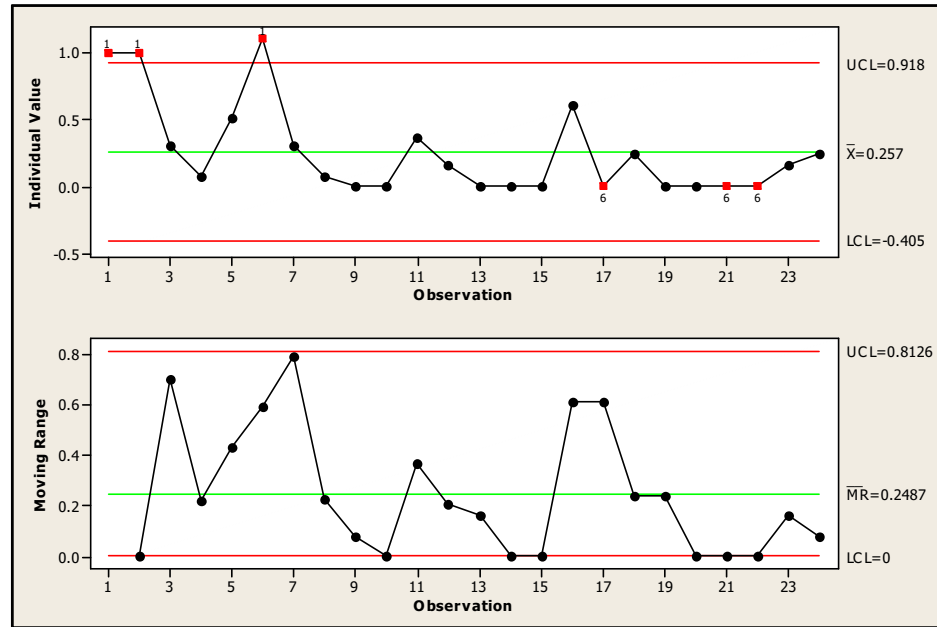
**Test 1.** Un punto con más de 3 desviaciones estándar de la media. Se observan como causas especiales los datos de las semanas 1,2, 6.

**Test 5.** 2 de 3 puntos más de 2 desviaciones estándar de la media. Se observa como causa especial el dato de la semana 2.

**Test 6.** 4 de 5 puntos más de 1 desviación estándar de la media en el mismo lado. Se observa como causas especiales los datos de las semanas 17, 21 y 22.

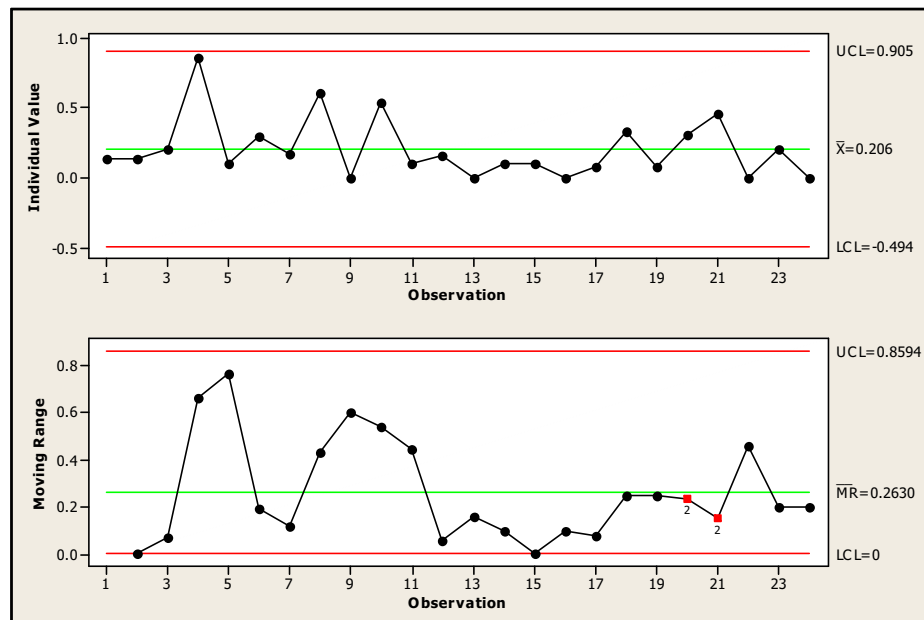


**Figura 3.5** Diagrama de Pareto de principales defectos de tableros desclasificados durante las semanas 1 a 24 del 2009.



**Figura 3.6** Gráfico I-MR de control del defecto tableros flojos de las semanas 1 a 24 de 2009.

En la Figura 3.7, se muestra el Gráfico I-MR de control del defecto tableros soplados de las semanas 1 a 24 de 2009. Su análisis estadístico de test de causas especiales muestra que:



**Figura 3.7** Gráfico I-MR de control del defecto tableros soplados de las semanas 1 a 24 de 2009.

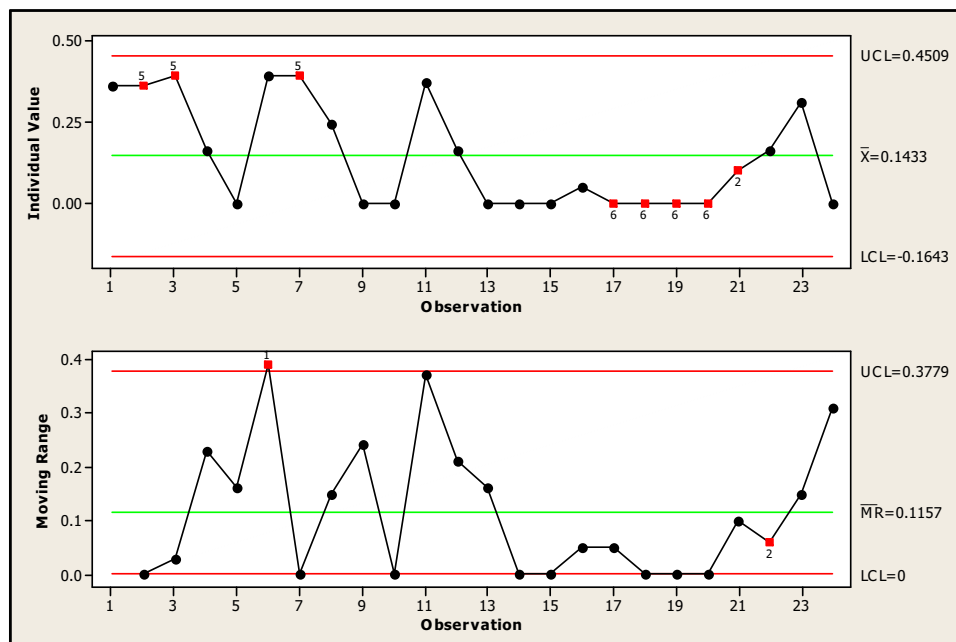
**Test 2.** 9 puntos seguidos en el mismo lado de la media. Se observan como causas especiales los datos de las semanas 20 y 21.

En la Figura 3.8 se muestra el Gráfico I-MR de control del defecto tableros reventados de las semanas 1 a 24 de 2009. Su análisis estadístico de test de causas especiales muestra que:

**Test 2.** 9 puntos seguidos en el mismo lado de la media. Se observan como causas especiales los datos de la semana 21.

**Test 5.** 2 de 3 puntos más de 2 desviaciones estándar de la media. Se observa como causas especiales los datos de las semanas 2, 3 y 7.

**Test 6.** 4 de 5 puntos más de 1 desviación estándar de la media en el mismo lado. Se observa como causas especiales los datos de las semanas 17,18, 19 y 20.



**Figura 3.8** Gráfico I-MR de control del defecto tableros reventados de las semanas 1 a 24 de 2009.

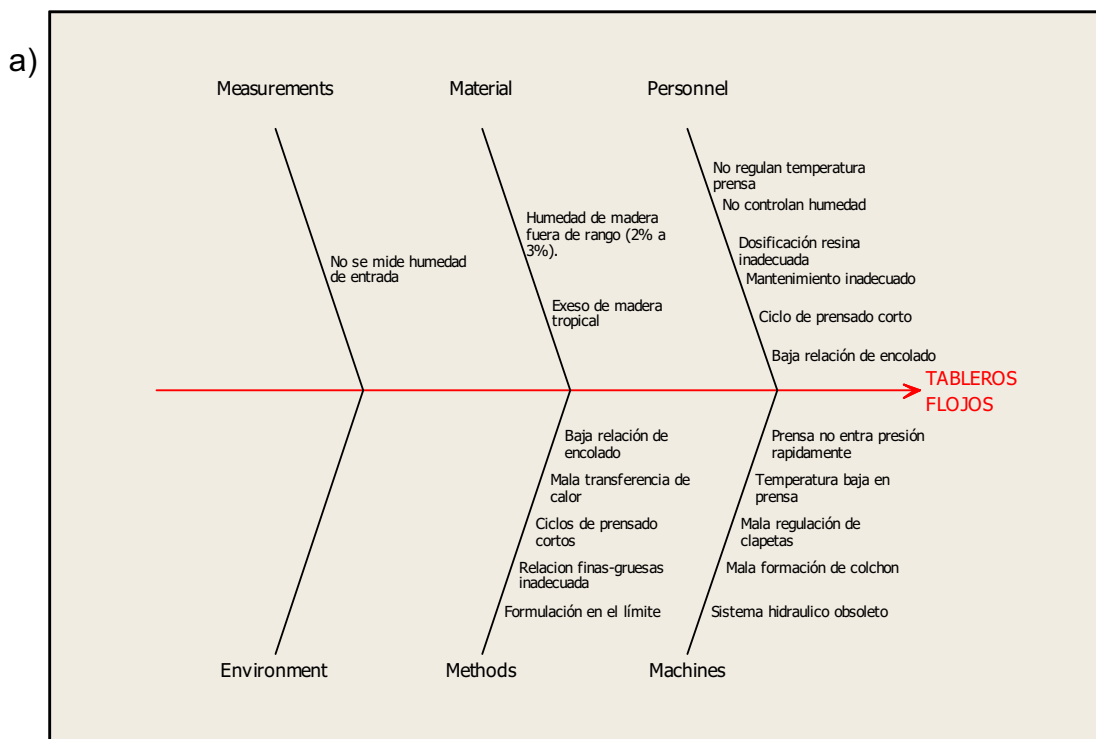
El gráfico MR de control del defecto tableros reventados de las semanas 1 a 24 de 2009, su análisis estadístico de test de causas especiales muestra que:

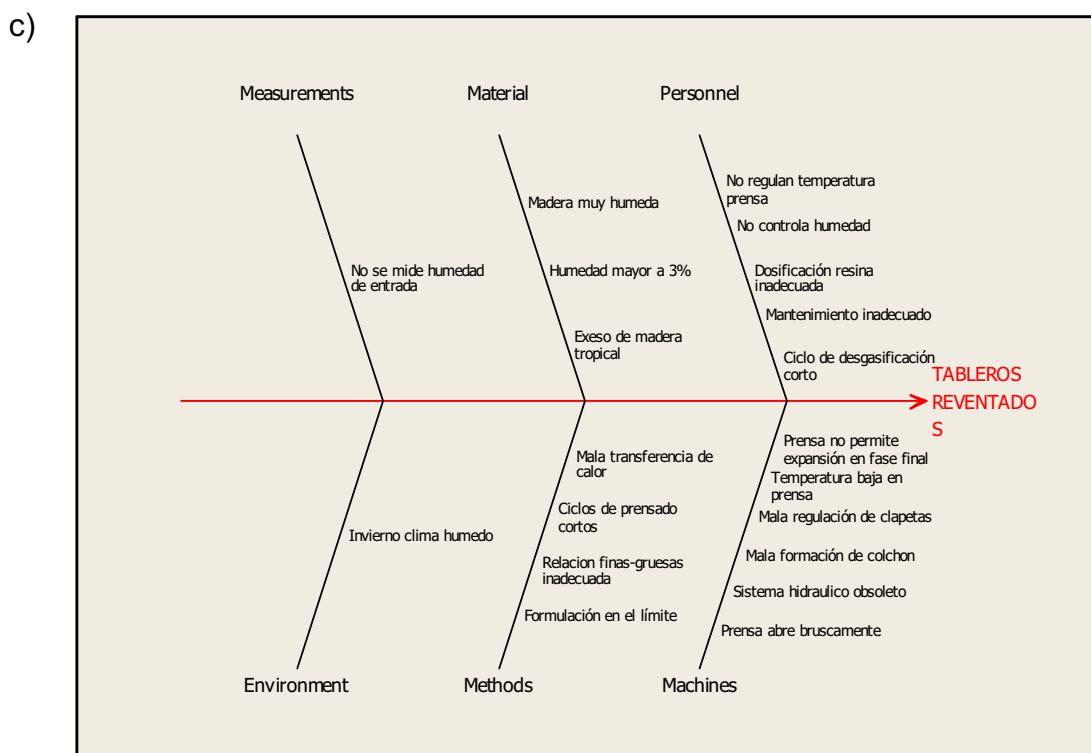
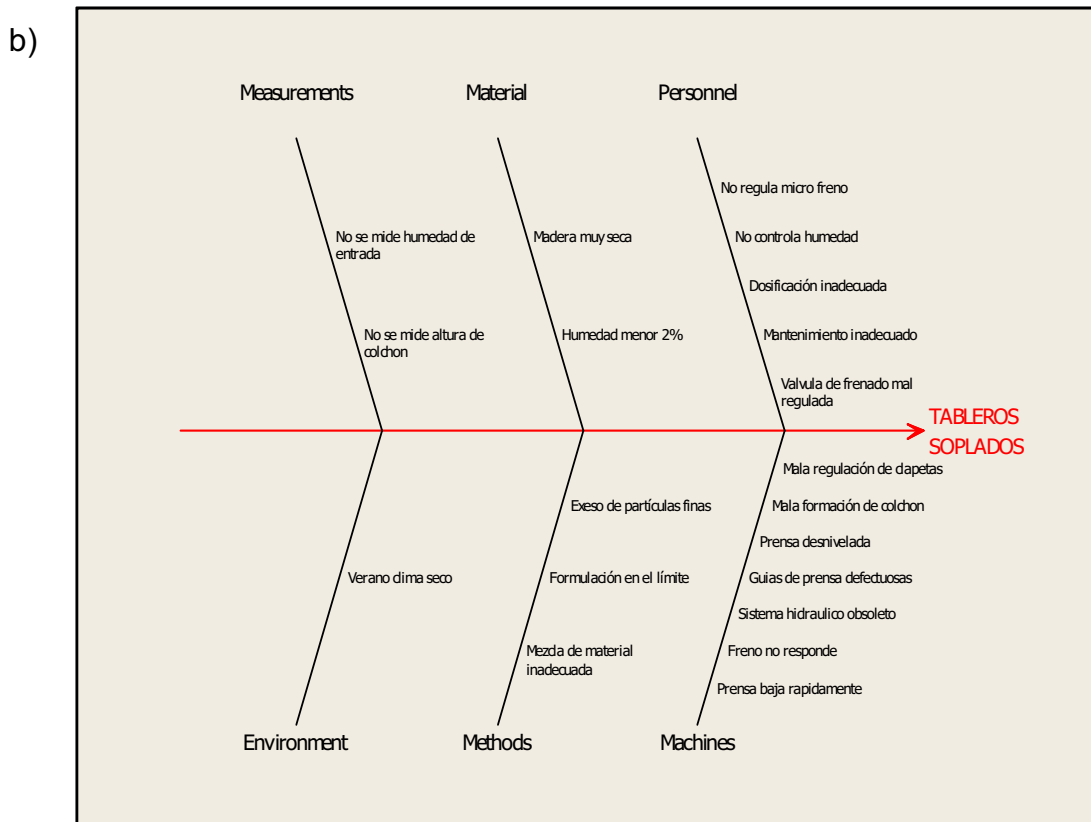
**Test 1.** Un punto con más de 3 desviaciones estándar de la media. Se observa como causa especial el dato de las semana 6.

**Test 2.** 9 puntos seguidos en el mismo lado de la media. Se observa como causa especial el dato de la semana 22.

De los análisis estadísticos de los defectos de tableros flojos, soplados, y reventados, se pudo concluir que su variabilidad es debido a causas especiales, las mismas que debían ser determinadas y eliminadas.

Se procedió a realizar el diagrama Causa – Efecto de la Figura 3.9, del mismo se determinó que los tableros flojos, soplados y reventados, se debían a las variaciones de la humedad del material con que salía del proceso de secado e ingresaba al proceso de encolado.





**Figuras 3.9** Diagramas Causa – Efecto de tableros desclasificados por defectos: a) flojos, b) soplados y c) reventados.

Durante la ejecución de los diagramas Causa- Efecto, realizados con el personal de producción y mantenimiento, se pudo observar que en los tres diagramas está presente la causa humedad del material.

Se procedió a utilizar la herramienta de los Cinco Por Qué.

Defecto de tableros soplados:

- a) Por qué se producen los tableros soplados?  
Porque cuando baja la prensa se crean corrientes de aire que escapa por los contornos de la prensa y arrastra las partículas finas.
- b) Por qué las corrientes de aire al bajar la prensa arrastran las partículas finas?  
Porque las partículas finas secas se mueven fácilmente con las corrientes de aire.
- c) Por qué se arrastran fácilmente las partículas de material fino?  
Porque no están bien adheridas al colchón.
- d) Por qué no están bien adheridas al colchón?  
Porque no tienen la cantidad suficiente de resina.
- e) Por qué no tienen la suficiente cantidad de resina?  
Porque las partículas al estar muy secas, requieren más resina de lo normal para compensar la falta de humedad inicial.

Defecto de tableros reventados:

- a) Por qué se producen los tableros reventados?  
Porque cuando se levanta la prensa se abren los tableros.
- b) Por qué se abren los tableros al abrirse la prensa?  
Porque el exceso de vapor de las partículas gruesas queda atrapado en el interior del tablero.
- c) Por qué existe exceso de vapor en las partículas gruesas?
- d) Por qué las partículas gruesas tienen mucha humedad.



Defecto tableros flojos:

a) Por qué se producen los tableros flojos?

Porque los tableros no tienen las características de tracción y ruptura adecuadas.

b) Por qué los tableros no tienen las características de tracción y ruptura adecuadas?

Porque la resina no ha tenido un curado adecuado.

c) Por qué la resina no ha tenido un curado adecuado?

Porque el material encolado no tiene una humedad adecuada en el proceso de prensado.

d) Por qué el material encolado no tiene una humedad adecuada en el proceso de prensado?

Porque el material a la salida del proceso de secado no tiene la humedad adecuada.

Por medio de la herramienta de los Cinco Por Qué, se determinó:

Si el material ingresa muy seco, los tableros salen con el defecto de tablero soplado, defecto que se produce en el subproceso de prensado, al momento de bajar la prensa sobre un colchón formado, el aire que escapa al bajar la prensa, arrastra las partículas de material fino de la superficie del colchón. Para corregir este error, para cuando la humedad a la salida del secadero desciende del 1.5%, se acostumbra incrementar el factor de encolado de 71 a 73 kg/m<sup>3</sup>.

Si el material que sale del proceso de secado es muy húmedo, en el proceso de prensado produce el defecto de tableros reventados, el exceso de agua en las partículas especialmente en la capa intermedia, crean una alta cantidad de vapor durante el proceso de prensado, vapor que al no tener por donde escapar, produce que el tablero reviente al momento de levantar la prensa. Para corregir este defecto, cuando la humedad del material a la salida del secadero supera el 4%, se acostumbra incrementar el ciclo de presado de 154 a 169 Segundos por ciclo en el espesor de 15mm.

Si la humedad no es la adecuada, el proceso de transferencia de calor hacia la capa intermedia en el proceso de prensado es lento, produce que la resina de las capas exteriores se solidifique antes que la resina de la capa interior, provocando un mal curado de la resina de la capa interior, y se produce el defecto de tablero flojo.

