



# Reducción de gasto energético eléctrico usando seis sigma

*Juan Sebastian Morato Orozco<sup>1</sup>*

*Reduction of energy waste by the use of six sigma*

*Redução de despesas de energia elétrica de seis sigma*

## RESUMEN

La aplicación de Seis Sigma a los modelos de gestión energética es de vital importancia, porque genera mejoramiento continuo, optimiza el consumo eficiente energético y fortalece la cultura de preservación. El artículo ilustra un ejemplo de aplicación de la metodología Seis Sigma en los modelos de gestión energética para la RGEE (Reducción de Gasto Energético Eléctrico) realizado en el parque industrial Sumicol – Corona en Sabaneta, Antioquia.

**Palabras clave.** Seis Sigma, ciclo DMAMC, Matriz AMEF, Número de Prioridad de Riesgo (NPR), gestión energética, Reducción de Gasto Energético Eléctrico (RGEE).

---

## ABSTRACT

The application of Six Sigma to the models of energy management is vital because it brings a continuous improvement, optimizes the efficient consumption of energy and strengthens the conservation culture. This article shows an example of the application of the Six Sigma methodology in the energy management models used for the “Reduction of Energy Waste” in the Sumicol-Corona industrial park in Sabaneta, Antioquia.

**Key words.** Six Sigma, DMAIC cycle, AMEF matrix, “Risk Priority Number” (RPN), energy management, “Reduction of Energy Waste”.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Químico. Especialista en Gerencia de Proyectos. Cinturón Negro Seis Sigma. Sumicol- Organización Corona.

## RESUMO

A aplicação do Seis Sigma aos modelos de gestão de energia é fundamental para a geração de melhoria contínua, aperfeiçoar a eficiência do consumo de energia e reforçar a cultura de conservação. O artigo ilustra um exemplo de aplicação da metodologia Seis Sigma em modelos de gestão de energia para a Redução de Energia Elétrica despesas efetuada no parque industrial Sumicol - Corona Sabaneta (Antioquia).

**Palavras importante:** Seis Sigma, DMAIC ciclo, Matriz, FMEA, Número de prioridade de Risco (NPR), Gestão Energética, Reduzindo Despesas de Energia Elétrica (RGEE).

## INTRODUCCIÓN

La situación energética empresarial que vive el mundo hace importante la toma de decisiones que aseguren tanto el uso racional de los recursos energéticos del planeta como el desarrollo de las industrias. Para asegurar este uso eficiente y racional en los procesos productivos, las empresas requieren de un sistema de gestión energética que adecúe la estructura organizacional y le permita manejar eficientemente sus recursos energéticos. Los modelos de gestión energética en la industria se han desarrollado en Colombia tomando como referencia los modelos internacionales, limitándose principalmente al diagnóstico de eficiencia energética, monitoreo de indicadores, cambios tecnológicos, gestión de negociaciones y gestiones energéticas. Para ampliar un poco más el alcance de estos modelos de gestión energética, y no quedarse en el diagnóstico, es necesario complementar estos modelos con la implementación de herramientas de mejora tales como Seis Sigma a proyectos energéticos específicos. La aplicabilidad de este tipo de herramientas genera oportunidades de ahorro y reducción de costos, basadas en el mejoramiento continuo de los procesos energéticos y en su buen uso. De igual forma, el desarrollo de este tipo de proyectos crea compromiso en las personas para ayudar a evitar el calentamiento global, generar cultura de ahorro de todo tipo de energéticos y conservar el medio ambiente. En el desarrollo de este artículo se expondrá un proyecto realizado bajo la metodología Seis Sigma, el cual consiste en disminuir el gasto energético eléctrico y el logro de cultura para el uso eficiente de la energía y para su conservación<sup>1-4</sup>.

## QUÉ ES SEIS SIGMA

La letra griega Sigma se utiliza para representar la medida estadística de desviación estándar, la cual es una medida de variación. Seis Sigma es una metodología estructurada de resolución de problemas, con un enfoque basado en el conocimiento para reducir variabilidad y crear valor.

El programa de desarrollo de los proyectos Seis Sigma se centran en usar una metodología de solución de problemas llamada DMAMC. El significado de cada una de estas letras es:

**Definir:** definición del problema, requerimientos de los clientes, objetivos, métricas y meta.

**Medir:** medición de defectos y documentación del proceso.

**Analizar:** análisis de datos de proceso y encuentro de factores vitales que afectan la respuesta deseada del proceso y/o proyecto.

