



## Análisis del flujo de vapor en el área de calderas de un Ingenio Azucarero mediante cartas de control

Dr. Fernando Ortiz Flores<sup>1</sup>  
[ferchilo@prodigy.net.mx](mailto:ferchilo@prodigy.net.mx)

*Instituto Tecnológico de Orizaba  
División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Orizaba, Veracruz, México*

Ing. Lucila Guadalupe Tobón Galicia<sup>2</sup>  
[ltobon19@hotmail.com](mailto:ltobon19@hotmail.com)

Ing. Luis Mejía Fernández<sup>3</sup>  
[luis08@hotmail.com](mailto:luis08@hotmail.com)

Ing. Eduardo Gómez García<sup>4</sup>  
[baruc@hotmail.com](mailto:baruc@hotmail.com)

M.C Ana María Alvarado Lassmann<sup>5</sup>  
[lassmann@prodigy.net.mx](mailto:lassmann@prodigy.net.mx)

### Resumen

El presente trabajo muestra la aplicación de la herramienta de ingeniería industrial denominada carta de control estadístico del proceso en el área de calderas de un Ingenio Azucarero, en la región de Veracruz, dedicado a la elaboración de azúcar estándar y mascabado de caña de azúcar, debido a que es un área que presenta interés por mejorar continuamente su proceso.

El análisis del comportamiento del flujo de vapor el área de calderas, en particular de las calderas seis, siete, ocho y nueve, se presentará mediante una comparación del uso de cartas de control X-S y cartas de control para mediciones individuales. Los resultados de la aplicación indicarán si el proceso de generación de vapor de las calderas se encuentra bajo control estadístico o no, con la finalidad de que el superintendente del área conozca el comportamiento de éste e identifique las áreas de oportunidad para la mejora del mismo.

**Palabras claves:** Cartas de control, Calderas, Ingenio Azucarero.

<sup>1</sup> Profesor de tiempo completo del área de posgrado del Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz. (autor corresponsal)

<sup>2</sup> Alumna del cuarto semestre de la maestría en ingeniería industrial del Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz

<sup>3</sup> Alumno del cuarto semestre de la maestría en ingeniería industrial del Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz

<sup>4</sup> Alumno del cuarto semestre de la maestría en ingeniería industrial del Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz

<sup>5</sup> Profesor de tiempo completo del área de sistemas computacionales del Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz.



## Introducción

Hoy en día las organizaciones enfrentan retos derivados de la creciente competitividad y la apertura y globalización de los mercados, obligándolas a buscar un progreso y a mejorar continuamente, empleando para ello técnicas que les permitan lograr el control y la mejora de sus procesos, tal como el control estadístico del proceso (SPC, de las siglas en inglés de *Statistical Process Control*). El SPC, que es un conjunto de siete herramientas para resolver problemas, es muy útil para conseguir la estabilidad y mejorar la capacidad del mismo proceso comprimiendo la variabilidad pues la meta final del SPC es precisamente la eliminación de la variabilidad (Pérez, 1999). Una de estas herramientas, en particular, que ayuda a monitorear procesos en línea con la intención de ver si el proceso está bajo control son las denominadas cartas de control.

En éste artículo se describe el caso de una empresa que desarrolló cartas de control X-S y cartas de mediciones individuales para observar el comportamiento de uno de sus procesos operativos: Las calderas 6, 7, 8 y 9 en la planta de vapor. Así mismo, el artículo menciona la complicación encontrada en el uso de las cartas de control X-S y se menciona una alternativa de solución a este inconveniente: el uso de las cartas de mediciones individuales.

## Metodología empleada en el desarrollo de las cartas de control

Para el éxito en el desarrollo de las cartas de control del flujo de vapor de las calderas seis, siete, ocho y nueve, del ingenio azucarero, en estudio se utilizó la siguiente metodología:

- A. Obtención de datos
- B. Prueba de normalidad de los datos
- C. Elaboración de cartas de control X-S
- D. Elaboración de cartas de control para mediciones individuales

## Obtención de datos

Para la obtención de datos se contó con el apoyo incondicional del superintendente del área de calderas del Ingenio en estudio, ya que él permitió el acceso a un programa de control de procesos, llamado "Grácil", para adquirir los datos necesarios para el desarrollo de las cartas de control. Grácil es un programa informático que realiza acciones de control en forma automática, emite a una base de datos de Excel el valor de las mediciones realizadas cada tres segundos y presenta gráficamente el comportamiento de cada una de las variables monitoreadas: flujo de vapor, temperatura del vapor de salida, nivel del domo, presión de vapor entre otras; en el proceso de planta de vapor.