Del análisis del Diagrama de Pareto, gráficos de control de los defectos, diagrama Causa-Efecto de tableros flojos, soplados y reventados, del uso de la herramienta de los Cinco Por Qué, se determinó que en el proceso de secado, la característica crítica del proceso es la humedad del material. La función básica del proceso de secado es secar y clasificar astillas. Analizando los volúmenes de producción y el plan de calidad del proceso de aglomerado que determina que la humedad del material a la salida del proceso de secado debe ser entre 2,5% y 3,5%, se concluyó con el siguiente objetivo de mejora:

**El proceso de secado debe producir material seco en un rango de humedad entre 2,5% y 3,5% en una cantidad suficiente de 5 760 kg/hora.**

### **3.2.2 IDENTIFICAR LAS CARACTERÍSTICAS CRÍTICAS**

De los diagramas causa-efecto, se determinó que la característica crítica del proceso de secado es la humedad con la que sale el material, cuando la humedad no estaba dentro de los rangos establecidos se producían tableros defectuosos: flojos, reventados y soplados. Esta característica crítica se conoce como “CTS” (Critical To Satisfaction). Siendo esta CTS atributo de la “Voz del Cliente” que determina los parámetros de satisfacción del cliente del proceso de secado y que están definidos en el plan de calidad de los procesos de encolado y prensado. Esta CTS se despliega en parámetros de desempeño del producto, que son las CTY (Critical To Product). Las CTS son función de las CTY.

$$\text{CTS}=\text{f}(\text{CTY})$$

Las CTY son el conjunto de elementos y parámetros del producto que afectan de manera significativa las CTS aplicables al mismo, las cuales típicamente son:

- CTQ Critical To Quality: CTY que afecta significativamente a una o más CTS relativas a calidad.
- CTC Critical To Cost: CTY que afecta significativamente a una o más CTS en términos de costo.
- CTD Critical To Delivery: CTY que afecta significativamente a una o más CTS en términos de entrega.

Las características CTX (Critical To Process) son el conjunto de elementos y parámetros del proceso que afectan de manera significativa las CTY aplicables al mismo.

Las CTY son función de las CTX.  $CTY = f(CTX)$ .

Siguiendo la metodología Six Sigma, se procedió a elaborar el CT Flowdown que es el despliegue simplificado de las características críticas para la satisfacción del cliente, asociándolas a parámetros clave de un determinado producto y sus respectivos procesos.

En el árbol CTS del producto de la Tabla 3.1, se despliega y prioriza los atributos clave para el cliente del proceso de encolado y prensado.

Las CTS constituyen cantidades de material seco requeridas a tiempo con la calidad adecuada.

En la matriz CTY de la Tabla 3.2, se asocia las CTS prioritarias a las características críticas del producto.

Las CTY's constituyen las propiedades físicas mecánicas asociadas al material de salida (producto) como resultado del proceso de secado. Se seleccionaron:

Apariencia, rango adecuado de humedad, temperatura del material, de las cuales la más relevante es el rango de humedad del material

**TABLA 3.1** Árbol CTS

		IIC	GNC	PRIORIDAD
CTS's	HUMEDAD	9 •	3 o	27
	GRANULOMETRÍA	3 o	3 o	9
	CANTIDAD DE MATERIAL	9 •	3 o	27
	TIPO DE MATERIAL	3 Δ	1 Δ	3
	COSTO	3 o	3 o	9

IIC: Índice de Importancia para el cliente

GNC: Grado de No-Conformidad

PRIORIDAD= IICxGNC

En la matriz CTX de la Tabla 3.3, se asocia las CTY prioritarias a las operaciones críticas del proceso de encolado. Las CTX constituyen los parámetros de las operaciones críticas del proceso.

Del esquema conceptual CT Flowdown se concluyó que las operaciones críticas CTX del proceso de secado son: operación de control de humedad con la que ingresa el material, control de temperatura de salida del secadero, control de temperatura de entrada del secadero y operación de control de cantidad de material de ingreso.

### 3.2.3 DEFINIR PARÁMETROS DE DESEMPEÑO

Se determinó que el proceso de secado debe producir 5760 kg/hora de material con una granulometría adecuada y humedad entre 2.5% y 3.5%. Por medio del PLC instalado en el proceso de secado, se midió con un periodo de medición de 2 minutos la humedad del material a la salida del proceso de secado, este dato es almacenado en el computador del control del secadero, semanalmente se realizó el análisis estadístico por medio del programa MINITAB.

**Tabla 3.2** Matriz CTY.

		CTS's seleccionadas		
		HUMEDAD	CANTIDAD	PRIORIDAD CTY
CTY's		27	27	
	APARIENCIA	1 Δ		27
	RANGO ADECUADO DE HUMEDAD	9 •		243
	TEMPERATURA DEL MATERIAL	3 o		81
	RENDIMIENTO ESTIMADO		3 O	81
	%CUMPLIMIENTO ABASTO		9 •	243
	ALIMENTACIÓN UNIFORME		9 •	243

Grado de relación de las CTY sobre la CTS

1	Δ	Débil
3	O	Media
9	•	Fuerte

PRIORIDAD CTY = Suma de los productos (R x PRIORIDAD CTS)

Se seleccionó como indicadores de desempeño los siguientes:

- Volumen de tableros desclasificados por los defectos sopladados, flojos y reventados. Su revisión es semanal, el mismo tiene un valor promedio de 0.6 metros cúbicos por semana durante las semanas 1 a 24 del año 2009.

**Tabla 3.3** Matriz CTX

CTY's seleccionadas

		APARIENCIA	RANGO ADEC	TEMP MAT	PRIORIDAD CTX
		27	243	81	
CTX's	Control temperatura a la salida	3 O	9 •	3 o	2511
	Control temperatura en ingreso	3 O	9 •	3 o	2511
	Control de cantidad de material que ingresa	1 Δ	9 •	3 o	2457
	Control de dosificación pino/eucalipto	1 Δ	9 •	1 Δ	2295
	Control de combustión polvo	1 Δ	3 o	1 Δ	837
	Control de tipo de material	3 O	3 o	1 Δ	891
	Control de granulometría de material	3 O	9 •	3 o	2511
	Control de humedad de ingreso del material	1 Δ	9 •	9 •	2943
	Medio ambiente	1 Δ	1 Δ	1 Δ	351

Grado de relación de las CTX sobre la CTY

1	Δ	Débil
3	O	Media
9	•	Fuerte

PRIORIDAD CTX = Suma de los productos (R x PRIORIDAD CTY)

### **3.2.4 FORMALIZAR EL PROYECTO DE MEJORA**

#### **Project charter**

Mejoramiento del proceso de secado de viruta para la fabricación de tableros aglomerados en la Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. con la aplicación de la metodología Six Sigma.

#### **Justificación del Proyecto**

La globalización y los constantes cambios tecnológicos han obligado que las empresas optimicen sus procesos como único medio de supervivencia en un mundo altamente competitivo.

La utilización de herramientas estadísticas y en especial el uso de la metodología Six Sigma permiten identificar las principales variables del proceso, determinar las causas de su variabilidad, administrar las causas especiales del proceso, recomendar acciones tendientes a disminuir los rangos de variación de estas variables y poder optimizar el proceso en base a trasladar las especificaciones de los productos a rangos de mayor rentabilidad sin afectar las especificaciones de calidad de los mismos y disminuyendo notablemente la cantidad de productos no conformes.

#### **3.2.4.1 Objetivo General**

Mejorar la capacidad del proceso de secado de viruta para la fabricación de tableros aglomerados en la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A., aplicando la metodología Six Sigma.

### **3.2.4.2 Objetivos Específicos**

Para poder alcanzar el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el proceso de elaboración de tableros aglomerados en la parte concerniente al secado de viruta.
- Identificar las características críticas del proceso.
- Definir los parámetros de desempeño.
- Determinar la estabilidad y capacidad del proceso.
- Determinar indicadores.
- A partir del análisis de los resultados, determinar las causas de variabilidad del proceso, determinar las causas especiales del proceso y recomendar acciones tendientes a mejorar el proceso de secado.
- Proponer el diseño de un experimento de Ingeniería Robusta tendiente a mejorar la capacidad del proceso de secado.
- Justificar posibles modificaciones al actual proceso en caso de ser necesarios.
- Implementar mejoras y analizar resultados.

### **Necesidades del negocio**

La principal necesidad que promueve este proyecto es la reducir las pérdidas a través de aplicar todos los conocimientos adquiridos por el personal del proceso.

### **Plan estratégico**

La estrategia es formar un equipo de personas conformado por personal de producción, personal de mantenimiento y un experto en Seis Sigma, con reuniones semanales en las cuales se analiza las causas raíz de los defectos generados en los tableros de aglomerado y se busca maneras de eliminarlas.



Con el presente proyecto se identifican las causas potenciales de la variabilidad del proceso. Se realiza el diseño de un experimento de Ingeniería Robusta. Se determinarán los factores de ruido y los factores de control. Con los resultados se diseña un experimento confirmatorio tendiente a disminuir la variabilidad del proceso, incrementar el valor medio de la humedad de las virutas de madera sin salirse del rango de las especificaciones, disminuir los costos de producción y por ende contribuir al mejoramiento del proceso.

### **Requerimientos a satisfacer**

El proyecto se desarrolla durante las actividades de producción con un equipo de seis personas. El proyecto está dirigido por el coordinador que es un Green Belt de Seis Sigma. La dedicación mínima es de 2 horas semanales en reuniones con un total de 30 horas por cada integrante del equipo.

### **Partes implicadas en el proyecto**

Clientes: Departamento de producción de la línea de aglomerados

Equipo: Miembros de producción y mantenimiento

### **Recursos Humanos**

El equipo de personas que conforman el presente proyecto se denomina EMAC (Equipo de Mejora Continua), está conformado por:

- Efrén Barbosa, Ingeniero Eléctrico, Jefe de mantenimiento eléctrico
- Wilson Chancúsig, Ingeniero Mecánico, Jefe de mantenimiento mecánico
- Mario Toaquiza, Supervisor de producción de aglomerado
- Milton Yanez, Supervisor mecánico
- Luis Llano, Operador de producción prensas
- Oswaldo Veloz, Operador de producción secado

## **Metodologías de procedimiento**

La metodología se basa en reuniones semanales de 2 horas, en la cual se aplica la metodología Six Sigma. Dichas reuniones son coordinadas por el líder del equipo. En cada reunión se emiten tareas con sus debidos responsables y fechas de cumplimiento.

## **Presupuesto inicial**

El presupuesto estipulado es de US\$7 700 desglosados de la siguiente manera:

- Reuniones, US\$1 500
- Pérdidas de producción para toma de datos, experimento de ingeniería robusta, US\$5 000
- Materiales de oficina, US\$200
- Elaboración de la monografía del proyecto, US\$1 000

## **Retorno de la inversión**

Si se cuantifica el ahorro obtenido durante un año como resultado de la disminución de tableros desclasificados de 2,32% a 1,64%, con una producción mensual de 3 200m<sup>3</sup> a un valor de venta de \$220/m<sup>3</sup>, este incremento de productividad representa un incremento efectivo de producción de 0,68% equivalente a 21,76 m<sup>3</sup> mensuales con un costo de \$4 787,00, o un valor promedio anual de \$57 446,40. La inversión realizada se recupera en menos de dos meses.

## **Criterio de aceptación del producto**

El rango de contenido de humedad del material a la salida del proceso de secado debe ser de 2,5% a 3,5%.

**Entregables del proyecto.** Memoria con todos los resultados obtenidos.

**Limitaciones del proyecto.** Disponibilidad al 100% de la presencia de los miembros del equipo.

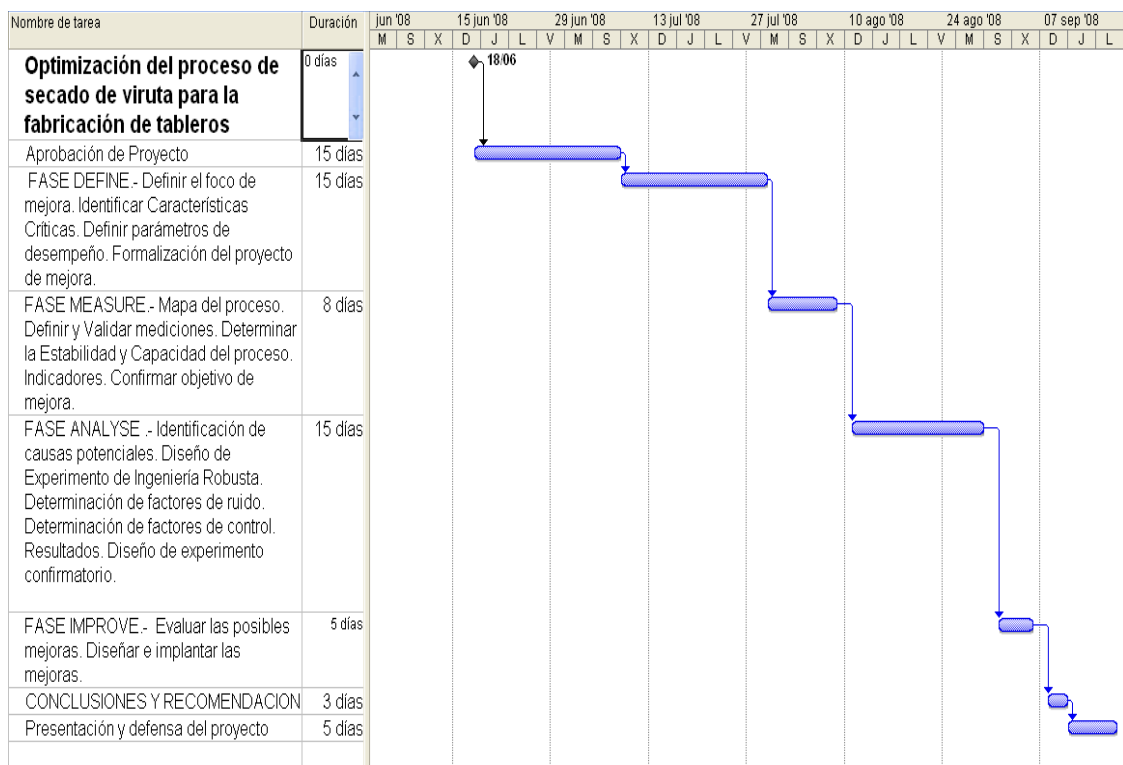
**Supuestos del proyecto.** Todos los miembros del equipo de trabajo disponen de los conocimientos necesarios para llevar a cabo el desarrollo del proyecto.

### Identificación de riesgos

- Desviación excesiva de las horas planificadas hasta llegar a un consenso general sobre temas planificados.
- Mala comunicación entre los integrantes del equipo.
- Incumplimiento de tareas asignadas.
- Pérdida de información vital del proyecto.
- Error en la toma de datos.

### Calendario

Se muestra en la Figura 3.10



**Figura 3.10** Calendario del proyecto.

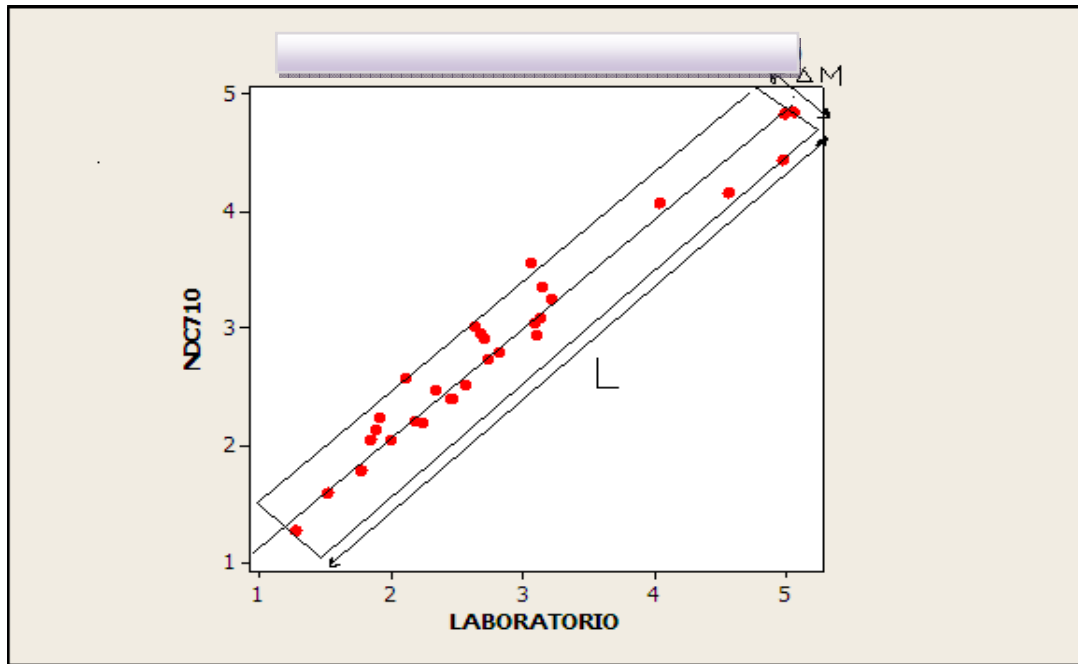
### 3.3 FASE MEDIR

En esta etapa se analizó y validó el instrumento de medición de la variable de salida del proceso de secado.

Se determinó que la salida del proceso de secado constituye material seco con una humedad en el rango de 2,5% a 3,5% con una granulometría controlada. Este dato es almacenado por medio de un PLC con un periodo de medición de 2 minutos. Para validar los datos a medir, se analizó la reproductividad y repetitividad del sistema de medición utilizado, para lo cual se realizó el Isoplot (Shainin) mostrado en la Figura 3.10; los datos de contrastación se muestran en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Datos de contrastación de equipo NDC MM710 – LAB-MEMMERT

3	NDCMM710	Laboratorio	No. Medición	NDCMM710	Laboratorio
1	1,6	1,52	16	1,787	1,77
2	2,05	1,85	17	2,245	1,91
3	2,15	1,88	18	2,41	2,47
4	2,48	2,34	19	4,157	4,55
5	2,58	2,11	20	2,05	2
6	2,92	2,71	21	3,05	3,09
7	2,96	2,68	22	3,25	3,22
8	3,02	2,64	23	2,8	2,82
9	3,36	3,14	24	2,75	2,73
10	3,57	3,06	25	2,52	2,57
11	4,08	4,03	26	2,2	2,24
12	4,44	4,97	27	2,41	2,45
13	4,83	4,98	28	3,1	3,13
14	4,85	5,05	29	2,95	3,1
15	1,283	1,28	30	2,22	2,18



**Figura 3.11** Gráfico Isoplot de sistema de medición NDCMM710 vs equipo de laboratorio.

Se observó que el área graficada en la Figura 3.10 contiene el 95% de los puntos de las mediciones realizadas,  $\Delta M$  representa el error de medición y  $L$  es igual al rango del instrumento.

$$\text{Criterio de Aceptacion} = \frac{L}{\Delta M} \geq 8,5$$

La relación de nivel de aceptación  $L/\Delta M = 8,8/1 = 8,8$  es mayor o igual que 8,5 que es el criterio de aceptación de esta herramienta. Por consiguiente, se concluyó que el sistema de medición tiene error pequeño con relación a la variabilidad de la magnitud que se estaba midiendo.

Con la ayuda de la estadística descriptiva, se deseaba responder a las siguientes preguntas:

- ¿Existen causas especiales de variación que actúan sobre el proceso, o está bajo el efecto apenas de sus causas naturales?
- ¿El proceso, una vez que esté libre de las causas especiales, es capaz de cumplir a la tolerancia especificada?

En el anexo digital D se muestran los datos de humedad del material a la salida del secadero que fueron obtenidos con el sistema de medición NDC MM710 durante los días 20 al 28 de mayo del 2009, con un periodo de medición de 2 minutos. Con la ayuda del programa MINITAB se realizó el análisis de los mismos, los resultados se muestran en la Figura 3.12. Se escogieron como límites de especificación del proceso LSL=2,5% y USL=3,5%, siendo estos valores las especificaciones del plan de calidad del proceso y que fueron obtenidos del proceso VOC.

### 3.4 FASE ANALIZAR

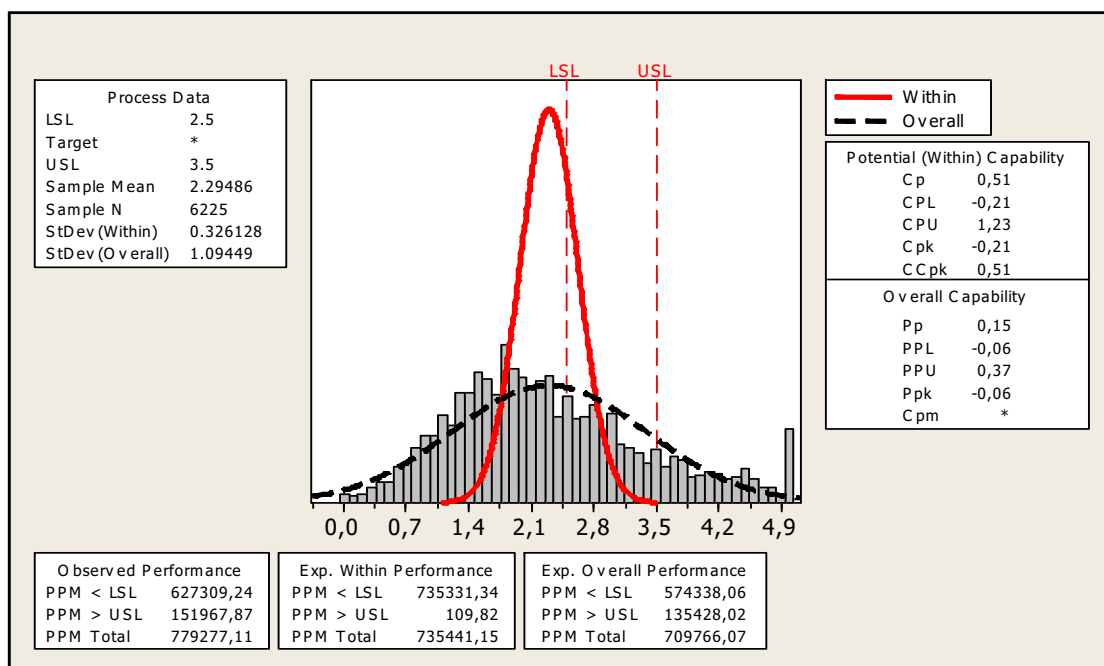
Se partió del principio de que atrás de todo efecto existen causas, en la Fase Analizar, el objetivo principal fue identificar las causas primarias del problema.