**Mejorar:** implemento de mejoras de proceso y eliminación de las causas de los defectos y problemas.

**Controlar:** control del desempeño del proceso y aseguramiento de que los defectos y problemas no ocurrirán de nuevo.

### Aplicabilidad específica en el Proyecto de Reducción de Gasto Energético Eléctrico RGEE (Parque Industrial Sumicol)

Para la ejecución de este proyecto se aplicó la metodología completa de Seis Sigma, lo cual implica el desarrollo de sus 5 etapas:

**Etapas de Definición.** Como todo proyecto Seis Sigma, nuestro problema a solucionar debía enfocarse desde la ecuación básica para resolver problemas desde Seis Sigma. Es decir:

$$Y = f(x), \text{ o sea } Y=f(X_1, X_2, X_3, \dots).$$

Esta ecuación define la relación entre una variable dependiente, Y, y las variables independientes, las Xs. Para el caso específico del proyecto de RGEE, la variable dependiente es el consumo Kw-hr/ tonelada producida. Por otro lado, el encuentro de las variables independientes Xs resultaría del desarrollo y ejecución del proyecto. Sin embargo, mediante las diferentes discusiones iniciales en equipo se encontró que las áreas importantes de encuentro de estas Xs serían: fuerza motriz, factor de potencia, iluminación, aplicaciones térmicas, sistemas de distribución y adecuado manejo operacional.

De igual forma en la etapa de definición se conforma el equipo de trabajo, se realiza un planteamiento escrito del problema y su oportunidad (figura 1), se define el alcance del proyecto (figura 2) se establecen los objetivos y se plantea un cronograma inicial con metas y métricas del proyecto. En esta etapa también se evalúa el impacto financiero del problema y de su posible solución.

Un resumen de la etapa de definición es:

**Titulo.** Reducción de Gasto Energético Eléctrico (RGEE).

**Equipo de Trabajo.** Equipo multidisciplinario con asesoría de expertos.

**Objetivo General.** Deberá ser concreto, lograble, relevante, y se expresa en términos de qué, cómo y para qué, cuánto y cuándo. Debe incluir las métricas primarias y secundarias, su estado actual y las metas respectivas.

**Objetivos Específicos.** La suma de los objetivos específicos debe permitir lograr el objetivo general.

**Métrica.** Consumo kw-hr/ tonelada (parque industrial Sumicol)

**Meta.** Pasar de 54 kw-hr/ton a 51 kw-hr/ton

**Cronograma inicial.** 6 meses

**Beneficio estimado a 1 año.** Col \$110 millones

### DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

• Problema/ Oportunidad

Altos costos energéticos han creado la necesidad de implementar políticas, estándares de uso racional de energía y proyectos que conduzcan a la optimización y conservación de ésta

Como enfrentarlo?

Optimizando

- Fuerza Motriz
- Factor de Potencia
- Iluminación
- Aplicaciones térmicas
- Sistema Distribución
- Cultura de ahorro energético



REDUCCION DEL GASTO ENERGETICO ELECTRICO -PI-SM

corona

Figura 1. Análisis de problema/oportunidad

### ALCANCE

Mapa de proceso Nivel 1

Mapa de Proceso General

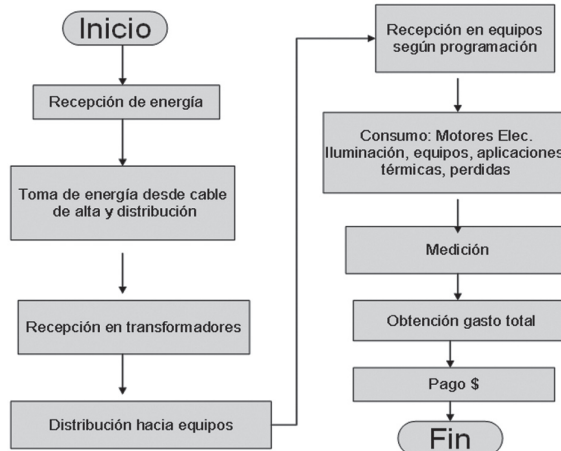
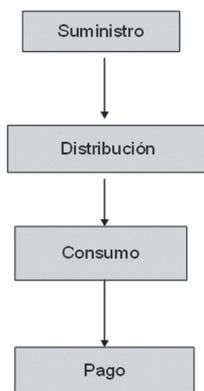
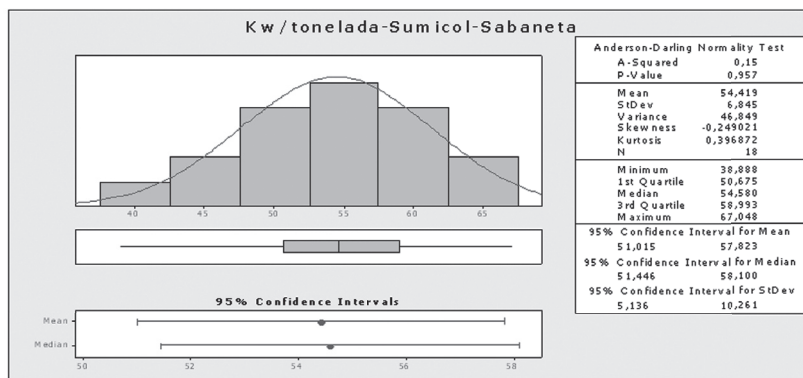