Para el desarrollo de las cartas de control se utilizaron los registros de la variable "flujo de vapor" de las calderas seis, siete, ocho y nueve, del mes de marzo de la zafra 2008/2009: 5760 datos por día durante 27 días.

## Prueba de normalidad de los datos

Un supuesto fundamental para el desarrollo de cartas de control X-S es que la distribución fundamental de los datos debe presentar normalidad (Pérez, 1999); si se tiene normalidad en la distribución es posible obtener límites de probabilidad exactos para las cartas de control. Considerando este criterio, y dado que se pretenden obtener cartas de control X-S, se probó la normalidad de los datos obtenidos mediante una prueba de bondad de ajuste; ya que ésta permite comprobar si un conjunto de datos extraídos aleatoriamente de una población sigue cierta función de densidad o distribución de probabilidad, es decir, mide la variabilidad de los datos observados con



respecto a los valores esperados. La variabilidad es medida con un estadístico de prueba que sigue una distribución ji-cuadrada.

El proceso realizado para probar la normalidad de los datos obtenidos fue el siguiente:

- A. Se determinó el promedio de los datos por día de la variable en análisis: flujo de vapor de las calderas 6, 7, 8 y 9 (cuadro 1, 2, 3, 4).

Cuadro 1. Datos del flujo de vapor promedio diario de la caldera 6.

<b>Flujo de vapor promedio diario de la caldera 6</b>														
Días del mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Media del Flujo de Vapor	36	31	36	38	37	36	36	34	32	44	43	34	35	33
Días del mes	15	16	17	18	19	20	21							
Media del Flujo de Vapor	32	34	36	35	34	30	32							

Cuadro 2. Datos del flujo de vapor promedio diario de la caldera 7.

<b>Flujo de vapor promedio diario de la caldera 7</b>														
Días del mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Media del Flujo de Vapor	54	42	55	54	54	54	55	53	43	53	58	54	53	54
Días del mes	15	16	17	18	19	20	21	22	23					
Media del Flujo de Vapor	47	58	56	51	60	55	53	40	43					

Cuadro 3. Datos del flujo de vapor promedio diario de la caldera 8.

<b>Flujo de vapor promedio diario de la caldera 8</b>														
Días del mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Media del Flujo de Vapor	48	45	50	52	52	51	52	49	45	45	47	45	43	41
Días del mes	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Media del Flujo de Vapor	47	46	44	42	45	55	52	43	47	53	48	46		

Cuadro 4. Datos del flujo de vapor promedio diario de la caldera.

<b>Flujo de vapor promedio diario de la caldera 9</b>														
Días del mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Media del Flujo de Vapor	81	72	80	78	75	81	80	79	71	87	85	76	80	80
Días del mes	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Media del Flujo de Vapor	62	78	83	84	84	85	83	64	70	85	97	84	88	



B. Se estableció el siguiente modelo probabilístico para determinar si los datos se ajustan a una distribución normal.

**H<sub>0</sub>**: Los valores observados son iguales a los valores esperados.

**H<sub>1</sub>**: Los valores observados son diferentes a los valores esperados.

C. Se determinó el nivel de significancia de 5% ( $\alpha=0.05$ ).

D. Se determinó que la muestra aleatoria son los promedios diarios que se ilustran en los cuadros 1 al 4 ( $n= 21$ ,  $n=23$ ,  $n=26$ ,  $n=27$ ; respectivamente).

E. Se realizó un histograma para cada caldera (Figuras 1 a 4), con ayuda de Excel, de los datos mostrados en los cuadros 1 a 4, respectivamente, debido a que era necesario observar el arreglo de los datos por orden de magnitud. Estos histogramas permiten ver las siguientes propiedades: forma, localización o tendencia central y dispersión o expansión.