El análisis de Capacidad del proceso CP, es la comparación entre la tolerancia especificada y la variabilidad del proceso, para este caso, en la Figura 3.12 se muestra el análisis de capacidad del proceso.

Se observó que el proceso con 6 225 muestras cumple con una distribución normal, el valor medio de la humedad del material es de 2,29%, el valor de la desviación estándar es de 0,326. El promedio de las muestras están fuera del rango de especificación. Las PPM fuera de rango de especificaciones son 779 277,11, lo que equivale a que solo el 22% de las muestras están dentro del rango de humedad requerido, un rendimiento del proceso muy bajo.

Se calculó la capacidad del proceso Cp:

$$CP = \frac{3.5 - 2.5}{6(0.326128)} = 0,51 \quad [3.1]$$



**Figura 3.12** Análisis de capacidad de proceso de la característica humedad del material a la salida del proceso de secado.

Mostró un valor bajo de 0,51, valor menor a 1, que implica una variación mayor que la tolerancia y por tanto se demostró que el proceso no es capaz. El Cp de la mayoría de los procesos empresariales está en el rango de 1 a 1,33. Un proceso Six Sigma tiene  $Cp=2$ . Valores que permitieron determinar la incapacidad del proceso que estaba en análisis.

El valor de Cpk capacidad real del proceso, para procesos con desplazamiento en dirección al límite inferior está dado por:

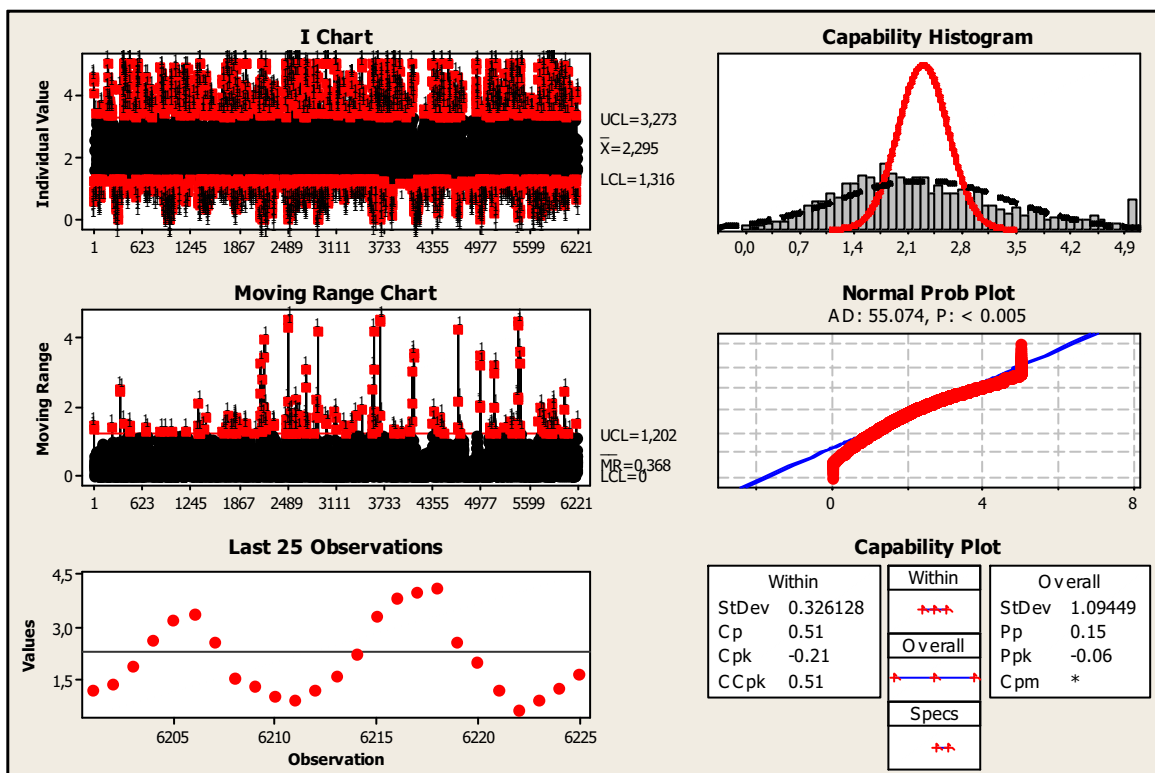
$$Cpk = \frac{2.29486 - 2.5}{3(0.326128)} = -0,21 \quad [3.2]$$

y permite determinar si hay holgura para cumplir las especificaciones, este tenía un valor de -0,21 que corresponde a un proceso incapaz ( $Cpk < 1$ ).

La justificación era sencilla, pues en vista de la alta variabilidad del proceso, los operadores del proceso de secado preferían sobre secar el material para cumplir las exigencias del límite superior de secado, con el respectivo incremento de los

costos de producción y la consecuente disminución de capacidad de secado. Las expectativas de mejora de este proceso son múltiples.

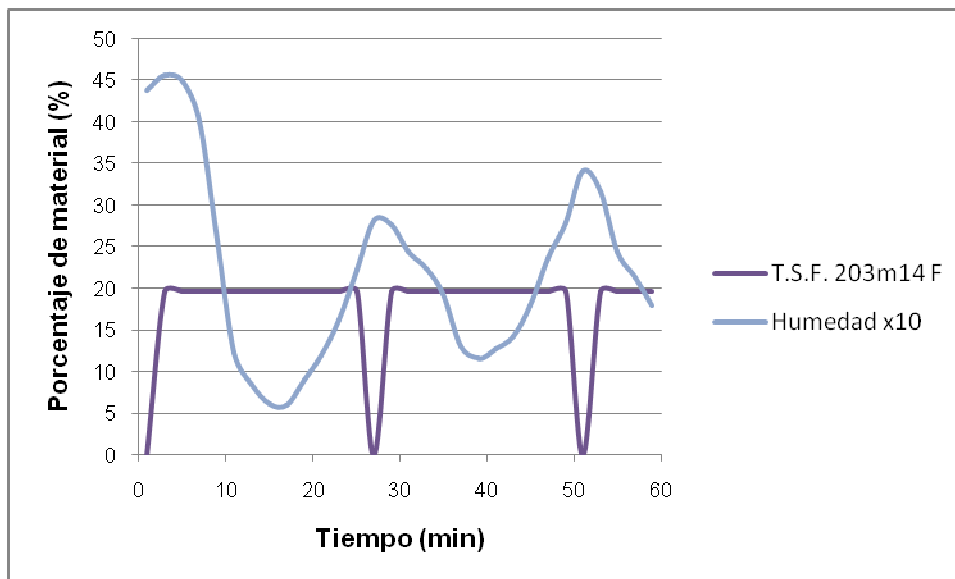
En el gráfico de la Figura 3.13 se puede observar el análisis Process Capability Sixpack of humedad, que permitió determinar que el proceso si tenía un comportamiento normal, el proceso presentaba por límites reales  $UCL=3,273$  y  $LCL=1,316$  con valor medio de  $2,295$ , comprobándose que el proceso estaba desplazado hacia el límite inferior.



**Figura 3.13** Análisis de comportamiento del proceso.

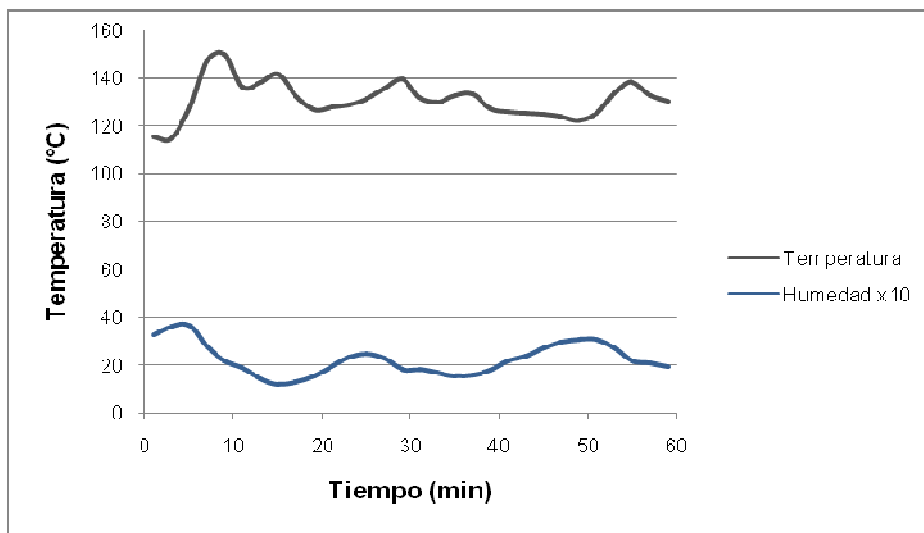
En la Figura 3.14 de las variables del proceso de secado en función del tiempo, medidos con un periodo de medición de dos minutos, se pudo observar que cuando se deja de ingresar material al secadero, manteniendo las otras variables constantes, la humedad del material a la salida se modifica.





**Figura 3.14** Variables Humedad y porcentaje de material de ingreso.

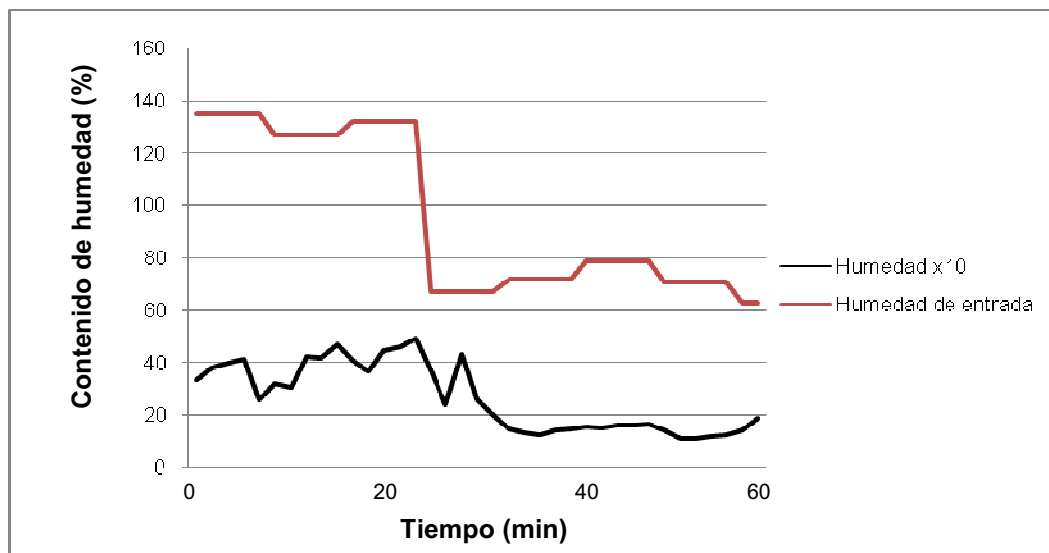
En la Figura 3.15 de las variables del proceso de secado en función del tiempo, medidos con un periodo de medición de dos minutos, se pudo observar que cuando se modifica la temperatura de la salida del secadero, manteniendo las otras variables constantes, la humedad del material a la salida se modifica.



**Figura 3.15** Variables humedad y temperatura del secadero.

En la Figura 3.16 de las variables del proceso de secado en función del tiempo, medidos con un periodo de medición de dos minutos, se pudo observar que

cuando se modifica la humedad del material de ingreso al secadero, manteniendo las otras variables constantes, la humedad del material a la salida se modifica.



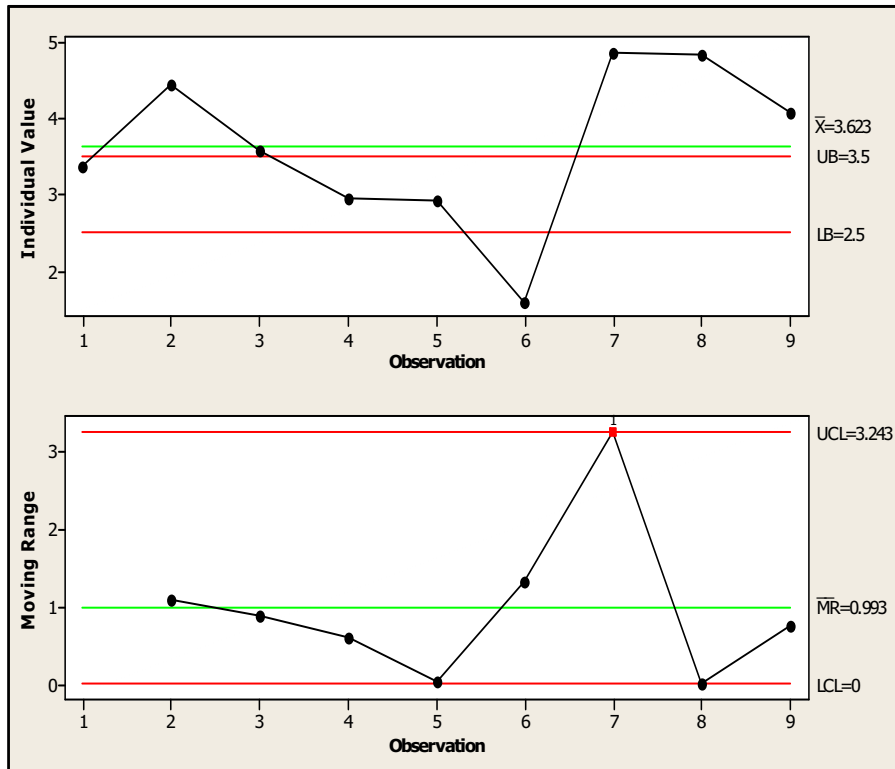
**Figura 3.16** Humedad de entrada y de salida del material.

De las gráficas anteriores se concluyó que la humedad del material a la salida del secadero depende de: temperatura del secadero, cantidad de material de ingreso al secadero, humedad de ingreso del material.

Con la finalidad de conocer más sobre el proceso de secado, con fecha 23 de marzo del 2009 se realizó un experimento en el secadero, las diversas variables son: humedad del material de entrada al secadero: madera fresca con 120% de humedad y madera seca con 70% de humedad. Se procedió a pasar únicamente madera seca, luego solo madera húmeda y se observó el comportamiento de los otros parámetros.

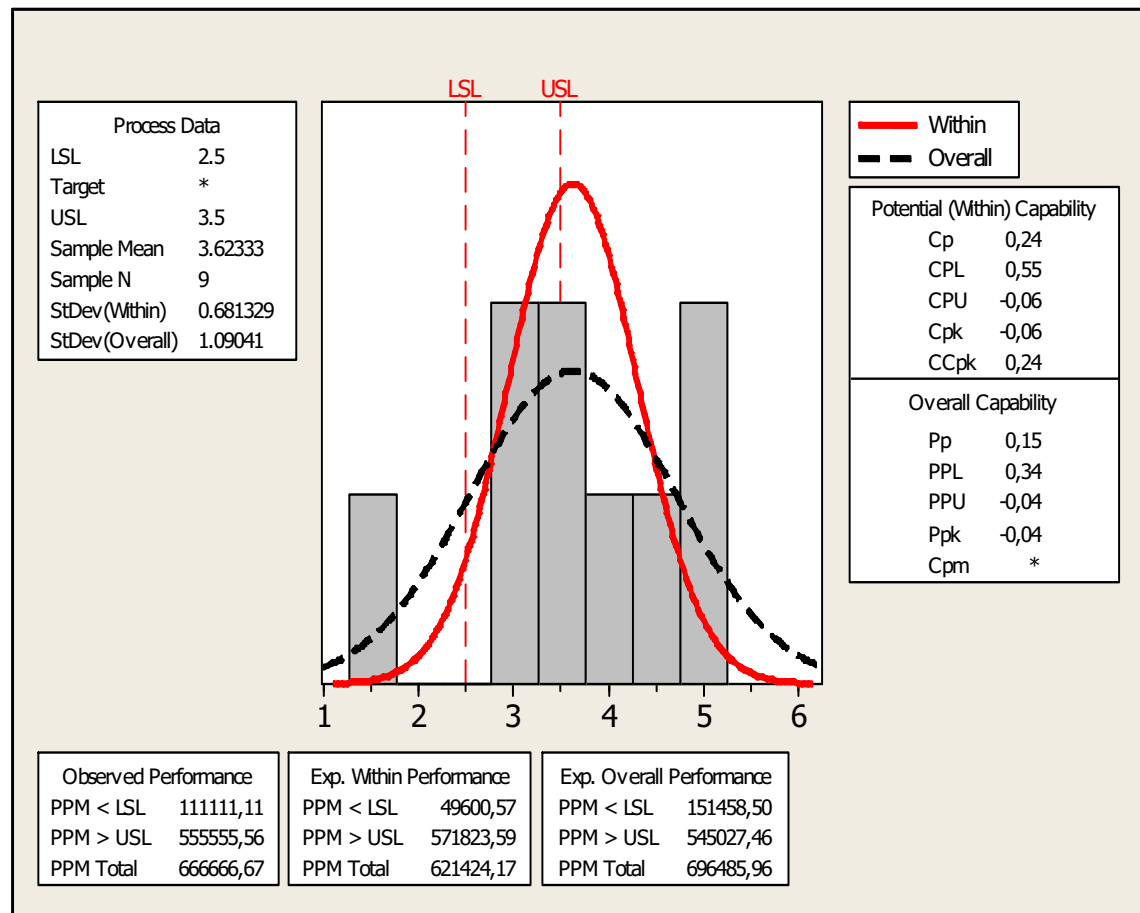
En la Figura 3.17 se muestra el Gráfico I-MR de control de la variable humedad del material a la salida del secadero, para las condiciones de: madera de ingreso fresca (120% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 420°C, temperatura a la salida del secadero 108°C, porcentaje de paso de material 40%. Su análisis estadístico de Test de causas especiales muestra que:

**Test 1.** Un punto con más de 3 desviaciones estándar de la media. Se observa como causa especial el dato 7.



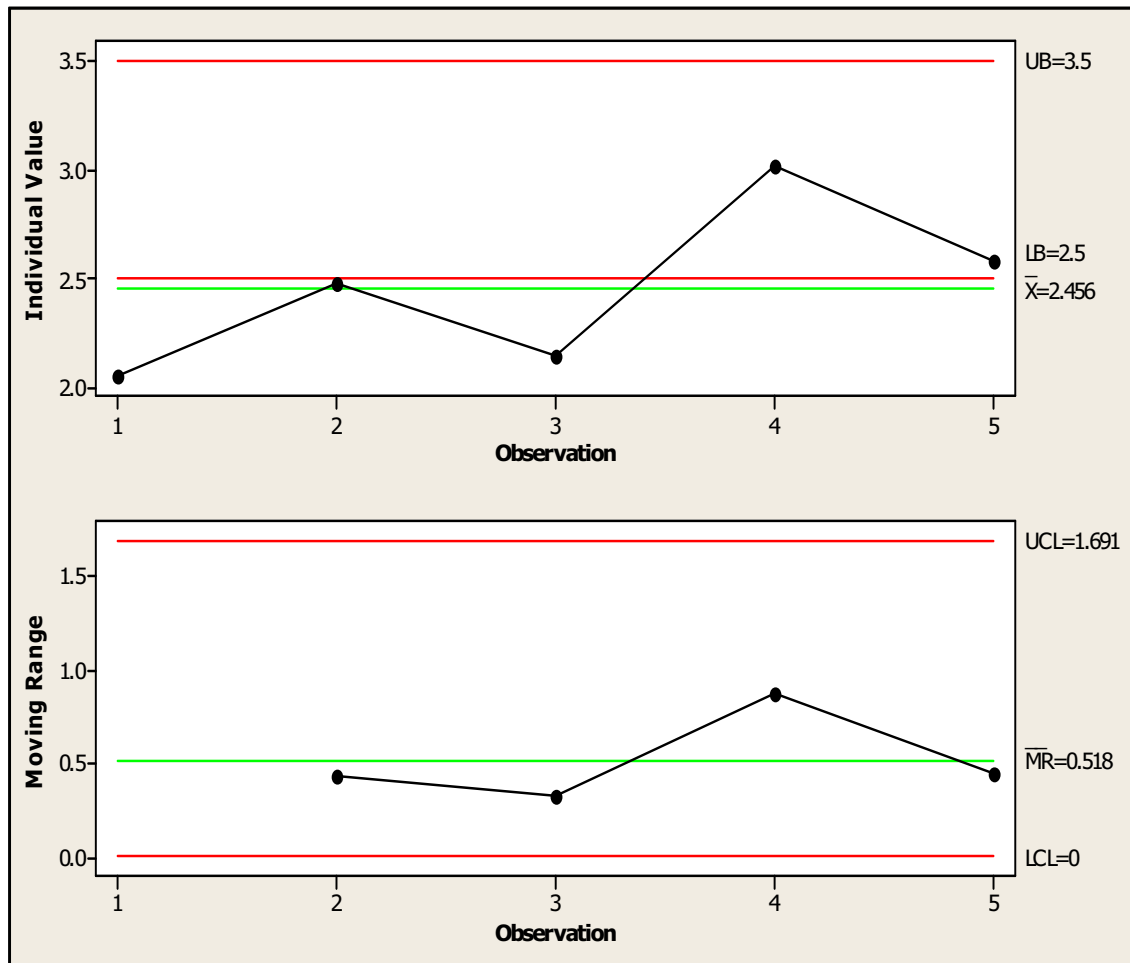
**Figura 3.17** Grafico I-MR de control de la variable humedad del material la salida del secadero para las condiciones de: madera de ingreso fresca (120% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 420°C, temperatura a la salida del secadero 108°C, porcentaje de paso de material 40%.