Figura 2. Mapa de procesos para consumo de energía eléctrica-Sumicol-Sabaneta. Determinación del alcance

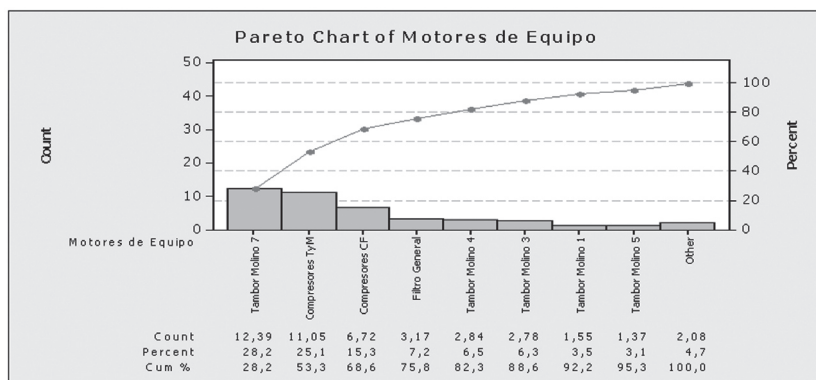
## ETAPA DE MEDICIÓN

Durante la fase de *medir*, se prioriza sobre el comportamiento en cuanto a su promedio y variación de la métrica primaria kw-hr/ tonelada a partir de la información histórica registrada, tal como se observa en la gráfica 1. Del mismo modo, la estadística básica es ampliamente utilizada para obtener el tipo de distribución del consumo de energía por tonelada e identificar los patrones de comportamiento de otros parámetros como energía activa y reactiva, franjas horarias en el día donde el consumo de energía es más alto y obtención de valores promedio históricos de factores de potencia mes a mes. Los gráficos de Pareto (gráfico 2) son de gran ayuda para identificar las plantas y equipos que mayor aporte hacen al consumo de energía eléctrica en el parque industrial.

### Histograma para métrica primaria (Kw-hr/tonelada)



**Gráfica 1. Estadística básica para identificar promedio y variación, principalmente**



**Gráfica 2. Ejemplo de gráfico Pareto por equipo según su aporte al consumo de energía eléctrica en el parque industrial Sumicol**

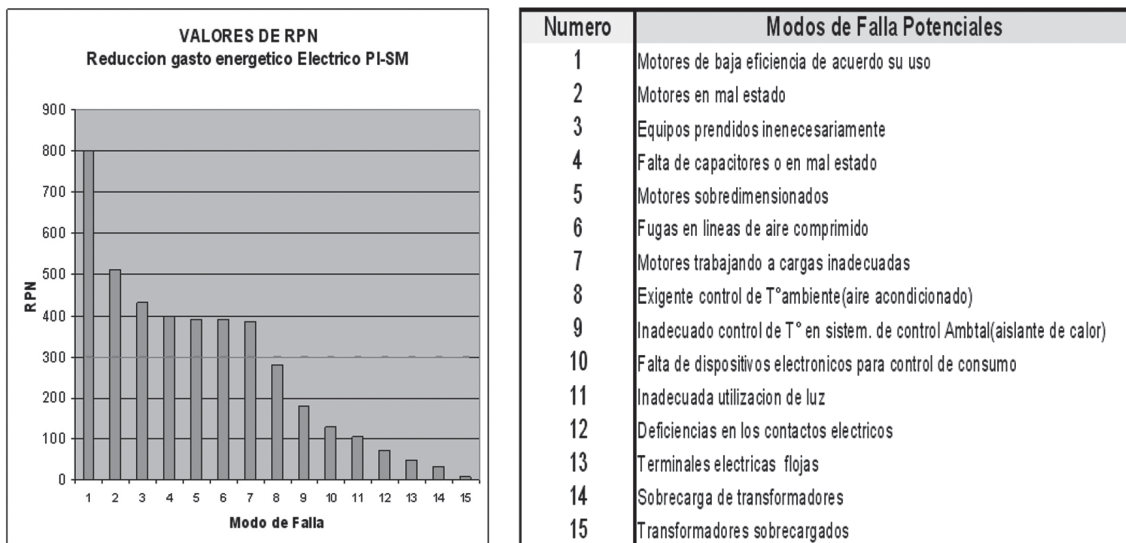
Otra herramienta muy importante utilizada en la fase de medición es la matriz de análisis del modo y efecto de falla.