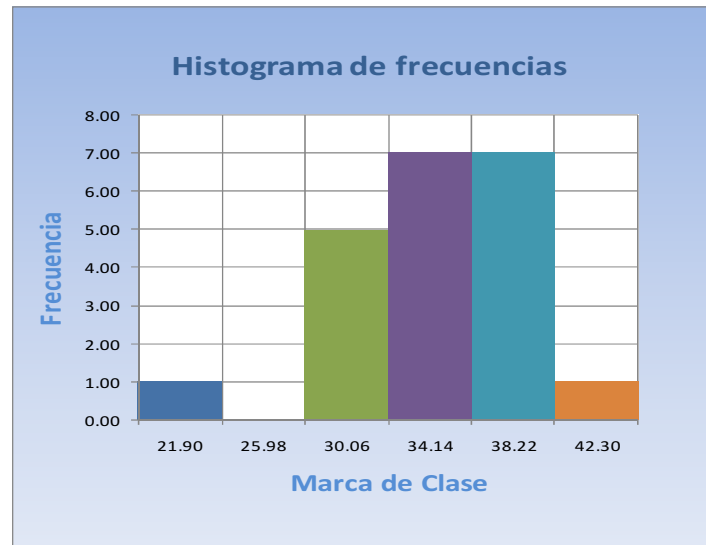


Figura 1. Histograma de frecuencias de la caldera 6.



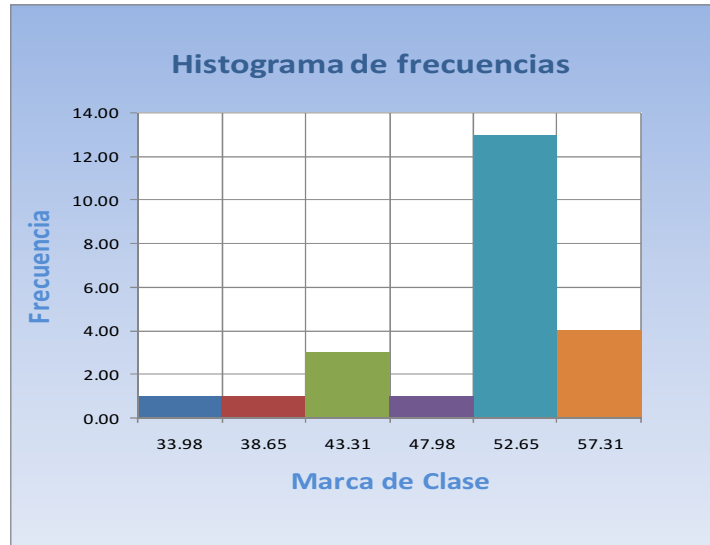


Figura 2. Histograma de frecuencias de la caldera 7.

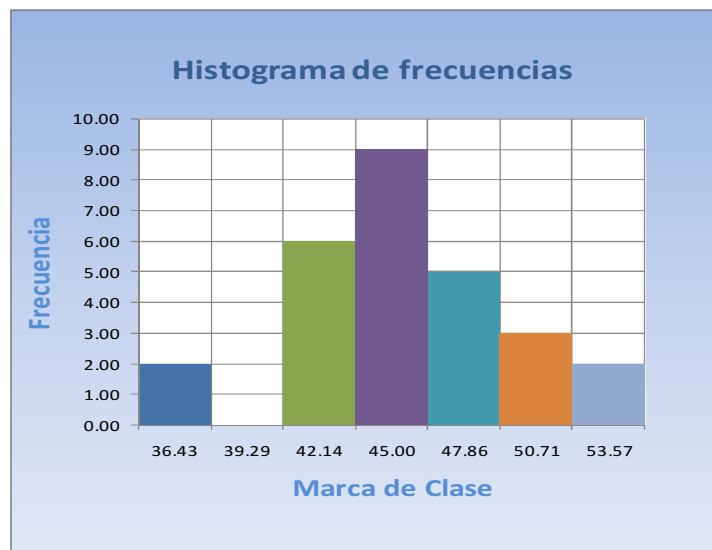


Figura 3. Histograma de frecuencias de la caldera 8.