Así también para el mismo experimento, en la Figura 3.18 se muestra el análisis de capacidad del proceso, el mismo que presentó un valor de  $C_p = 0,24$ , valor inferior a 1. El valor de  $C_{pk}$  capacidad real del proceso tiene un valor negativo de -0,06.



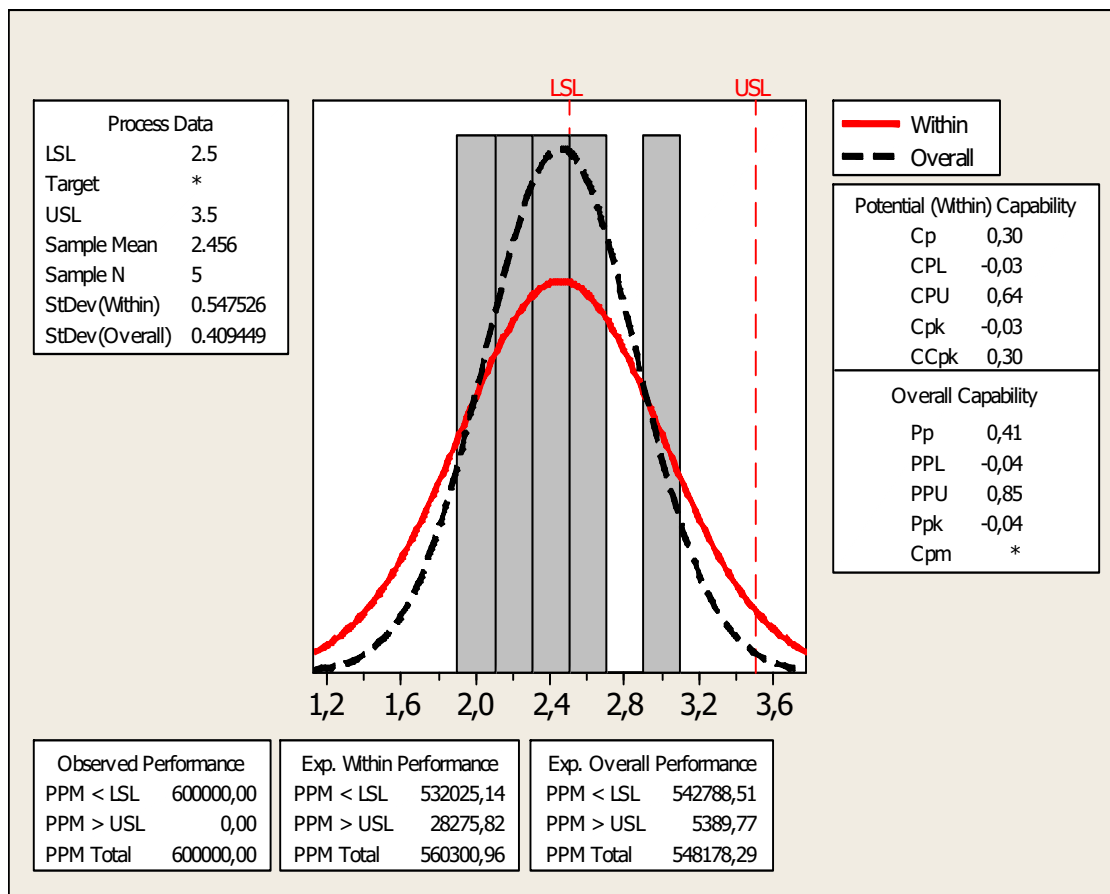
**Figura 3.18** Análisis de capacidad de proceso de la variable humedad del material a la salida del secadero con las condiciones de: madera de ingreso fresca (120% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 420°C, temperatura a la salida del secadero 108°C, porcentaje de paso de material 40%.

En la Figura 3.19 se muestra el Grafico I-MR de control de la variable humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de madera de ingreso seca (70% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 320°C, temperatura a la salida del secadero 98°C, porcentaje de paso de material 40%; su análisis estadístico de Test de causas especiales muestra que no existe ninguna causa especial.



**Figura 3.19** Grafico I-MR de control de la humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de: madera de ingreso seca (70% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 320°C, temperatura a la salida del secadero 98°C, porcentaje de paso de material 40%.

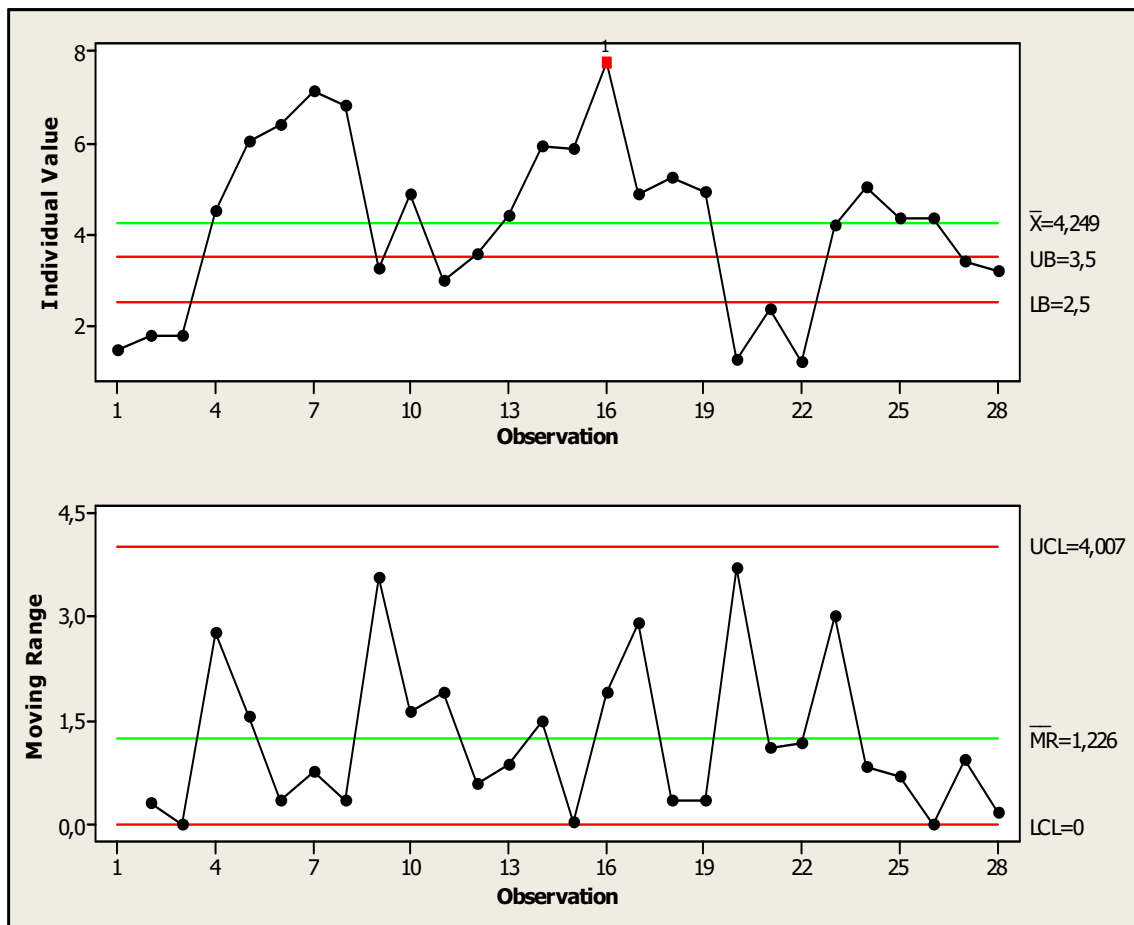
Así también para el mismo experimento, en la Figura 3.20 se muestra el análisis de capacidad del proceso, el mismo que presento un valor de  $C_p = 0,30$ , valor inferior a 1. El valor de  $C_{pk}$  capacidad real del proceso tiene un valor negativo de -0,03.



**Figura 3.20** Análisis de Capacidad de proceso de la variable humedad del material a la salida del secadero con las condiciones de: madera de ingreso seca (70% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 320°C, temperatura a la salida del secadero 98°C, porcentaje de paso de material 40%.

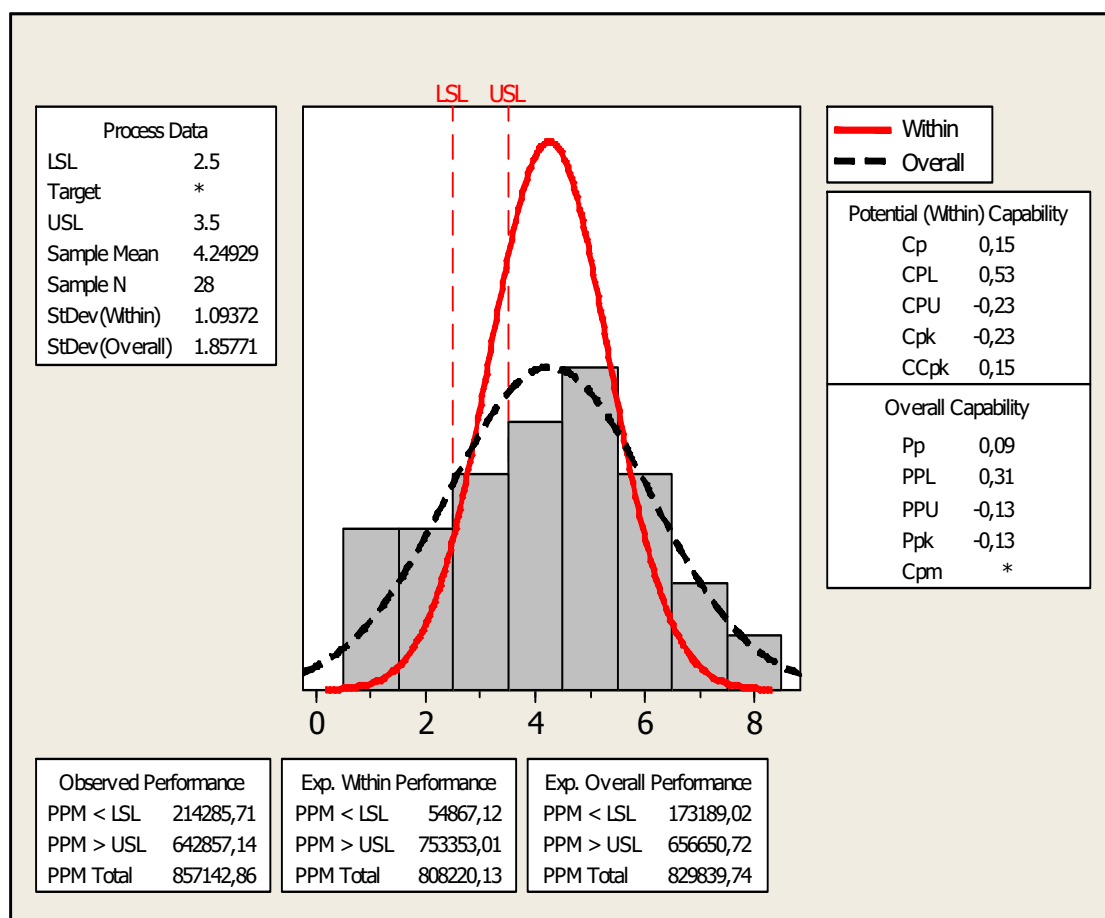
En la Figura 3.21, se muestra el Grafico I-MR de control de la humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de: madera de ingreso fresca (120% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 400°C, temperatura a la salida del secadero 110°C, porcentaje de paso de material 40%. Su análisis estadístico de test de causas especiales muestra que:

**Test 1.** Un punto con más de 3 desviaciones estándar de la media. Se observa como causa especial el dato 16.



**Figura 3.21** Grafico I-MR de control de la humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de madera de ingreso fresca (120% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 400°C, temperatura a la salida del secadero 110°C, porcentaje de paso de material 40%.

En la Figura 3.22, se muestra el análisis de capacidad del proceso de la humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de madera de ingreso fresca (120% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 400°C, temperatura a la salida del secadero 110°C, porcentaje de paso de material 40%. Su análisis de capacidad  $C_p = 0,15$ , valor inferior a 1. El valor de  $C_{pk}$  capacidad real del proceso tiene un valor negativo de -0,23.

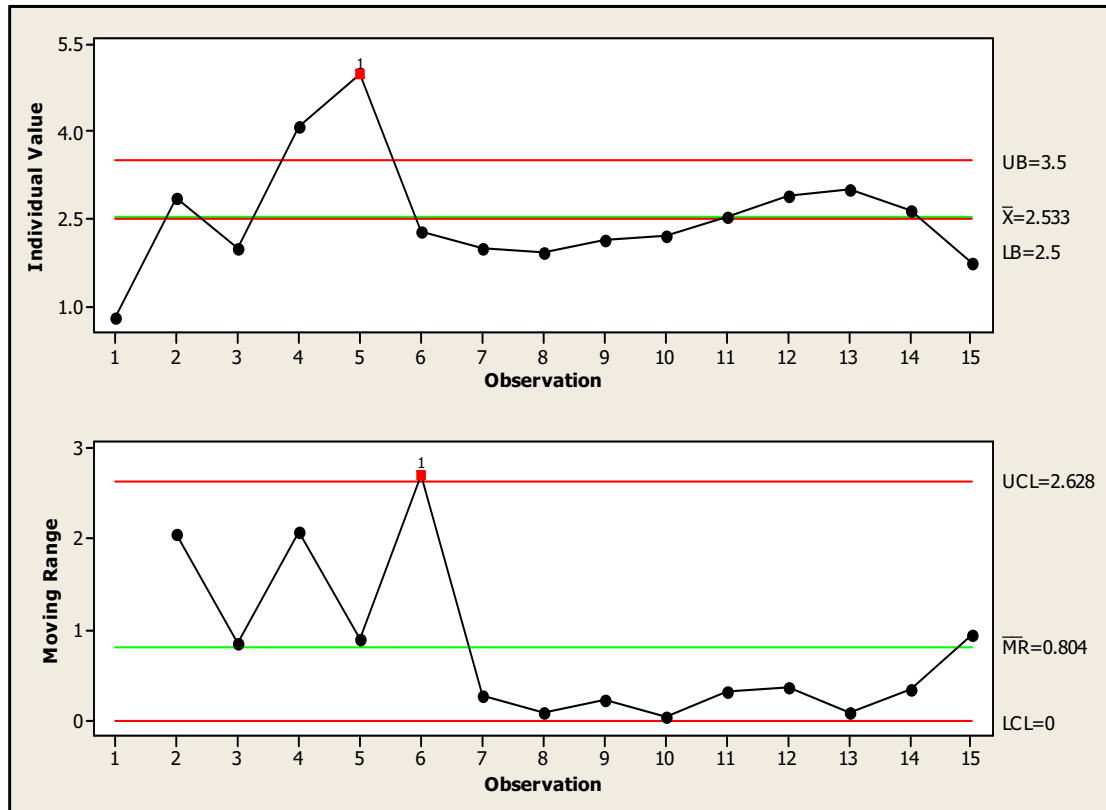


**Figura 3.22** Análisis de capacidad de proceso de la variable humedad del material a la salida del secadero con las condiciones de madera de ingreso fresca (120% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 400°C, temperatura a la salida del secadero 110°C, porcentaje de paso de material 40%.

En la Figura 3.23, se muestra el Grafico I-MR de control de la Humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de madera de ingreso seca (70% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 361°C, temperatura a la salida del secadero 100°C, porcentaje de paso de material 40%. Su análisis estadístico de test de causas especiales muestra que:

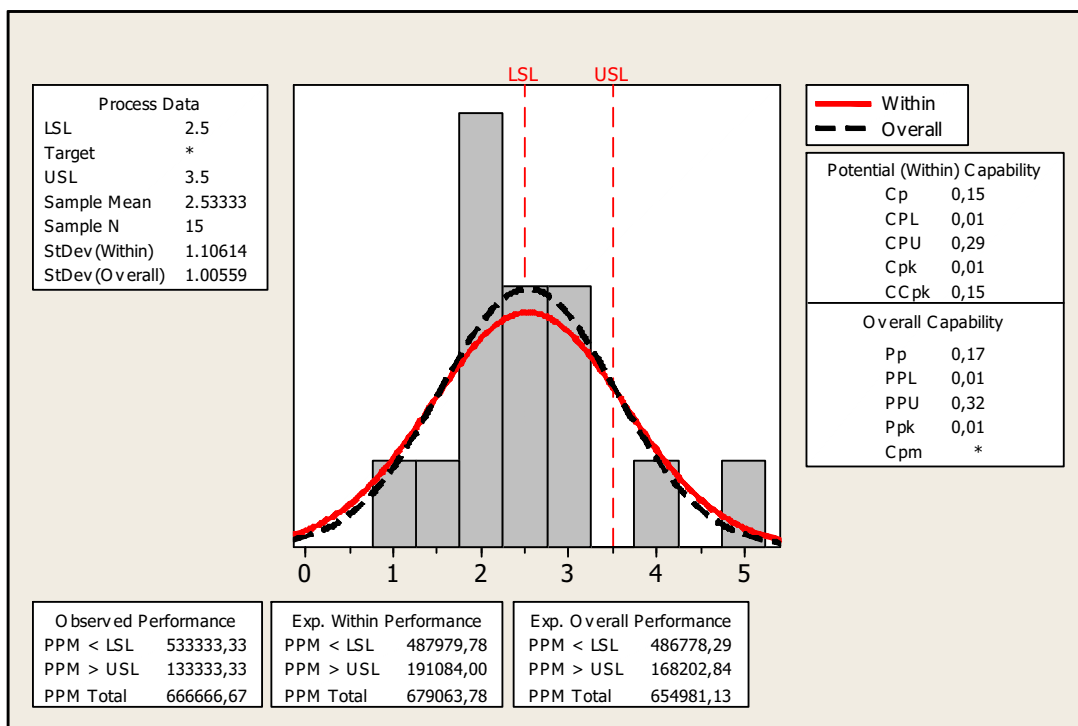
**Test 1.** Un punto con más de 3 desviaciones estándar de la media. Se observa como causa especial el dato 6.





**Figura 3.23** Grafico I-MR de control de la humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de: madera de ingreso seca (70% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 361°C, temperatura a la salida del secadero 100°C, porcentaje de paso de material 40%.

En la Figura 3.24 se muestra el análisis de capacidad del proceso de la humedad del material a la salida del secadero para las condiciones de: madera de ingreso seca 70% de humedad, temperatura a la entrada al secadero de 361°C, temperatura a la salida del secadero 100°C, porcentaje de paso de material 40%. Su análisis de capacidad  $C_p = 0,15$ , valor inferior a 1. El valor de  $C_{pk}$  Capacidad real del proceso tiene un valor positivo de 0,01.



**Figura 3.24** Análisis de capacidad de proceso de la variable humedad del material a la salida del secadero con las condiciones de: madera de ingreso seca (70% de humedad), temperatura a la entrada al secadero de 361°C, temperatura a la salida del secadero 100°C, porcentaje de paso de material 40%.