*Matriz de análisis del modo y efecto de falla (AMEF):*

Técnica analítica utilizada como medio para asegurar que, dentro de lo posible, modos potenciales de falla y sus causas asociadas hayan sido considerados y analizados.

Modo potencial de falla: Es la forma en que es posible que un proceso falle. Para la realización de este análisis dentro del proyecto de reducción energética se toma como base el mapa de proceso de nivel I (gráfico 3) analizando por separado cada una de las etapas y sus posibles modos y efectos de falla. Para realizar lo anterior es necesario calcular el Número de Prioridad de Riesgo (RPN) para cada uno de los modos de falla. El RPN se calcula mediante la multiplicación de tres índices, que son severidad, ocurrencia y detección, analizados para cada uno de los modos.

La gráfica 3 nos muestra los valores de RPN para los principales modos de falla analizados que producen un alto consumo de energía eléctrica:



**Gráfica 3. Modos de falla**

En esta etapa de igual forma se verifica el adecuado sistema de medición Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R), en cuanto a la toma de mediciones de consumo de energía eléctrica en el parque industrial. Adicionalmente se realizan análisis de capacidad si se tiene algún límite de especificación en el consumo de energía eléctrica, que para este caso específico tiene como límite superior establecido 51 kw-hr por tonelada.

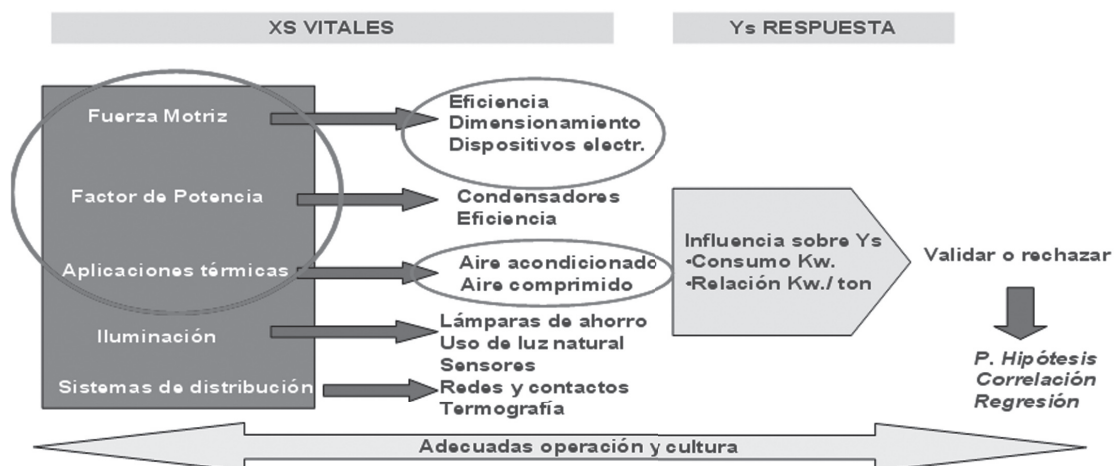
### Etapa de Analizar:

Siguiendo la ecuación de resolución de problemas, durante esta fase se identifican las distintas “X” que son causa de que “Y”, es decir la relación consumo kw-hr por tonelada, se esté comportando de una manera inaceptable. Al identificar las distintas “X” se usa la prueba de hipótesis, ya sea para verificar o para desechar las diversas teorías o supuestos que el equipo ha desarrollado en torno a los sistemas causales que afectan el consumo de energía por tonelada en el parque industrial de Sumicol. La gráfica 4 muestra las principales “X” vitales que impactan la “Y” respuesta, que es consumo kw-hr por tonelada.

Las pruebas de hipótesis utilizadas en esta etapa fueron:

- La prueba T para una muestra donde se pudo verificar consumo promedio mensual de energía activa en la época en la que se inició el proyecto.
- Prueba T para dos muestras: se validó desde el punto vista estadístico la disminución en consumo de energía, al cambiar motores a una dimensión menor en unos tanques de mezclado y se pudo comprobar adicionalmente la reducción de consumo de energía eléctrica con la instalación de variadores de velocidad acoplados a compresores, bombas centrífugas y ventiladores que trabajan con carga variable.
- Prueba Anova: con esta prueba se pudo comprobar estadísticamente la diferencia en consumo de energía eléctrica en diferentes franjas horarias durante el día.

### Influencia de “X” vitales sobre las “Y” pruebas de hipótesis-correlación



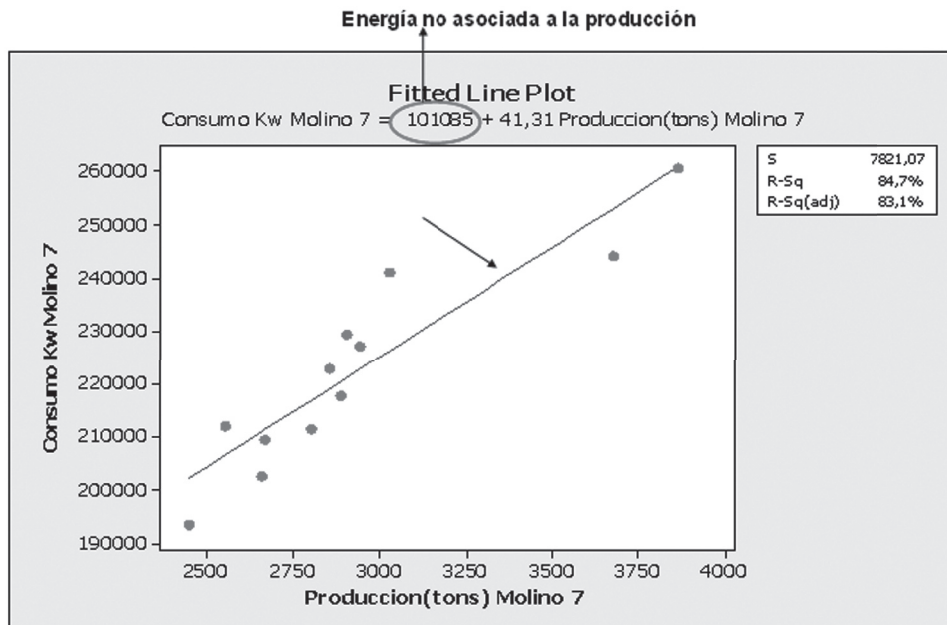
Gráfica 4. Esquema de relación X vitales y Y respuesta

### Diagramas de dispersión y correlación:

Este tipo de análisis nos muestra la relación entre dos variables  $x$  y  $y$  que, para el caso industrial, es de gran importancia para conocer la relación consumo kw-hr vs producción mes a mes, ya que revela información importante del proceso y permite de igual forma realizar análisis predictivos .

Con estos análisis se puede determinar la influencia de factores productivos de las empresas sobre las variables energéticas y establecer nuevas variables de control. El gráfico energía versus producción puede realizarse por tipo de portador energético, área o equipo, considerando para cada caso la producción asociada al portador. En la gráfico 5 se observa un análisis de correlación entre el consumo kw-hr y las toneladas producidas en un molino de bolas. La correlación entre estas dos variables es positiva fuerte, con un coeficiente de correlación de 84,7%, y la ecuación asociada para predecir consumo es una línea recta de tipo  $y= mx+b$ .