Del análisis anterior se concluyó:

El proceso de secado tiene una capacidad de proceso menor a  $C_p = 0,3$ , valor muy por debajo de un proceso Six Sigma que suele presentar una capacidad de proceso  $C_p = 2$ . El proceso presenta partes por millón ppm = 779 277 muestras fuera de rango, un valor muy superior a ppm = 3,4 de un proceso Six sigma o ppm = 66 807 de un proceso tres sigma. El nivel sigma del proceso es inferior a 1,5 sigma (ppm=500 000).

El sistema tiene una Capacidad real del proceso  $C_{pk} = -0,21$ , que equivale a un proceso incapaz ( $C_{pk} < 1$ ), el valor medio de las muestras  $\mu = 2,29\%$  está fuera del rango de especificaciones de 2,5% a 3,5%.

### 3.5 FASE MEJORAR

Durante las fases anteriores se determinó que la variable de salida del proceso de secado es la humedad del material de salida del secadero y la misma depende de las siguientes variables independientes de entrada: temperatura del proceso, cantidad de material de ingreso y la humedad del material que ingresa al secadero.

La variable temperatura del proceso es medida por medio de sensores tipo termoresistencias, ubicadas a la entrada y a la salida del tambor del secadero que se muestra en el sector 4 de la Figura 3.1. Existe un controlador tipo PID que regula la temperatura de salida entre 100°C y 150°C. El valor deseado se coloca de manera manual en función de si el operador desea mayor o menor temperatura según el material este más húmedo o menos húmedo. La temperatura de la entrada del tambor es manejada por un controlador tipo ON-OFF que permite el paso de material húmedo para valores de temperatura mayores a los 300°C y apaga el quemador que se observa en el sector 5 de la Figura 3.1 cuando se sobrepasa los 600°C. No existe un control que maneje simultáneamente las dos temperaturas, a pesar que la temperatura de salida depende proporcionalmente de la temperatura de la entrada.

Por medio de la herramienta tormenta de ideas realizada con los operadores y supervisores del secadero con la pregunta, ¿Por qué la humedad del material a la salida del secadero no es constante?, se obtuvieron las siguientes hipótesis:

- La cantidad de madera que ingresa al secadero está en función de los giros por minuto de los tornillos sin fin extractores, no existe una medida exacta de los kg por minuto que ingresan al secadero.
- Tampoco existe una realimentación automática de la humedad del material de la salida sobre el control de las variables de temperatura y cantidad de material que ingresa al secadero.

## **Desarrollo del experimento de ingeniería robusta**

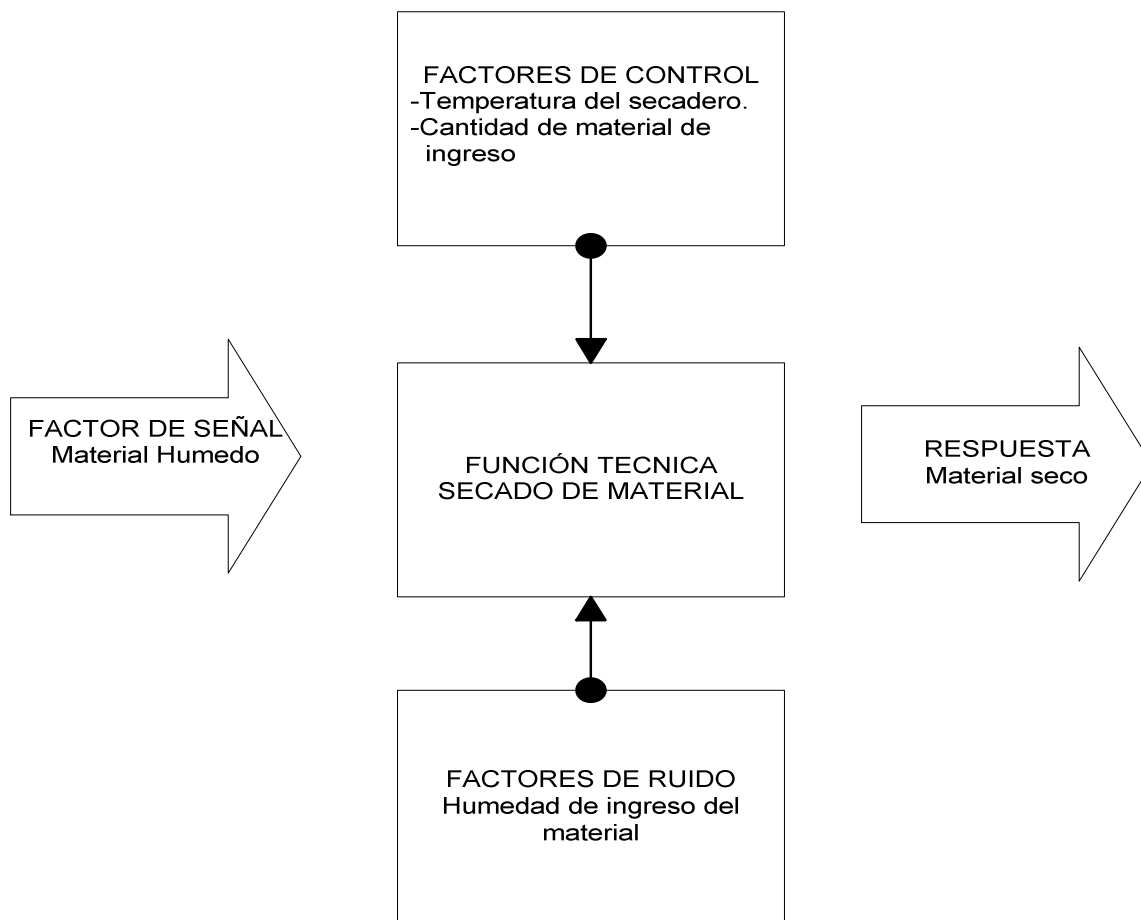
Una de las herramientas más utilizadas en las fases de análisis y mejora constituye los diseños de experimentos (DOE) que proporcionan un método para investigar simultáneamente los efectos de múltiples variables en una variable de salida (respuesta). Estos experimentos consisten en una serie de corridas, o pruebas, en las que se hacen cambios intencionados a las variables de entrada o factores y en cada ejecución se recopilan datos. Los DOE sirven para identificar las condiciones de los procesos y los componentes de productos que influyen en la calidad, y luego determinan la configuración de la variable de entrada (factor) que maximiza los resultados.

Existen cuatro tipos de experimentos diseñados: factorial, de superficie de respuesta, de mezcla y de Taguchi (robusto).

La ingeniería robusta es una metodología cuyo objetivo es optimizar económicamente el desempeño funcional de un producto, volviéndolo mínimamente sensible (robusto) a los factores que causan variabilidad en la fabricación y en el uso.

En la Ingeniería Robusta, el primer paso es reducir la variabilidad, por la elección correcta del nivel de cada factor de control. Después se realiza el reajuste de la media para el valor ideal. A esto se denomina estrategia de optimización en dos etapas.

En la etapa inicial de la fase del presente Proyecto, se definieron los objetivos que constituyen, mejorar la capacidad del proceso de secado de viruta para la fabricación de tableros aglomerados en la Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. aplicando la metodología Six Sigma. Se definió el foco o alcance el proceso de secado. Se definió el equipo liderado por el equipo investigador y la participación del personal operativo. Se recolectaron los datos y se calcularon datos como medias, variabilidad e índices de capacidad inicial para comparación posterior.



**Figura 3.25** Modelo del sistema de Secado de Material.

Se procedió a definir la función básica del sistema: secar material.

En la Figura 3.25 se muestra el modelo del sistema. La variable de salida del proceso de secado es la humedad con la que sale el material del secadero. Por medio de las herramientas Six Sigma y del esquema conceptual CT Flowdown se concluyó que las operaciones críticas CTX del proceso de secado son: operación de control de humedad con la que ingresa el material, control de temperatura de salida del secadero, control de temperatura de entrada del secadero y operación de control de cantidad de material de ingreso.

De donde se determinó que los factores de control son: temperatura a la salida del secadero y cantidad de ingreso de material. El factor humedad con la que

ingresa el material al secadero así como el factor de quemar polvo de madera, se consideraron como factores de ruido, por ser factores que están fuera de control. En vista que la temperatura de salida depende proporcionalmente de la temperatura de entrada, se consideró únicamente la variable independiente, temperatura a la salida del secador.

A partir del modelo del proceso de secado se procedió a elaborar la Tabla 3.5 de factores y niveles seleccionados en el modelo del sistema de secado de material.

Con ayuda del software estadístico MINITAB 14, se procedió a realizar el experimento de Ingeniería Robusta con los rangos de valores indicados en la Tabla 3.5. Se tuvo dos variables independientes con tres niveles cada uno. Se determinó que el arreglo adecuado consistía en un arreglo L9 que se muestra en la Figura 3.26. Con este tipo de arreglo se procedió a realizar el experimento para cada una de las condiciones indicadas.

Con los factores y niveles señalados se procedió a elaborar la matriz de todas las combinaciones posibles o Layout del Experimento. Se procedió a compilar datos durante 10 días de producción, se tabularon clasificándolos para los diferentes niveles de los factores y se realizó su análisis estadístico; los datos obtenidos se muestran en el Anexo digital E. El resumen de datos de valor medio, desviación estándar, relación señal ruido para característica tipo nominal mejor ( $10\log(n2/s2)$ ), se muestran en la Tabla 3.6.

En los gráficos de la Figura 3.27 se muestran las curvas de distribución de los valores de humedad para las distintas condiciones de temperatura T1 de 100°C a 116,6°C, T2 de 116,7°C a 133,6°C y T3 de 133,7°C a 150°C y cantidad de material M1 de 10 a 32 kg/min, M2 de 32,1 a 64 kg/min y M3 de 64,1 a 96 kg/min.

**Tabla 3.5** Factores y niveles seleccionados en el modelo del sistema de secado de material

FACTORES DE RUIDO	NIVEL 1	NIVEL 2
Humedad del material al ingreso al secadero	Material Seco H% < 30%	Material Húmedo H% > 120%
Quemado de polvo de madera	0 kg/min	2 kg/min

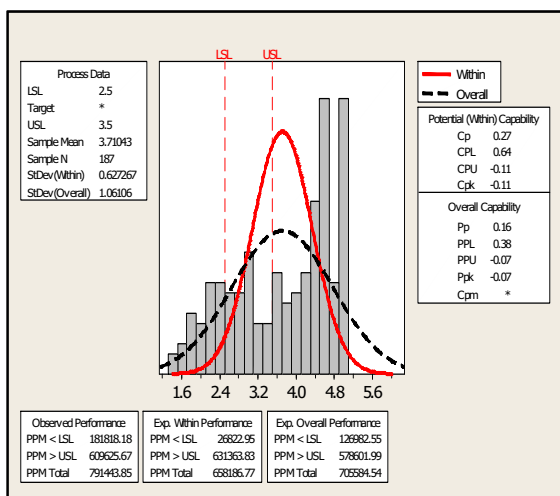
FACTORES DE CONTROL	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Temperatura a la salida del secadero.	T1: De 100°C a 116,6°C	T2: De 116,7°C a 133,6°C	T3: De 133,7°C a 150°C
Cantidad de material de ingreso al secadero	M1: De 10 a 32 kg/min	M2: De 32,1 a 64 kg/min	M3: De 64,1 a 96 kg/min

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	TEMPERATURA	CANTIDAD DE MATERIAL	Humedad	Sigma	HxS	COEFICIENTE DE VARIABILIDAD	
1	100	32	3.710	0.627	5.91707	2.32617	
2	100	64	3.020	0.736	4.10326	2.22272	
3	100	96	3.130	1.050	2.98095	3.28650	
4	125	32	2.759	0.789	3.49683	2.17685	
5	125	64	2.200	0.511	4.30528	1.12420	
6	125	96	1.977	0.587	3.36797	1.16050	
7	150	32	2.730	0.883	3.09173	2.41059	
8	150	64	2.199	0.596	3.68960	1.31060	
9	150	96	1.785	0.516	3.45930	0.92106	
10							
11							
12							
13							

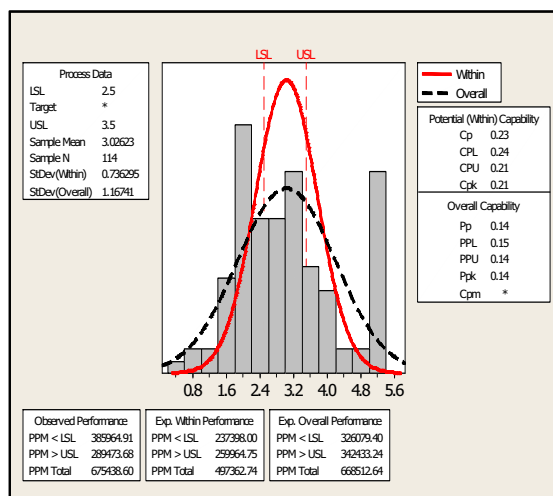
**Figura 3.26** Experimento de Ingeniería Robusta arreglo L9, dos variables y tres niveles cada una.

**Tabla 3.6** Datos de humedad media del proceso de secado para las distintas condiciones de operación del arreglo L9

COMBINACIÓN	Humedad Media %	Desviación Estándar	Relación Media/Desv.Est.	RELACIÓN SEÑAL/RUIDO
T1M1	3,71	1,06	3.5	11,38747819
T1M2	3,026	1,165	2,597424893	9,617378474
T1M3	3,134	1,132	2,768551237	9,921979843
T2M1	2,759	1,07	2,578504673	8,81503401
T2M2	2,207	0,8139	2,711635336	6,876046663
T2M3	1,977	0,749	2,639519359	5,920133386
T3M1	2,731	1,195	2,285355649	8,726434003
T3M2	2,199	0,958	2,295407098	6,844504587
T3M3	1,785	0,74	2,412162162	5,032764409

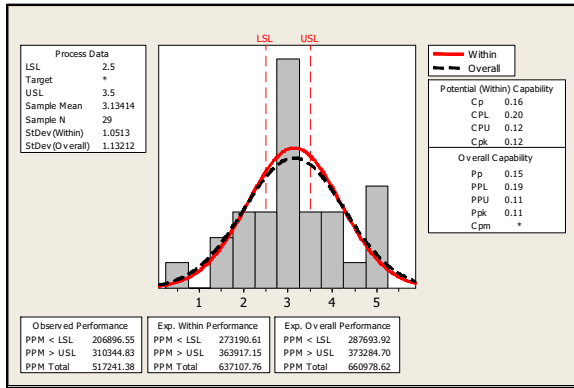


a)

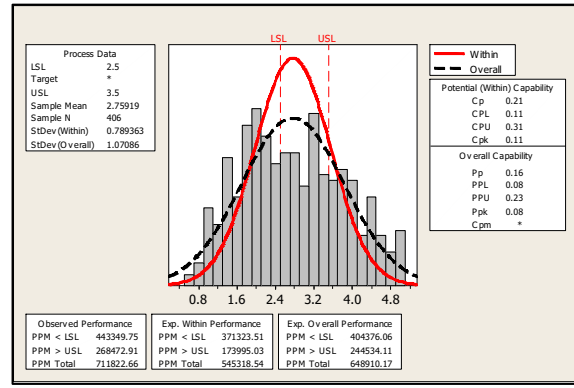


b)

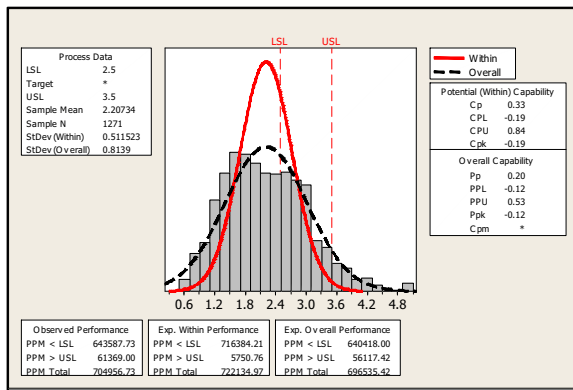




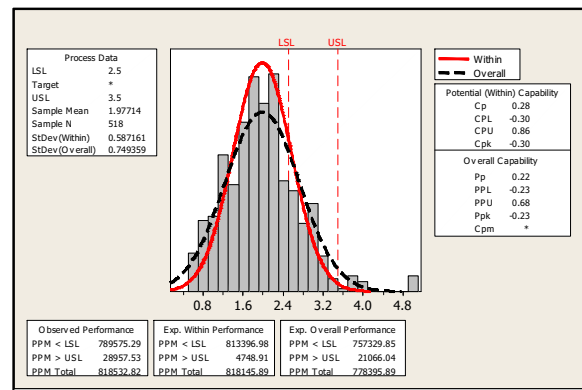
c)



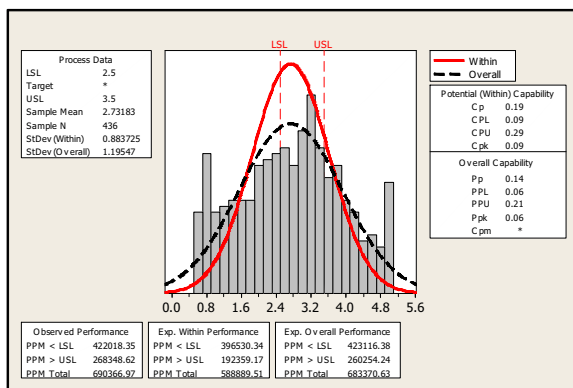
d)



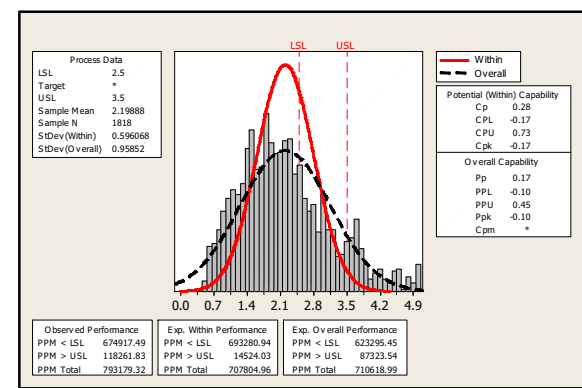
e)



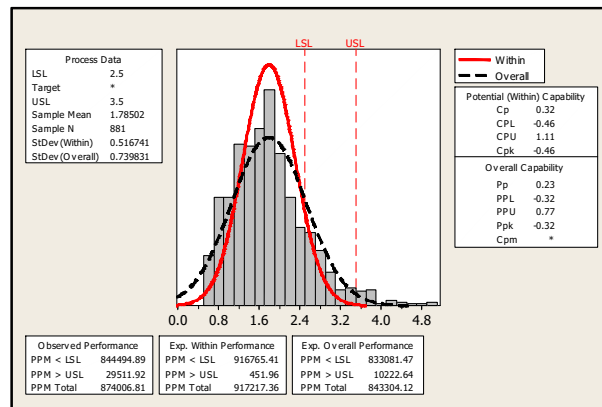
f)



g)



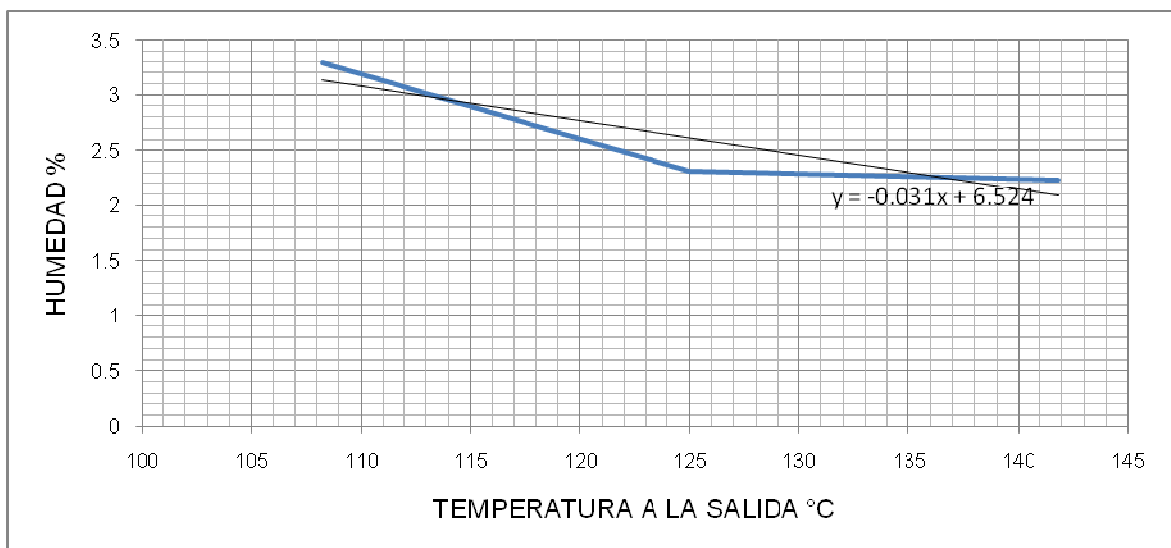
h)



i)

**Figura 3.27** Curvas de distribución de los valores de humedad para las distintas condiciones de temperatura y cantidad de material: a) T1 M1, b) T1 M2, c) T1 M3, d) T2 M1, e) T2 M2, f) T2 M3, g) T3 M1, h) T3 M2 i) T3 M3.