### Análisis de correlación y regresión



**Gráfica 5. Análisis de correlación consumo kw-hr versus producción para un molino en el parque industrial Sumicol**

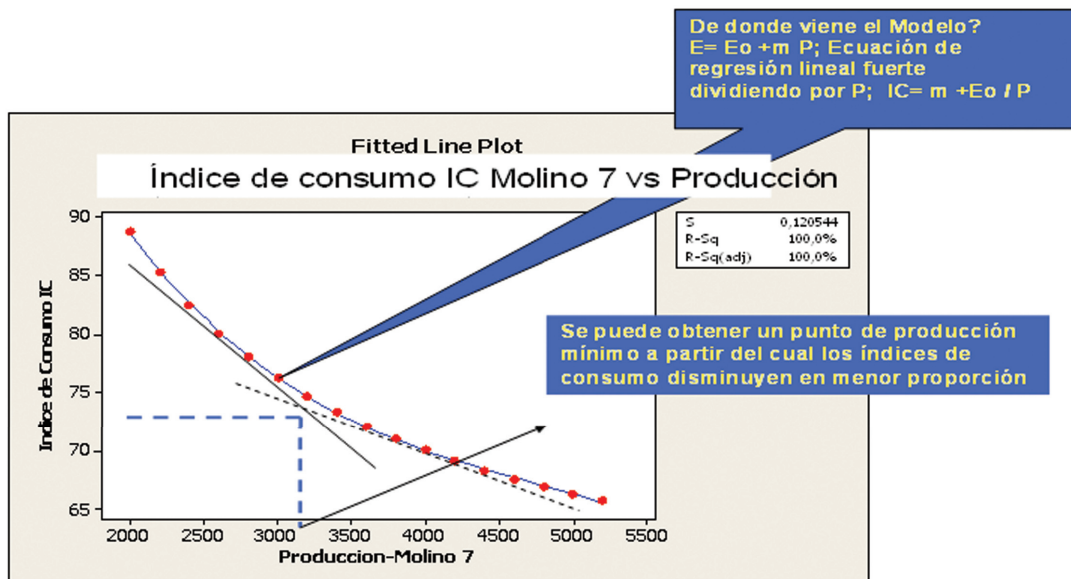
### DIAGRAMA ÍNDICE DE CONSUMO VERSUS PRODUCCIÓN

Este diagrama se realiza después de haber obtenido el gráfico de energía vs. producción y la ecuación  $y = mx + b$  con un nivel de correlación

significativo. El gráfico índice de consumo (kw-hr/tonelada) vs producción es una hipérbola equilátera, con asíntota en el eje x, al valor de la pendiente “m” de la expresión de energía en función de la producción. En la gráfico 6 se observa el modelo IC, que es kw-hr por tonelada vs. producción en toneladas.

Como se observa en la gráfica, producciones menores a las 3100 toneladas conllevan a un aumento en mayor proporción del índice kw-hr por tonelada, haciendo ineficiente el consumo de energía eléctrica frente a la producción obtenida.

### Análisis de regresión

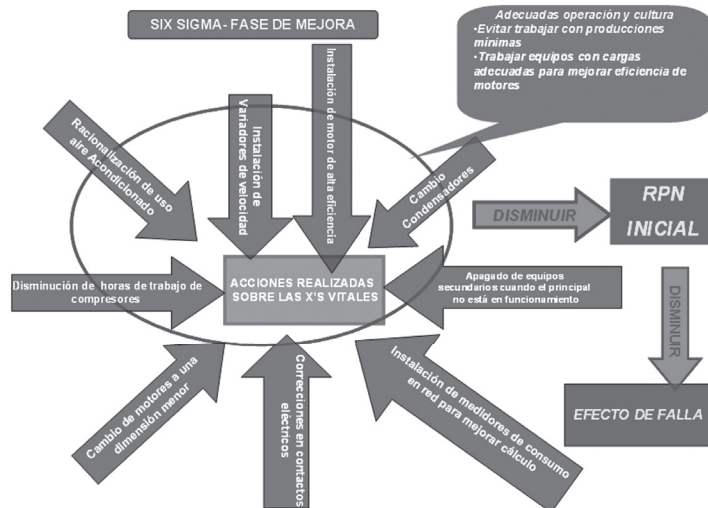


**Gráfica 6. Análisis de regresión índice de consumo IC vs. producción para un molino**

### ETAPA DE MEJORAR

En esta fase se hace uso del diseño experimental para identificar las relaciones que existen entre las “X” y se llevan a cabo las implementaciones de mejora sobre las “X” vitales encontradas en la etapa de analizar. Las “X” son variables independientes con respecto a “Y”, pero eso no significa que sean independientes entre sí. En los proyectos energéticos, el diseño de experimentos es bien importante para encontrar condiciones de óptimo consumo energético mediante la apropiada interacción de las diferentes variables de proceso en la plantas de manufactura. Por ejemplo, mediante la realización de un DOE se pudo encontrar la interacción correcta entre factores tales como carga de trabajo, variador de velocidad y tipología de motor (estándar o de alta eficiencia).

Los mejoramientos realizados en el proyecto que actuaron sobre las “X” de mal desempeño se muestran en la figura 3. Lo anterior, de igual forma, permite disminuir el número de prioridad del riesgo (RPN) para los modos de falla y, por lo tanto, disminuir el consumo de energía eléctrica por tonelada en el parque industrial Sumicol.



**Figura 3. Mejoramientos realizados sobre “X” de mal desempeño**

Con la ayuda del sistema de Gestión Integral de Sumicol, en la etapa de mejora se desplegó una campaña importante para el adecuado uso energético en todas las instalaciones del parque industrial. Para tal campaña se envía información vía electrónica sobre alguna aplicación específica para ahorrar energía.