En el gráfico de la Figura 3.28, se observan graficados los valores medios de la humedad del material a la salida en función de la temperatura a la salida del secadero. Se puede observar que la Humedad disminuye con el incremento de temperatura, es decir, la Temperatura es factor Tipo 2 que afecta a la media, pero no la variabilidad.

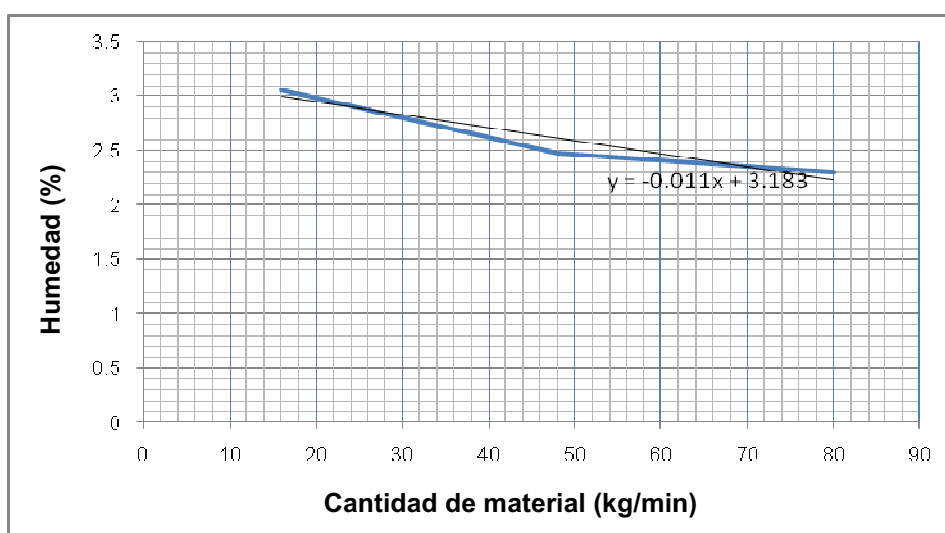


**Figura 3.28.** Valores medios de la humedad del material a la salida en función de la temperatura a la salida del secadero.

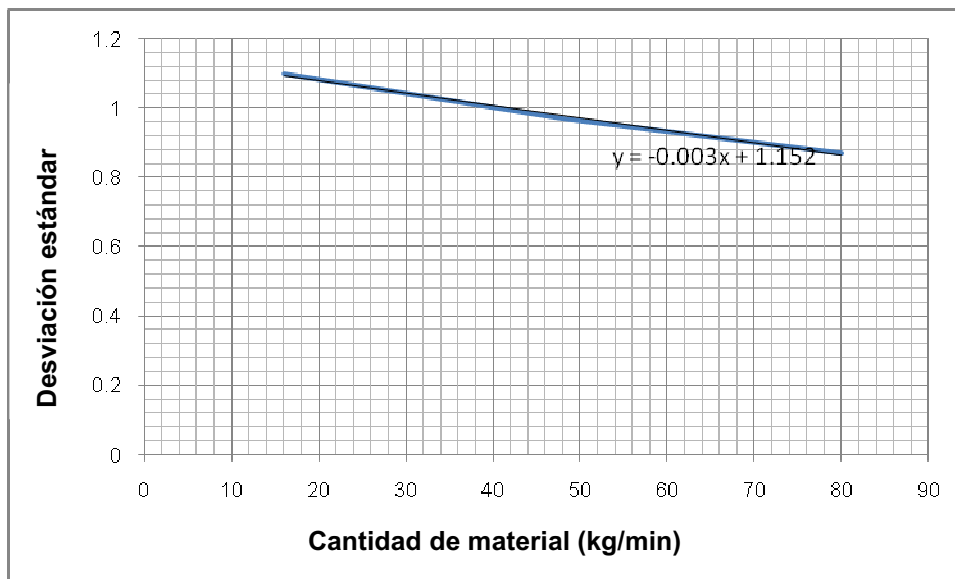
En el gráfico de la Figura 3.29, se observan graficados los valores medios de la humedad del material a la salida en función de la cantidad de material que ingresa al proceso. Se puede observar que la Humedad disminuye con el incremento de cantidad de material. En el gráfico de la Figura 3.30, se observan graficados los valores de la variabilidad (desviación estándar) de la humedad del material a la salida en función de la cantidad de material que ingresa al proceso, la variabilidad se reduce al incrementar la cantidad de material, por lo que esta variable es factor Tipo 1, que afecta principalmente a la variabilidad.

La explicación física de la disminución de variabilidad de la humedad al incrementarse el paso de material, es que al ser un flujo mayor, éste dispone de una inercia más significativa y una menor tendencia a las variaciones.

Una vez que se determinaron los tipos de factores de control del proceso, la metodología señala que para reducir la variabilidad, se debe colocar los factores tipo 1 en los niveles que minimizan la variabilidad, posteriormente se debe usar un factor tipo 2 para ajustar la media en el valor nominal. Por lo que la metodología señala que es necesario trabajar con el factor de control de paso de material en el rango de 64,1 a 96 kg/min, y los rangos de temperatura de 137,5 a 150°C.



**Figura 3.29** Valores medios de la humedad del material a la salida en función de la cantidad de material.



**Figura 3.30.** Desviación estándar de la humedad del material a la salida en función de la cantidad de material.

En la Tabla 3.7 se observa el arreglo de todas las combinaciones de las variables, se muestra el valor medio de la humedad del material a la salida del secadero para cada combinación, la desviación estándar y el coeficiente de variabilidad obtenido al multiplicar humedad por desviación estándar.

Con los datos de la Tabla 3.7 se realizó el análisis Multi-Vari de la Figura 3.31 que analiza la influencia del coeficiente de sensibilidad en función de las variables independientes. Este gráfico nos indicó que la mejor combinación es la de más alto material M3 y la de más alta temperatura T3.

Con estas condiciones, se procedió a realizar el experimento confirmatorio, procurando mantener las variables independientes dentro de los rangos de mínima variabilidad T3 y M3. Se obtuvieron los datos que se muestran en el anexo digital E columnas T3M3\_3 y T3M3\_4, y cuyo análisis estadístico se muestra en las Figuras 3.32 y 3.33.

**TABLA 3.7** Resumen del experimento de Ingeniería Robusta con dos variables independientes y tres niveles

<b>Temperatura a la salida del secadero</b>	<b>Cantidad de ingreso de material</b>	<b>Humedad del material a la salida del secadero H</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Coefficiente de variabilidad HXS</b>
T1	M1	3,71	0,627	2,32617
T1	M2	3,02	0,736	2,22272
T1	M3	3,13	1,05	3,2865
T2	M1	2,759	0,789	2,17685
T2	M2	2,2	0,511	1,1242
T2	M3	1,977	0,587	1,1605
T3	M1	2,73	0,883	2,41059
T3	M2	2,199	0,596	1,3106
T3	M3	1,785	0,516	0,92106

De los gráficos de las Figuras 3.32 a 3.35 correspondientes a las condiciones de proceso de materia prima M3 y temperatura T3, se puede observar que la desviación estándar toma valores menores a los que se obtenían en las otras condiciones, los valores de capacidad del proceso son valores cercanos a 3 que corresponde a un proceso six sigma. Confirmándose de esta manera que el proceso se vuelve más robusto para las condiciones de T3 y M3 y con una variabilidad menor.

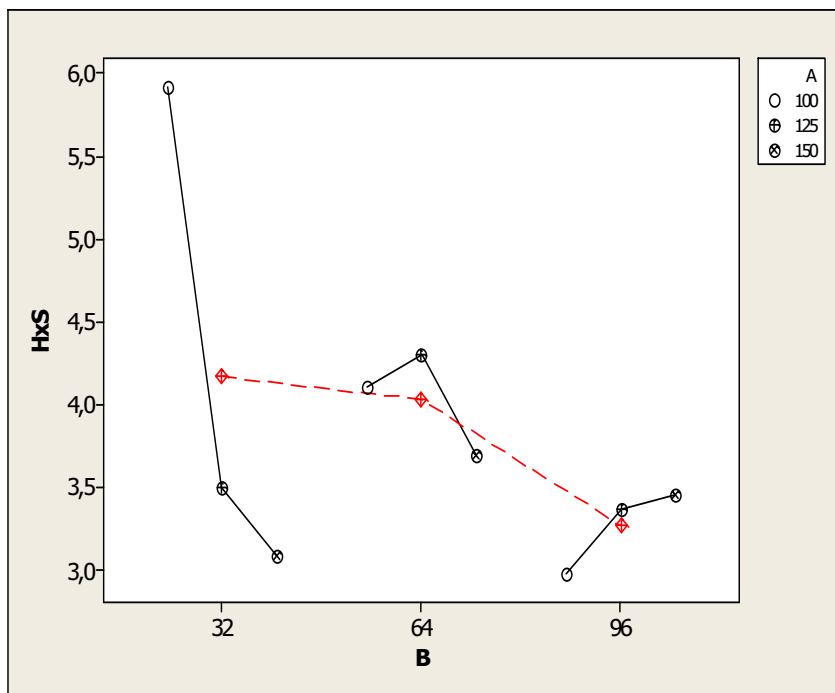


FIGURA 3.31. Análisis Multi Vari coeficiente de sensibilidad en función de las variables independientes.

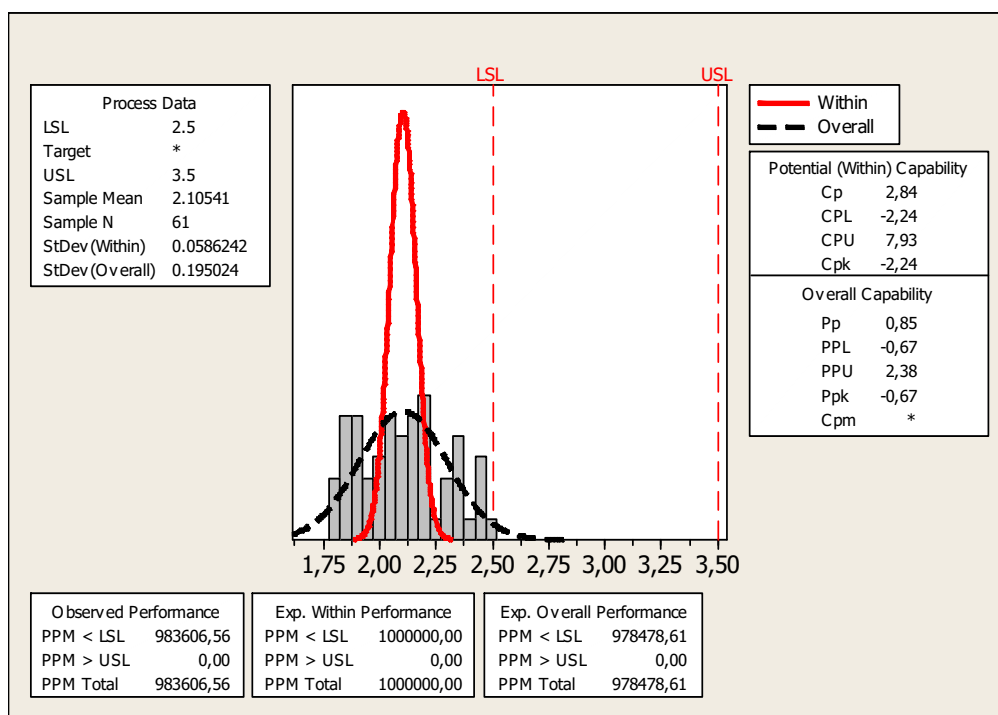
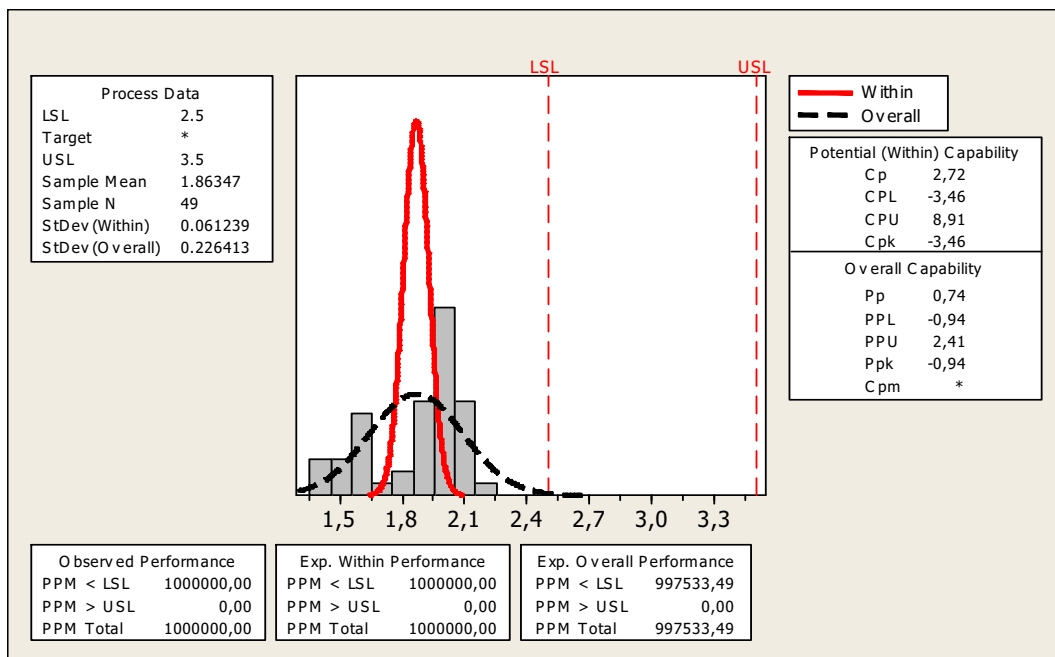
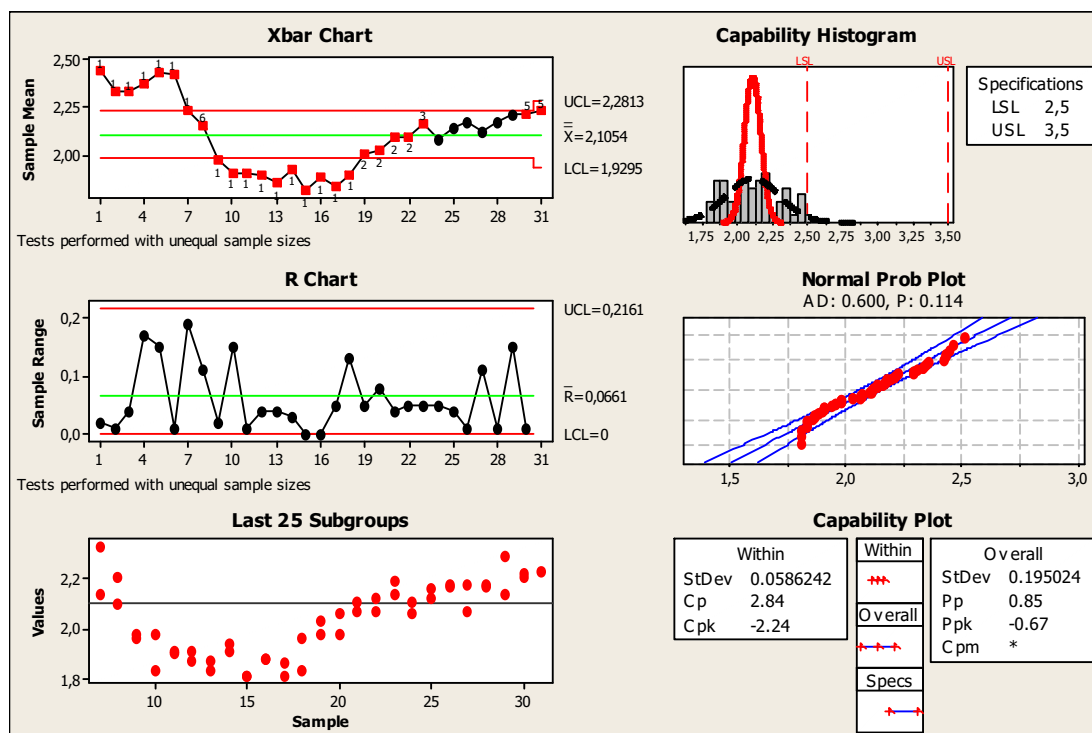


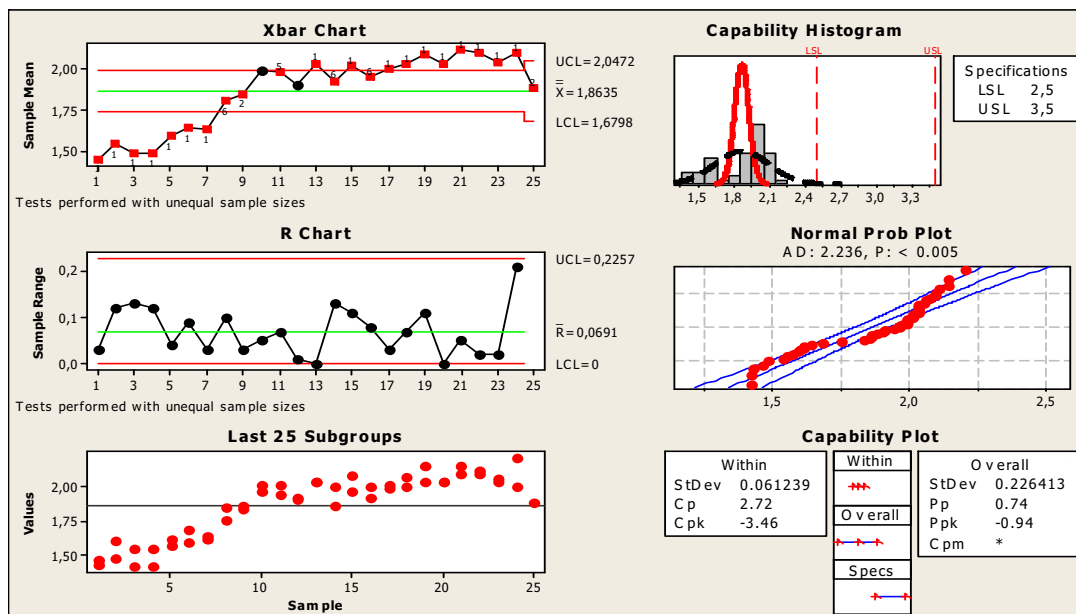
Figura 3.32 Curva de distribución de los valores de humedad para la condición de temperatura T3 y cantidad de material M3; 61 muestras tomadas durante el día lunes 27 de julio de 2009.



**Figura 3.33** Curva de distribución de los valores de humedad para la condición de temperatura T3 y cantidad de material M3; 49 muestras tomadas durante el día martes 28 de julio de 2009.



**Figura 3.34** Análisis de capacidad de proceso de los valores de humedad para la condición de temperatura T3 y cantidad de material M3; 44 muestras tomadas durante el día lunes 27 de julio de 2009 y en lotes de dos unidades.

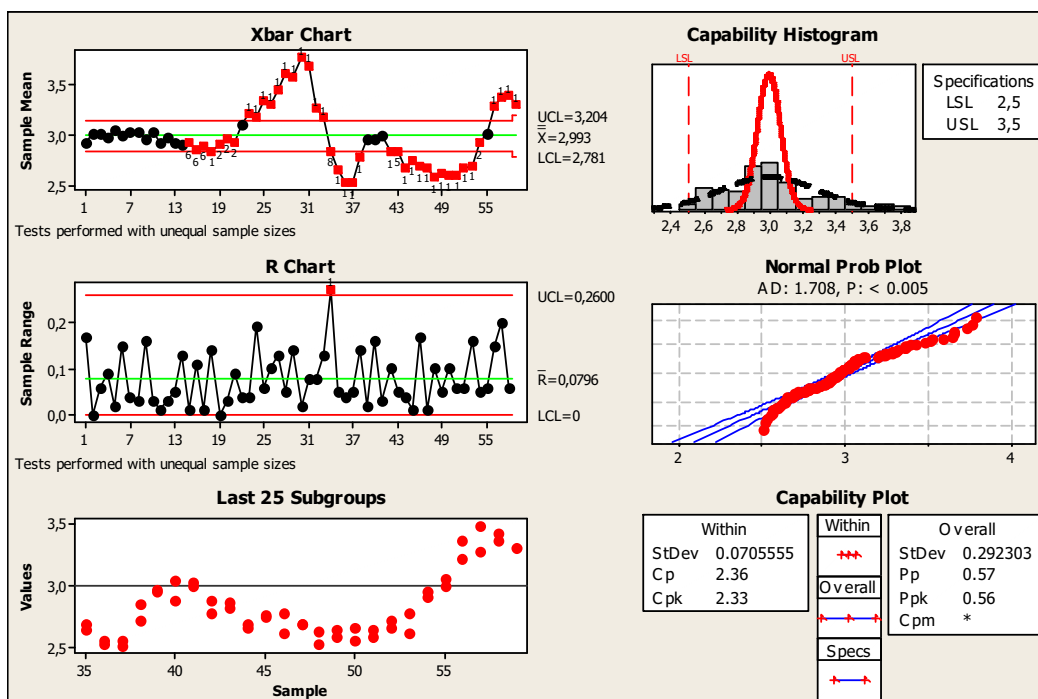


**Figura 3.35** Análisis de capacidad de proceso de los valores de humedad para la condición de temperatura T3 y cantidad de material M3; 50 muestras tomadas durante el día martes 28 de julio de 2009 y en lotes de dos unidades.

### 3.6 FASE CONTROLAR

Como se observó que con las condiciones de T3 y M3, la variabilidad es menor, se procedió a realizar el experimento confirmatorio del día lunes 3 de Agosto del 2009 y cuyos valores se muestran en el anexo E. Este análisis se muestra en la Figura 3.36, en donde se puede observar que el valor medio de la humedad de las muestras es 2,99% y se aproxima al valor ideal de 3%, y la gran totalidad de las muestras tomadas se encuentran dentro del rango de especificaciones. La capacidad de proceso presentó un valor de 3,36, que es un valor adecuado para este tipo de procesos.






**Figura 3.36** Análisis de capacidad de proceso de los valores de humedad para la condición de temperatura T3 y cantidad de material M3; 50 muestras tomadas durante el experimento confirmatorio.

Para poder trabajar en forma permanente en las condiciones de temperatura T3 y cantidad de material M3, fue necesario modificar la forma de trabajo para todos los espesores de producción. Cuando se trabajaba con producciones de ciclo alto, como lo es para bajos espesores: 4, 6 y 9mm y altos espesores, 25 y 30mm, se producía con el proceso de secado a un 80% de la capacidad máxima para lograr que los silos de material, pasen siempre en el nivel de  $\frac{3}{4}$  del silo.

Luego del presente estudio, se dispuso que el proceso de secado siempre deba producir a plena capacidad, en condiciones T3 y M3 hasta llenar los silos y luego parar el proceso de secado por unas dos horas, hasta esperar que se vacíen los silos a un tercio de su capacidad y luego arrancar nuevamente el proceso de secado. Se dispuso el añadir un indicador de la variable contenido de humedad en el material con alarmas en los límites de control y con supervisión por parte del operador del proceso de prensado y su registro en el plan de calidad. Una vez implementada esta forma de operación, se obtuvo excelentes resultados en mejoras de calidad del producto y una significativa disminución del porcentaje de

disminución de tableros desclasificados, con la consecuente mejora del indicador de calidad del proceso.

En la Figura 3.37 se muestra el Plan de Calidad en lo concerniente al proceso de secado, en el que se muestran las principales variables de control del proceso y los rangos de tolerancia que deben ser controlados por los operadores. En este plan de calidad se observa que se incluyeron el rango de temperatura a la salida del secadero entre 130°C y 150°C obtenido como óptimo durante el presente estudio, anterior a este estudio el rango de especificación era de 80°C a 140°C. La característica crítica del proceso contenido de humedad en el material tiene el rango de especificación de 2,5% a 3,5%, anterior a este estudio el rango de especificación era de 1,5% a 3,5%. El porcentaje de paso de material esta dado para mantener de 64,1 kg/min a 96 kg/min, anteriormente no se tenía ninguna restricción y el operador lo manejaba en función de si los silos de material están llenos o vacíos. La frecuencia de control de todas las variables es cada hora, anteriormente la frecuencia de control era de una vez por turno.

 <b>Plan de Calidad para Proceso de Aglomerado</b>		ES-033A				
		Ver No. 07				
		Pág 4 de 8				
SECADO DE VIRUTA	Temperatura Adelante (cámara)		Máximo 600 °C	Cada hora	RE-033A	Termómetro del púlpito secadero
	Temp.Atrás( cámara )		Entre 130 y 150 ° C	Cada hora	RE-033A	Termómetro del púlpito secadero
	Humed. antes secado		Mínimo 10 %	1 vez por turno	RE-033A	PR-033
	Humedad en la Criba		2.5 a 3.5 %	Cada hora	RE-033A	PR-033
		Presión Diesel	0 a 2 bar	Permanente	RE-033A	Manómetro diesel secadero
		Polvo Lijadora	Máximo 38 %	Permanente, si hay polvo	RE-033A	Medidor púlpito secadero
CRIBADO	Humedad en la Criba		2.5 % a 3.5 %	Cada hora	RE-033A	PR-033
		Nº tamices ( 3 )	50x50mm,10x10 mm, 3 x 3 mm	Mantenimiento y limpieza semanal	Bitácora oficina de Supervisores si hay novedad	Revisión Visual
DOSIFICA. MADERA HUMEDA	Virutas Hombak : 12 a 30 mm		Velocidad del tornillo 64.1 a 96Kg/min	Cada hora	RE-033A	PR-033
	Virutas Pallman: de 12 a 30 mm		Velocidad del tornillo 64.1 a 96Kg/min	Cada hora	RE-033A	PR-033
	Virutas Pallman: de 4 y 6 mm		Velocidad del tornillo 64.1 a 96Kg/min	Cada hora	RE-033A	PR-033
	Aserrín y viruta		Toda la carga del tornillosin fin de tolva	Cuando haya	RE-033A	PR-033

**Figura 3.37** Copia Plan de Calidad para proceso de Aglomerado en lo concerniente al proceso de secado.  
(SGI ACOSA, 2009)

En la Figura 3.38 se muestra una copia de un registro RE-033<sup>a</sup> que es llenado por los operadores del proceso de secado como parte de las actividades rutinarias de este proceso, en este se muestra que las variables críticas del proceso son controladas y registradas periódicamente por los operadores con una frecuencia horaria.

HUMEDAD										TEMPERATURAS °C					COMBUSTIBLES					MATERIALES				
HORA	ANTES	DESPUES	ADELANTE	ATRAZ	DIESEL PSI	POLVO %	% ASTILLA	VIRUTA %	ASERRIN	HORA	ANTES	DESPUES	ADELANTE	ATRAZ	DIESEL PSI	POLVO %	% ASTILLA	VIRUTA %	ASERRIN					
08:00		2,8	486	142	0,5	30	18	20	si	12:00		2,8	486	142	0,5	30	18	20	si					
08:30		2,9	482	142	0,5	30	18	20	si	12:30		2,9	482	142	0,5	30	18	20	si					
09:00	93,10%	3,2	482	142	0,5	30	18	20	si	13:00		3,2	482	142	0,5	30	18	20	si					
09:30		3,1	485	142	0,5	30	18	20	si	13:30	92,36%	3,1	485	142	0,5	30	18	20	si					
10:00		3	477	142	0,5	30	18	20	si	14:00		3	477	142	0,5	30	18	20	si					
10:30		2,8	493	142	0,5	30	18	20	si	14:30		2,8	493	142	0,5	30	18	20	si					
11:00		3,4	509	142	0,5	30	18	20	si	15:00		3,4	509	142	0,5	30	18	20	si					
11:30		3,4	526	142	0,5	30	18	20	si	15:30		3,4	526	142	0,5	30	18	20	si					
Observaciones	Extintores y mangueras		AG4	Lleno	AG9	Lleno	Lectura diesel	343368	DIESEL TANQUES	SIFTER		Fecha	20091217											
Turno normal	AG1	Lleno	AG5	Lleno	Mangueras y boquillas	completo	Lectura diesel		ORIENTE	26,5	Ventana D	5 mm	Turno	Primero	Operador	S Flores								
	AG2	Lleno	AG6	Lleno			Lectura diesel		OCCIDENTE	26,5	Bay paz	negro	Espesor	6 mm	Supervisor	F Granja								
	AG3	Lleno	AG8	Lleno																				

Figura 3.38 Copia del Registro RE-033 A de fecha 2009/12/17 del proceso de secado.

(SGI ACOSA, 2009)

### 3.7 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RESULTADOS

De los datos obtenidos durante el experimento confirmatorio, cuyo análisis de capacidad se muestra en la Figura 3.36, aplicando las condiciones de temperatura a la salida del tambor del secadero en el rango T3 de 133,7°C a 150°C y con la cantidad de paso de material en el rango M3, entre 64,1 a 96 kg/min, se observó: el valor promedio de la humedad del material de salida es de 2,99%, está muy cercana al valor ideal del centro de la banda de especificaciones que es 3%, el 92,6% de la totalidad de datos están dentro de los niveles de humedad requeridos y tiene un Cpk positivo de 2,33, los datos presentaron una distribución normal, los límites de control del proceso fueron límite de control superior UCL 3,204% y límite de control inferior LCL 2,781%; valores que están dentro de los límites de especificaciones requeridos para el proceso que son LIE 2,5 % y LSE 3,5%.

Las mediciones iniciales de Capacidad del proceso de secado  $C_p = 0,51$  y  $\mu = 2,29\%$  determinaron un proceso muy bajo, donde el personal operativo por cuestiones de cumplir con los requerimientos del plan de calidad, prefieren el

sobre secado del material, con el consecuente bajo rendimiento en cantidad de material secado. Del diseño del experimento de Ingeniería Robusta en una etapa inicial, se obtuvo que el proceso de secado se vuelve mínimamente sensible para las condiciones de temperatura a la salida T3 de 136°C a 150°C y cantidad de material M3 entre 64,1 y 96 kg/min. Bajo estas condiciones la desviación estándar es alrededor de 0,06 y la capacidad del proceso toma valores cercanos a 2,8. Características de un proceso 6 sigma a pesar que los valores medios de la humedad son cercanos a 2% muy por debajo del valor ideal de 3%.

Esta condición de operación se mantuvo durante la presencia de todas las condiciones de ruido del proceso: Material húmedo/seco, combustión con polvo/sin polvo; pero permanentemente, mientras se realizaban las pruebas, se controló de manera manual el flujo constante de cantidad de material de ingreso al secadero, básicamente se controló que no se formen túneles en los tornillos dosificadores para garantizar un flujo constante de material.

El proceso para las otras condiciones, temperaturas menores a 136°C y cantidades de material inferiores a los 64 kg/min, éste se volvía inestable y presentaba una gran variabilidad, con valores de desviación estándar superiores a 0,78, capacidad de proceso de valores menores a la unidad. Posteriormente, durante una segunda etapa, se procedió a realizar el experimento confirmatorio, aplicando las condiciones de temperatura T3 y cantidad de paso de material M3, en donde se logró que el valor promedio de la humedad del material de salida sea de 2,99%, en la Figura 3.36, se muestra el análisis de capacidad de este proceso y se puede observar que el 92,6% de la totalidad de datos están dentro de los niveles de humedad requeridos, la media de 2,99% está muy cercana al valor ideal del centro de la banda de especificaciones y tiene un Cpk positivo de 2,33.

Luego de la implementación de las condiciones de operación para secado con temperatura entre 136°C y 150°C y condiciones de pa so de material entre 64 y 96 kg/min, se observó que los defectos de tableros soplados, flojos y reventados decrecieron tal como se había afirmado en la hipótesis inicial. La mejor prueba de la efectividad del presente proyecto, es que el indicador global de tableros

desclasificados disminuyó de 2,32% obtenido durante el año 2.008, a 1,64% obtenido a finales del 2009. Una de las causas que producen esta disminución de los tableros desclasificados, es la notoria disminución de tableros desclasificados por flojos, soplados y reventados.

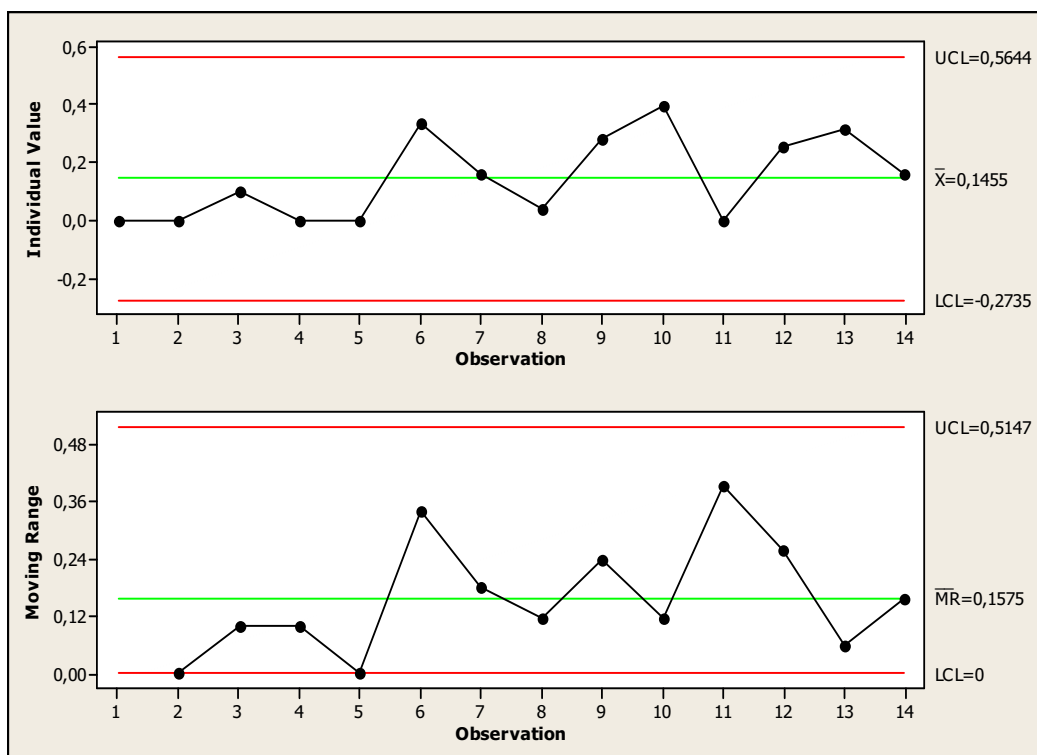
Las Figuras 3.39, 3.40 y 3.41 muestran los valores de estos defectos cuyos valores promedios disminuyen para los ciclos analizados y se comportan como un proceso controlado, algo que contrasta con los análisis realizados con los datos al inicio de este proceso Six sigma. Para tableros flojos el valor promedio disminuye de 0,257% obtenido a inicios del 2008 a 0,1455% obtenidos a finales del 2009.

En los mismos períodos, para tableros soplados el valor promedio de tableros rechazados se mantiene de 0,206% a 0,215%. Para tableros reventados el valor promedio de tableros rechazados disminuye de 0,1433% a 0,04%. Lo que confirma que el presente proyecto de optimización dio los resultados esperados y cuya influencia se puede notar en la Figura 3.42, donde se observa que disminuye el indicador de tableros desclasificados para el segundo semestre del año 2009.

Si se cuantifica el ahorro obtenido durante un año como resultado de la disminución de tableros desclasificados de 2,32% a 1,64%, con una producción mensual de 3 200m<sup>3</sup> a un valor de venta de \$ 220/m<sup>3</sup>, este incremento de productividad representa un incremento efectivo de producción de 0,68% equivalente a 21,76 m<sup>3</sup> mensuales con un costo de \$ 4 787,00, o un valor promedio anual de \$ 57 446,40. Este valor es una cantidad bastante importante que se logra sin realizar ninguna inversión significativa en el proceso. Se debe considerar que el reducir las pérdidas en donde cada tablero que se destruye, es un tablero que se deja de vender al cliente, se convierte en utilidad neta adicional y en la misma cantidad a favor de la empresa.

Para trabajar en forma permanente con las condiciones encontradas de mínima sensibilidad, fue necesario trabajar en condiciones de máxima capacidad como son temperaturas elevadas del secadero y máximo paso de material. El trabajar en estas condiciones durante los espesores de producción de 12, 15 y 19 mm, no

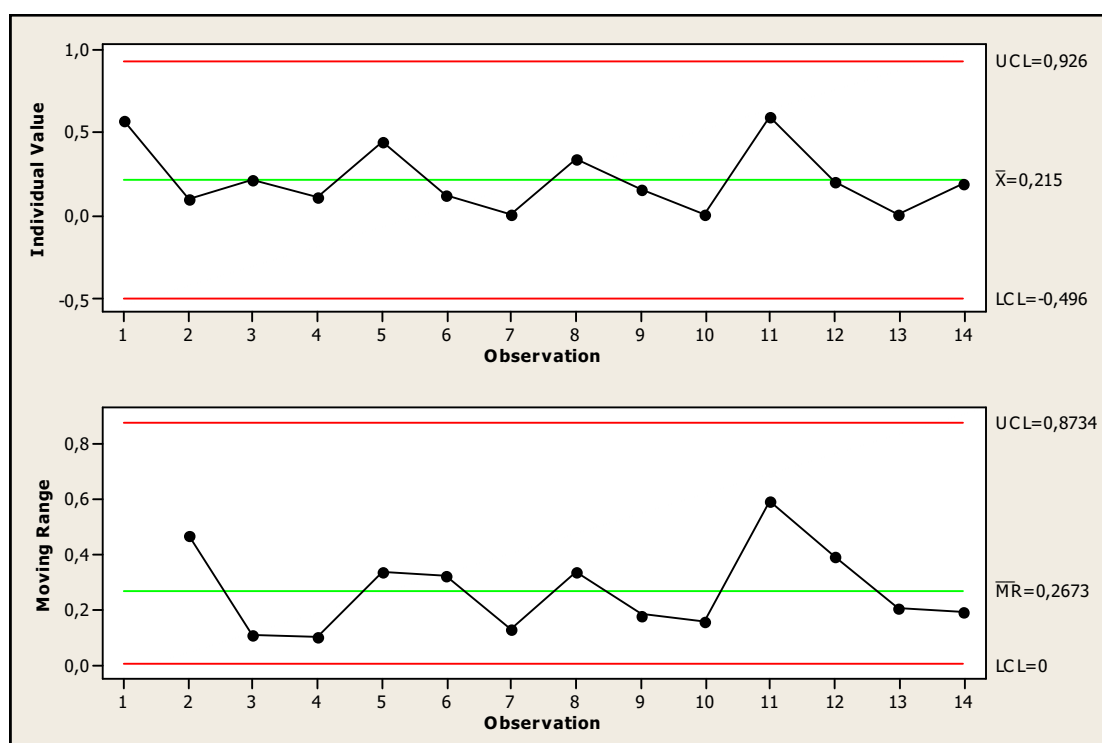
representa mayor dificultad; pues, durante la producción de estos espesores, necesariamente el secadero tiene que trabajar a su máxima capacidad, incluso hay momentos en que llega a faltar material. Mientras que cuando se produce espesores de bajo ciclo como son 4, 6, 9, y espesores de alto ciclo 25 y 30 mm, en los que se requiere un bajo flujo de material y por ende los silos se llenan con mayor facilidad, el procedimiento de producción disponía que el proceso de secado trabaje solo al 80% de su capacidad, para evitar llenar los silos y parar el proceso de secado, pero en estas condiciones de operación se demostró que existía mayor variabilidad del proceso.



**Figura 3.39** Grafico I-MR de control del defecto Tableros Flojos de las semanas 40 a 53 de 2.009.

Luego del presente estudio, se dispuso que el proceso de secado siempre produzca a plena capacidad para todos los espesores, hasta llenar los silos y en el caso de espesores de bajo consumo de material, parar el proceso de secado por unas dos horas hasta esperar que se vacíen los silos, hasta un tercio de su capacidad y luego arrancar nuevamente el proceso de secado.

En la fase de estandarización del proceso para implementar de manera permanente las mejoras (Fase Control), fue necesario realizar ciertas modificaciones secundarias al proceso, entre las que se encuentran la de habilitar el sistema de aspersión de agua por sobre temperatura al ingreso al secadero y modernizar el antiguo sistema contra incendios, sustituyéndolo por uno de mejores características. Se programó que el quemador de polvo se apague automáticamente al llegar a la temperatura de 155°C y el quemador de diesel a la temperatura de 160°C. Anteriormente los dos quemadores se apagaban en 150°C.