## ETAPA DE CONTROLAR

En la fase de controlar se aprovechan herramientas de calidad como las pruebas de errores, los sistemas de calidad y los cuadros de control, para asegurar que la variable respuesta kw-hr por tonelada sea sustentable. De igual forma, se verifica el funcionamiento del proceso estableciendo control sobre las “X” vitales en los niveles óptimos y que hacen posible el buen desempeño de la “Y”. Algunas de las actividades de control con su elemento de control y la acción desarrollada para el proyecto se muestran en la figura 4. De igual forma, se establecen gráficos de control por ejemplo para la energía reactiva y el factor de potencia, para evitar algún tipo de sobre costo. Altos consumo de energía reactiva conllevan mayores pagos de tarifa (gráfica 7).

Los dispositivos Poka Yoke que permiten hacer un trabajo 100% libre de errores todo el tiempo, ayudaron a asegurar de manera importante el control sobre

algunas variables de alto impacto sobre el consumo de energía eléctrica. Algunos ejemplos son:

- Instalación de sistema de control de apagado automático en las noches y los fines de semana en el edificio administrativo.
- Switches on- off cerca a las máquinas de los procesos productivos.
- Instalación de sistema automático de control de disparos de aire comprimido para limpieza en las mangas en los filtros de captación de polvo, según el diferencial de presión entre la entrada y la salida de estos.

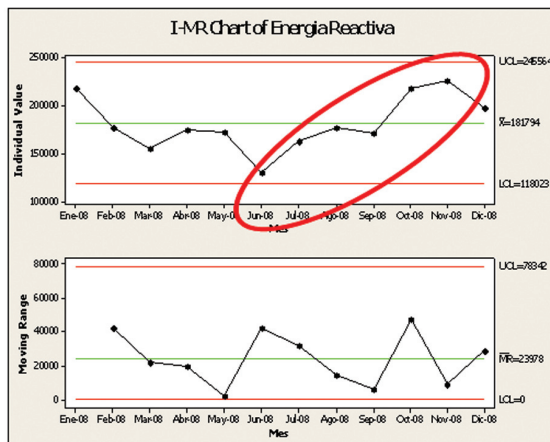
### Actividades de control

ELEMENTO DE CONTROL	ACCIÓN DESARROLLADA
Equipos prendidos innecesariamente	Registro de identificación y control de corrección de enclavamientos anclados. Enclavamientos nuevos circunstanciales deben ser registrados hasta ser corregidos
Factor de potencia	Registro de control de adecuado funcionamiento de los condensadores Gráficos de control del factor de potencia
Consumo de energía reactiva	Gráfico de control de consumo de energía reactiva
Deficiencia en contactos, terminales flojos	Control termográfico
Transformadores	Plan de mantenimiento anual

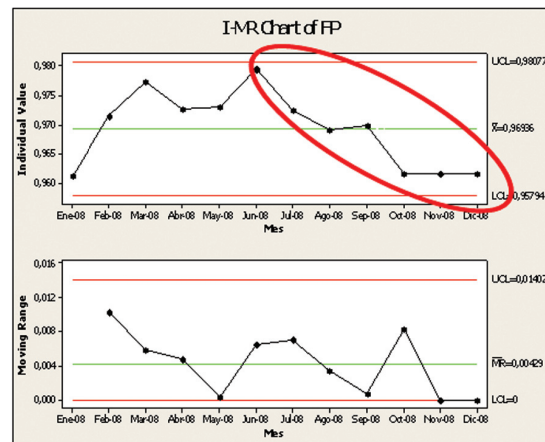
Figura 4. Acciones realizadas en la fase “controlar”

### Gráficos de control

#### CONTROL ENERGIA REACTIVA

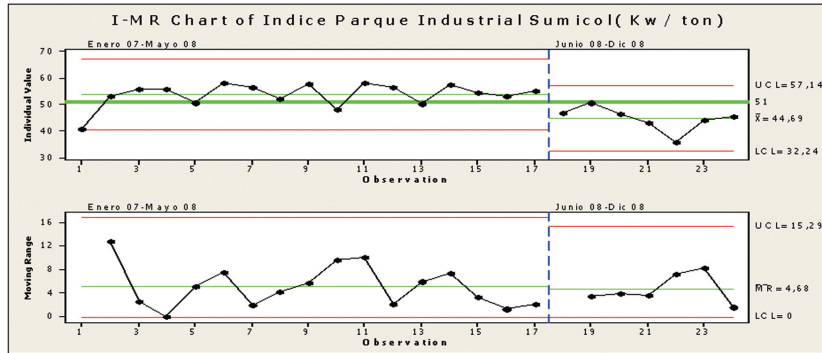


#### CONTROL FACTOR DE POTENCIA



Gráfica 7. Ejemplo de gráfico de control sobre energía reactiva y factor de potencia