**Figura 3.40** Gráfico I-MR de control del defecto tableros soplados de las semanas 40 a 53 de 2009.

El hecho de trabajar a temperaturas elevadas en el tambor de secado incrementó el riesgo de incendio por el auto combustión de material. Si por cualquier circunstancia el material queda detenido dentro del tambor por un tiempo mayor a 10 minutos, el material se auto combustiona al llegar a tener una temperatura mayor a 280°C; este riesgo de auto combustión se incrementa al trabajar en forma permanente con el secador a temperaturas elevadas. Para minimizar este

peligro, se modificó el proceso de tal forma que cuando la temperatura a la salida del tambor del secadero, llegue a tener valores superiores a los 180°C, el sistema automáticamente inyecte agua al ingreso del tambor, en una cantidad controlada por tiempo con una frecuencia de 10 segundos cada minuto para bajar de esta manera la temperatura del sistema a los rangos de temperatura normales de operación.

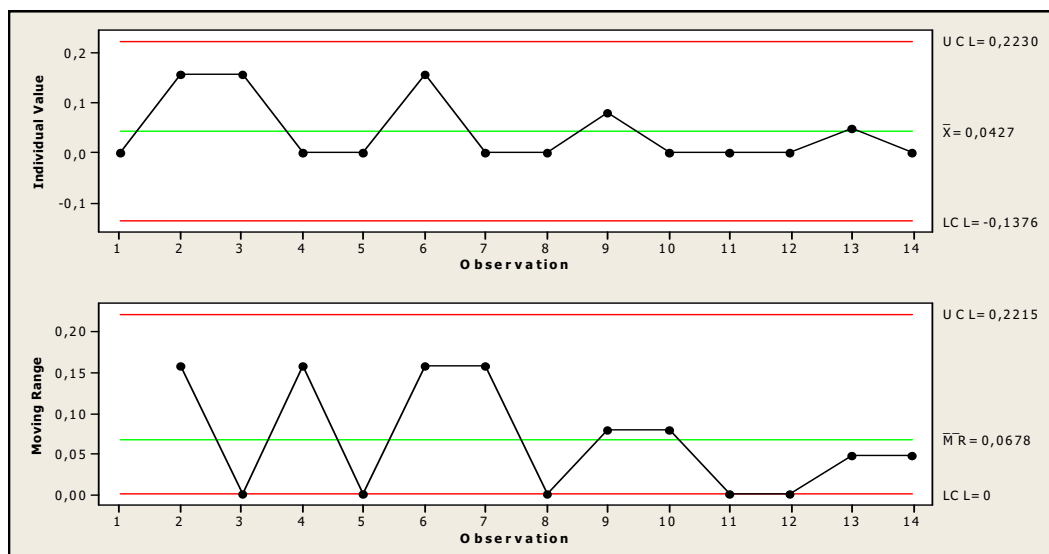


Figura 3.41 Grafico I-MR de control del defecto tableros reventados de las semanas 40 a 53 de 2009.

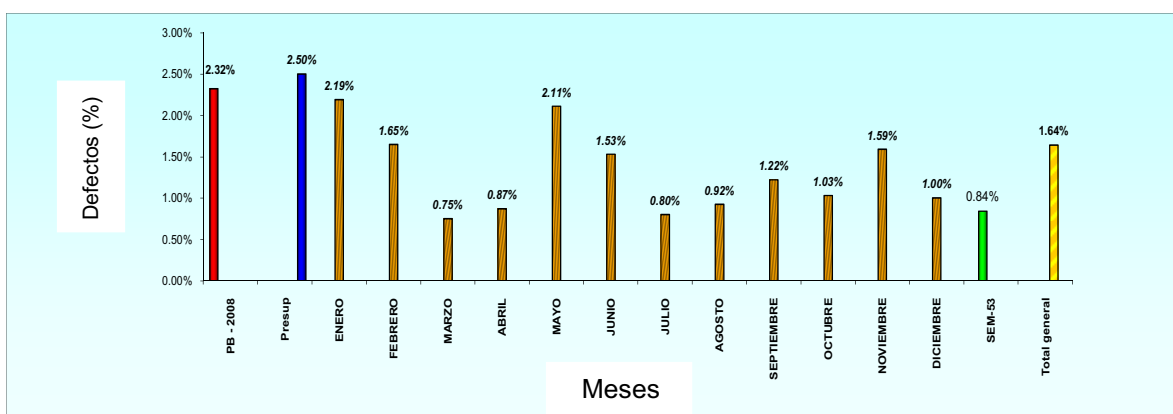


Figura 3.42 Grafico del indicador de la línea de aglomerado de 2009. Tableros desclasificados. (SGI ACOSA, 2009)



Como efectos secundarios de la optimización del proceso del secadero, se puede mencionar la disminución del factor de encolado de 83 kg de resina por metro cúbico de tablero producido, valor promedio obtenido durante el año 2008 a 81kg de resina por metro cúbico obtenido durante el año 2009, uno de los factores que influyen en esta optimización, es el tener la humedad del material dentro de los rangos establecidos entre 2,5% y 3,5%, permitiendo un consumo de resina adecuado.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- En el proceso de prensado, posterior al proceso de secado, de los análisis estadísticos de los defectos de tableros flojos, soplados, y reventados de las semanas a 1 a 24 del año 2009, se pudo concluir que su variabilidad es debido a causas especiales, las mismas que debían ser determinadas y eliminadas. Con algunas de las herramientas de six sigma se determinó que los tableros flojos, soplados y reventados, se debían a las variaciones del contenido de humedad del material con que salía del proceso de secado e ingresaba al proceso de encolado.
- De los diagramas causa-efecto, se determinó que la característica crítica del proceso de secado es la humedad con la que sale el material. Con la herramienta la voz del cliente, se determinó que debe producir 5 760 kg/hora de material con una granulometría adecuada y el rango de especificación de la variable contenido de humedad del material es de 2,5% a 3,5%.
- Del análisis de las mediciones preliminares se determinó que el proceso de secado tenía una capacidad de proceso 0,51, con una elevada variabilidad al tener una desviación estándar de 0,326 y una media de la variable contenido de humedad del material en 2,29%, debajo del rango de tolerancia que es de 2,5% a 3,5%.
- La variable de salida del proceso de secado es la humedad del material con la que sale el material del secadero y la misma depende principalmente de las siguientes variables independientes de entrada: temperatura del proceso, que es medida tanto a la entrada como a la salida, cantidad de material de ingreso y la humedad del material que ingresa al secadero. El resto de variables independientes: Contenido de

humedad con que ingresa el material, quemar polvo de madera para la combustión, proporción de mezcla del tipo de material de ingreso, que son factores que afectan al proceso y cuya influencia es mínima e inevitable para la combinación óptima de las variables principales, se consideran como factores de ruido porque están fuera de control.

- Por medio de las herramientas Six Sigma y del esquema conceptual CT Flowdown se concluyó que las operaciones críticas CTX del proceso de secado son: operación de control de humedad con la que ingresa el material, control de temperatura de salida del secadero, control de temperatura de entrada del secadero y operación de control de cantidad de material de ingreso. De donde se determinó que los factores de control son: temperatura a la salida del secadero y cantidad de ingreso de material.
- Se recabó información que justificó modificaciones al proceso. Se determinó que se puede trabajar de manera confiable con temperaturas cercanas a 150°C. Se añadió seguridades que permiten controlar el proceso en caso de existir temperaturas mayores a los 180°C por medio de un sistema para dosificar agua a presión al ingreso del tambor del secadero. Se justificó y se implementó un visualizador de la variable contenido de humedad del material con alarmas acústicas y luminosas en los límites de especificaciones en el pulpito de control del proceso de prensado, de esta manera el operador de este proceso puede tomar correctivos si la variable sale del rango de especificaciones.
- Del diseño del experimento de Ingeniería Robusta en una etapa inicial se obtuvo que el proceso de secado se vuelve mínimamente sensible para las condiciones de temperatura a la salida T3 de 136°C a 150°C y cantidad de material M3 entre 64,1 y 96 kg/min. Bajo estas condiciones la desviación estándar es alrededor de 0,06 y la capacidad del proceso toma valores cercanos a 2,8. Características de un proceso 6 Sigma a pesar que los valores medios de la humedad son cercanos a 2% muy por debajo del

valor ideal de 3%. Esta condición de operación se mantuvo durante la presencia de todas las condiciones de ruido del proceso: Material húmedo/seco, combustión con polvo/sin polvo. El proceso para las otras condiciones, temperaturas menores a 136°C y cantidades de material inferiores a los 64 kg/min, el proceso se vuelve inestable y presenta una gran variabilidad, con valores de desviación estándar superiores a 0,78, capacidad de proceso de valores menores a la unidad. Posteriormente, durante una segunda etapa, se procede a realizar el experimento confirmatorio, aplicando las condiciones de temperatura T3 y cantidad de paso de material M3, en donde se logra que el valor promedio de la humedad del material de salida es de 2,99%, se puede observar que el 92,6% de la totalidad de datos están dentro de los niveles de humedad requeridos, la media de %2,99 está muy cercana al valor ideal del centro de la banda de especificaciones y tiene un CPk positivo de 2,33, presenta una distribución normal, los límites de especificaciones del proceso son UCL 3,204 y LCL 2,781, valores que están dentro de los límites requeridos para el proceso.

- Con la implementación del experimento de Ingeniería Robusta, con la ayuda del análisis del coeficiente de variabilidad, se determinó que la temperatura es un factor Tipo 2 que afecta a la media, pero no a la variabilidad y que el porcentaje de paso de material es un factor Tipo 1 que afecta a la variabilidad, pero no la media, el primer paso fue reducir la variabilidad, por la elección correcta del nivel del factor de control Tipo 1, la desviación estándar de la humedad del material disminuyó de 0,326 a 0,07; posteriormente con la selección adecuada del nivel del factor Tipo 2, se trasladó la media al valor ideal de especificación, la humedad del material presentó un desplazamiento del valor medio de 2,29% a una media de 2,99% que cumple las especificaciones, la capacidad del proceso se incrementó de 0,51 a 2,36.

- El beneficio global se evidencia en un incremento del 3% de la capacidad de producción del proceso de secado, es decir se incrementaron los volúmenes de material seco de 5 587 kg/h a valores sobre 5 760 kg/h.
- La optimización del proceso de secado, al entregar materia prima dentro de las tolerancias adecuadas de humedad, permitió la disminución de tableros desclasificados por tableros flojos, soplados y reventados de 2,32% obtenidos durante el año 2008 a 1,64% obtenidos durante el año 2009, con una producción mensual de 3 200m<sup>3</sup> a un valor de venta de \$ 220/m<sup>3</sup>, este incremento de productividad representa un incremento efectivo de producción de 0,68% equivalente a 21,76 m<sup>3</sup> mensuales con un costo de \$4 787,00, o un valor promedio anual de \$ 57 446,40, y lo que es más importante, sin realizar ninguna inversión significativa.
- El objetivo general del presente proyecto fue mejorar la capacidad del proceso de secado de viruta aplicando la metodología Six Sigma, se puede concluir que el abordaje de Ingeniería Robusta alcanzó los resultados esperados, obteniéndose una reducción de tableros desclasificados lo que implica un incremento efectivo de la productividad de todo el proceso de fabricación de tableros aglomerados y en particular el proceso de secado. Para cumplir con este objetivo fue necesario el cumplir con todos los objetivos específicos.
- Para poder trabajar en las condiciones de máxima estabilidad fue necesario romper el paradigma “es difícil y peligroso secar material a temperaturas de salida superiores a 120°C”, para esto fue necesario realizar modificaciones al proceso y mejorar los controles del mismo.
- Adicionalmente, el trabajo permitió elevar la autoestima de la gente que participó en estos proyectos de mejora continua, quienes en un inicio eran escépticos acerca de los posibles resultados que se podrían alcanzar.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Debido a que los equipos de secado deben trabajar a su capacidad máxima se recomienda revisar las frecuencias de mantenimiento.
- En vista de que una de las variables independientes de mayor trascendencia en el proceso es la cantidad de paso de material, y cuyo control no es adecuado al no tener el dato exacto de los kg/min que ingresan al secadero, pues solo se dispone de las indicaciones de velocidad de los tornillos dosificadores y estas pueden dar una señal errada principalmente al momento de formarse puentes sobre los tornillos extractores, se recomienda implementar un sistema de medición en línea de flujo de cantidad de material que ingresa al secadero, como ser balanzas de cinta o balanzas de no contacto en base a mediciones en línea del perfil del volumen del material que atraviesa por una banda de cinta, las mismas que en la actualidad son muy confiables y de bajo costo. Una vez implementado este sistema de medición de volumen en línea se puede realizar un estudio de factibilidad de implementar un sistema de control en lazo cerrado en el proceso de secado y posteriormente implementar este sistema de control.
- Extender el know-how adquirido con este proceso de optimización para aplicarlo a los restantes procesos productivos de la planta, en particular al proceso de encolado y formación, pues al disminuir la variabilidad del contenido de la humedad del material y al incrementarse el valor medio de 2,29% a 2,99%, se observó una disminución del consumo de resina factor de encolado de 83 kg de resina por metro cúbico de tablero producido, valor promedio obtenido durante el año 2008 a 81 kg de resina por metro cúbico de tablero producido obtenido durante el año 2009 como efecto secundario del presente estudio, por lo que se puede deducir que este proyecto puede ser optimizado aplicando la metodología Six Sigma.

- Para poder aplicar técnicas estadísticas se hace necesario la toma de datos de las principales variables de los procesos, la tecnología de control moderna facilita la medición en línea de casi todas las magnitudes físicas, se recomienda para todos los procesos de la empresa el analizar el costo beneficio de la adquisición de equipos que permitan medir y registrar las variables críticas y posteriormente aplicar la metodología Six Sigma.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Barbiero, C., Flury, M., Pagura, J., Quaglino, M. y Ruggieri, M., 2005, "La importancia de la Estadística en estrategias de mejora continua de la calidad", <http://www.fcecon.unr.edu.ar/sites/default/u16/decimocuartas/Barbiero>, (Agosto, 2009).
2. Brue, G., 2003, "Seis Sigma Para Directivos", Editorial McGraw-Hill, México, pp.6, 7.
3. Breyfogle, F., 2003, "Implemeting six sigma", Published by John Wiley & Sons, New Jersey, p. 71.
4. De Feo, J. y Barnard, W., 2004, "Más Allá de Seis Sigma", Editorial McGraw-Hill, Madrid, España, pp. 18, 51, 90, 91.
5. Eckes, G., 2003, "El Six Sigma para todos", Grupo Editorial Norma, Bogotá, Colombia, pp. 49, 50.
6. Ferré, J. y Rius, X., 2002, "Introducción al Diseño Estadístico de Experimentos", Universidad Rovira, Virginia, USA, <http://www.quimica.urv.es/quimio>, (Septiembre, 2011), p. 2.
7. Gutiérrez, H. y De la Vara, R., 2009, "Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma", 2da Edición, Editorial McGraw-Hill, México, pp. 11, 101, 152, 165.
8. Gómez, F. y Vilar, J., 2009, "Seis sigma", 2da Edición, FC Editorial, pp. 149, 170, 173.
9. George, M., 2002, "Lean six sigma", Editorial McGraw-Hill, USA, pp. 16, 25, 26.



10. Issa B., 2007, "Six Sigma statistics with excell and minitab", Editorial McGraw-Hill, USA, p. 25.
11. Jay, A., 2003, "Guía Para el Instructor de Six Sigma", Panorama Editorial, México, p. 74.
12. Jiménez, E., 2006. "Experimentación". <http://proyectoempresarial.files.wordpress.com/2009/10/017-experimentacion.pdf>, pp. 14. (Agosto, 2009).
13. Kavanaugh, C., 2010, "Los Diseños de Taguchi Contra los Diseños Clásicos de Experimentos", <http://www.itch.edu.mx/academic/industrial/ingcalidad/unidad3.html>, (Junio, 2010).
14. López, M., 2006, "La distribución normal", Centro de competencias de la comunicación, Universidad de Puerto Rico, [www1.uprh.edu/distribucion-normal](http://www1.uprh.edu/distribucion-normal), (Agosto, 2010), pp. 16,17.
15. López G., "Metodología Six Sigma: Calidad Industrial", Neoediciones JP&A, <http://www.mercadeo.com>, (Agosto, 2010), p. 10.
16. Lowenthal, J., 2002, "Guía para la aplicación de un proyecto six sigma", Editorial Fundación confemetal, Madrid, pp. 63 - 65.
17. Manivannan, S., 2007, "Manufactura y Soporte de Producto de Ford Motor Company." <http://mexico.pma.org>, (Julio, 2010), p. 52.
18. Mason, R. y Lind, D., 2003, "Estadística Para la Administración y Economía", 10ma edición, Editorial Alfaomega. México, pp. 199 - 208.
19. MINITAB Inc. Meet Minitab, Versión 14 para Windows XP, 2003, pp. 5 – 30.
20. Miranda, L., 2006, "Seis Sigma guía para principiantes", 1ra edición, Editorial Panorama, México, pp. 45, 57, 67.

21. Montgomery, D., 2003. "Diseño y análisis de experimentos", Editorial Prentice Hall Hispanoamericana. España, pp. 35 - 57
22. Pande, P. y Neuman, R., 2004, "Las claves practicas del Seis Sigma", Editorial McGraw-Hill. México, pp. 83, 3, 200, 327.
23. Peace, G., 1993, "Taguchi Methods", Editorial Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, pp. 3, 4.
24. Reyes, P., 2006, "La ingeniería de calidad de Taguchi", [www.icicm.com/files/DisTaguchi.doc](http://www.icicm.com/files/DisTaguchi.doc), pp. 1 - 5, (Agosto, 2009).
25. UDLAP, 2009, "Teoría de Diseño Experimental", [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/salvador\\_s\\_g/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/salvador_s_g/capitulo4.pdf), pp. 49.
26. QUALIPLUS, 2006, "Certificación Six Sigma – Green Belt", Qualiplus, pp. 1 - 90.
27. SGI ACOSA, 2009, "Sistema de Gestión Integrado de Aglomerados Cotopaxi S.A.", [www.cotopaxi.com.ec](http://www.cotopaxi.com.ec), (Agosto, 2009).
28. Villa, E. y Escobar, L., 2003, "Confiabilidad: Historia, Estado del Arte y Desafíos Futuros", Dyna, Universidad Nacional de Colombia, [dyna@unalmed.edu.co](mailto:dyna@unalmed.edu.co), (Abril, 2010), p. 17
29. Walton, M., 1994, "Cómo administrar con el Método Deming". Grupo Editorial Norma, pp. 22 - 55.
30. Wheat, M. y Mills Ch., 2004, "Seis Sigma una parábola sobre el camino hacia la excelencia y una empresa esbelta", Grupo Editorial Norma, Bogotá, p. 48.

## **ANEXOS**





## ANEXO II

## EJEMPLOS DE ARREGLOS ORTOGONALES

Tabla A.2 Arreglo ortogonal  $L_4(2^3)$ 

Col. No.	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	2

(Peace, 1993)

Tabla A.3 Arreglo ortogonal  $L_{12}(2^{11})$ 

Col. No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

(Peace, 1993)

**Tabla A.4** Arreglo ortogonal  $L_{16}(2^{15})$ 

Col. No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1
12	2	1	2	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	2
13	2	2	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	2	1
14	2	2	1	1	1	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2
15	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1
16	2	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1	1	2	2

(Peace, 1993)

**Tabla A.5** Arreglo ortogonal  $L_{17}(2^{13})$ 

Col. No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	3	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

(Peace, 1993)



**ANEXO III**  
**TABLEROS DEFECTUOSOS SEMANA 1 A 24, AÑO 2009**

**Tabla A.6** Tableros defectuosos semana 1 a 24, año 2009

<b>3</b>	<b>CATEGORÍAS DE DEFECTO</b>	<b>TOTAL</b>	<b>ACUMULADO</b>	<b>%</b>
1	BAJO ESPESOR	81,11	81,11	38,66
2	ROTOS	18,04	99,14	47,26
3	MANCHAS DE ACEITE	17,95	117,09	55,82
4	FLOJOS, SOPLADOS y REVENTADOS	14,51	131,60	62,73
5	HUECOS DE POLVO	14,42	146,01	69,61
6	OTROS	11,14	157,15	74,91
7	ROTOS/MONTACARGA	10,17	167,32	79,76
8	MANCHAS DE PARAFINA	9,72	177,03	84,39
9	MANCHAS DE COLA	9,01	186,05	88,69
10	MARCAS DE LIJA	6,96	193,00	92,01
11	MATERIAL GRUESO	6,56	199,56	95,13
12	HUELLA FORMACIÓN	4,89	204,45	97,46
13	MAL CORTADOS	4,67	209,13	99,69
14	VIBRADOS	0,51	209,64	99,94
15	DESCUADRADOS	0,13	209,77	100,00
16	SOLO CRUDOS	0,00	209,77	100,00
17	TORCIDOS	0,00	209,77	100,00
	<b>TOTAL DE MALOS</b>	<b>209,77</b>		

(SGI ACOSA, 2009)