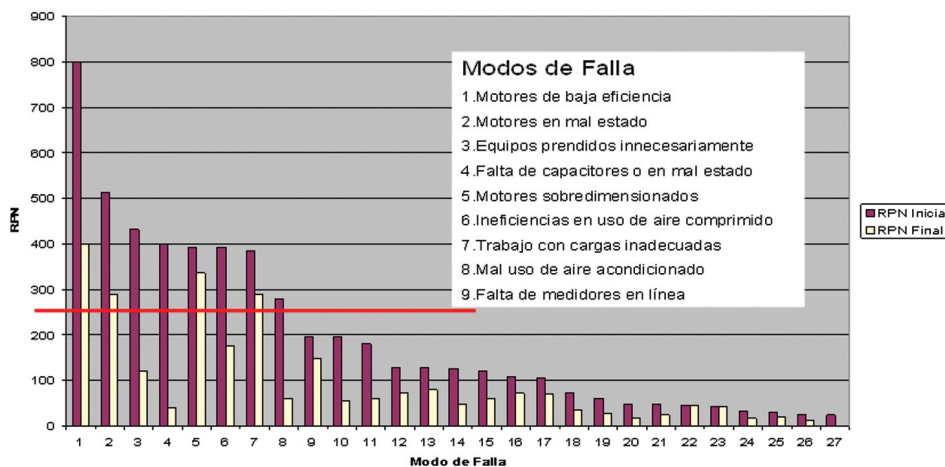
Los resultados obtenidos después de finalizada la ejecución de cada una de las fases de la metodología Seis Sigma se verifica mediante el cambio en el comportamiento de la métrica primaria establecida desde el inicio del proyecto (consumo kw-hr / tonelada producida), tal como se muestra en la gráfica 8. Este cambio implica una disminución en el consumo promedio y una disminución en el rangote variación.



**Gráfica 8. Comportamiento de consumo de kw-hr por tonelada antes y después del proyecto.**

En la evaluación de resultados se debe verificar la disminución de los números de prioridad del riesgo para los diferentes modos de falla, después de todas las acciones implementadas en el proyecto.

En la gráfica 9 se ilustran los RPN comparativos antes y después de ejecutado el proyecto, para los principales modos de falla. Como se observa, estos disminuyen luego de implementadas las acciones de mejora.



**Gráfica 9. Gráfico comparativo RPN antes y después de acciones de mejora**

## CONCLUSIONES

- La aplicación de las herramientas de la metodología Seis Sigma con su ciclo DMAIC y el inicio de obtención de cultura en cuanto a la preservación energética por parte de las personas que trabajan en el parque industrial de Sumicol en Sabaneta, han permitido una optimización del gasto energético eléctrico por tonelada.
- La identificación de Paretos y “X” que impactan considerablemente el consumo por tonelada desde las etapas iniciales, permiten orientar más fácilmente la obtención del logro de resultados del proyecto.
- Adecuadas prácticas de manejo operacional en la planta de manufactura, tales como instalación de variadores de velocidad, buen uso de motores y corrección de enclavamientos, aseguran en gran medida un óptimo consumo energético.
- Los modelos de gestión energética deben ser complementados con herramientas de mejora tales como Seis Sigma, para optimizar el consumo energético.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ADAME MARTÍNEZ, Francisco David; ADAME Martínez, Miguel Ángel y BELLOSO PÉREZ, Enrique. Manual de gestión energética de las corporaciones locales. España: Comares, 2003, 92 paginas.
2. BRUE, Greg. Six sigma for managers. Estados Unidos: Mc Graw- Hill, 2002. 179 p.
3. CAMPOS AVELLA, Juan Carlos, *et al.* Sistemas de gestión integral de la energía: guía para la implementación. [en línea]. Bogotá: UPME, 2007. [citado 23 sept., 2009]. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Inicio/GestiónIntegraldeEnergía/tabid/130/Default.aspx>
4. COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Guía didáctica para el desarrollo de auditorías energéticas. [en línea]. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2007 . [citado 23 sept., 2009]. Disponible en: [http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/URE/Auditorias\\_Energeticas.pdf](http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/URE/Auditorias_Energeticas.pdf)