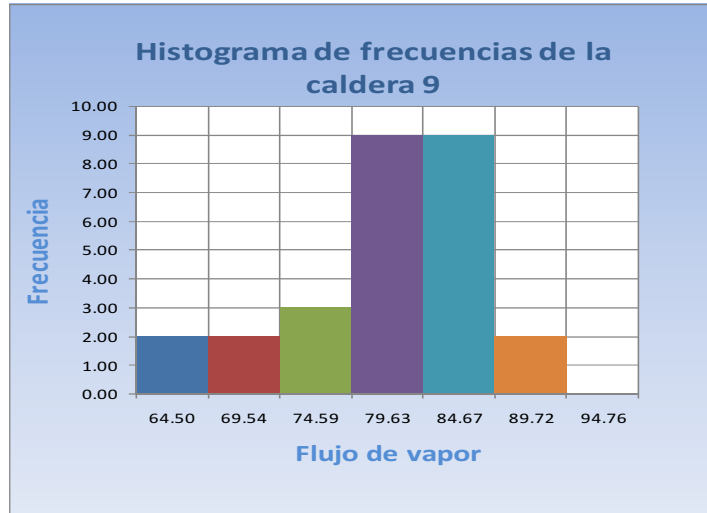


Figura 4. Histograma de frecuencias de la caldera 9.

- F. Se calcularon las frecuencias esperadas ( $E_i$ ) de cada una de las seis clases del histograma en una hoja de Excel con la ecuación 1.

$$E_i = f p_i \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$f p_i$  = Valor de la frecuencia esperada que será comparado con el estadístico de prueba; en éste caso  $X^2$

- G. Se calculó el estadístico de prueba ( $X^2$ ) con la ecuación 2. Los cuadros 5, 6, 7 y 8 contienen toda la información para el cálculo del estadístico de prueba.

$$X^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \dots \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

Cuadro 5. Datos para el cálculo del estadístico  $X^2$  de la caldera 6.

No. de Clase	Intervalo Límite Inferior $Z_1$	Intervalo Límite Superior $Z_2$	Marca de Clase $Z$	Frecuencia Observada $O_i$	$P(Z_1 < Z < Z_2)^6$	$E_i f p_i$	$\chi^2$
1	19.86	23.94	21.90	1	0.01	0.26	2.08
2	23.94	28.02	25.98	0	0.07	1.54	1.54
3	28.02	32.09	30.06	5	0.21	4.60	0.03
4	32.09	36.17	34.14	7	0.32	6.90	0.00
5	36.17	40.25	38.22	7	0.25	5.23	0.59
6	40.25	44.33	42.30	1	0.09	1.99	0.49
			Total de frecuencias(f)	21		Valor X2 Calculado	<b>4.76</b>

<sup>6</sup> Este valor se cálculo en el software Excel, colocando la fórmula: **DISTRIBUCIÓN.NORMAL(LÍMITE SUPERIOR DE LA CLASE, MEDIA DE LOS DATOS, DESVIACIÓN ESTANDAR DE LOS DATOS, VERDADERO)-DISTRIBUCION.NORMAL(LÍMITE INFERIOR DE LA CLASE, MEDIA DE LOS DATOS, DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS DATOS, VERDADERO)**  
 Para este caso, en la primera clase: **DISTRIBUCIÓN. NORMAL(23.94,35.21,6.7,VERDADERO)-DISTRIBUCIÓN NORMAL(19.86,51.3,6.7,VERDADERO).**

La media de los datos se obtuvo del cuadro 18

Cuadro 6. Datos para el cálculo del estadístico  $\chi^2$  de la caldera 7.

No. de Clase	Intervalo		Marca de Clase Z	Frecuencia Observada $O_i$	P(Z1<Z<Z2)	Ei $fp_i$	$\chi^2$
	Límite Inferior $Z_1$	Límite Superior $Z_2$					
1	31.64	36.31	33.98	1	0.01	0.23	2.41
2	36.31	40.97	38.65	1	0.04	1.10	0.01
3	40.97	45.64	43.31	3	0.13	3.16	0.00
4	45.64	50.31	47.98	1	0.24	5.63	3.80
5	50.31	54.97	52.65	13	0.26	6.20	7.42
6	54.97	59.64	57.31	4	0.18	4.24	0.01
			Total de frecuencias(f)	23		Valor $\chi^2$ Calculado	<b>13.69</b>

Cuadro 7. Datos para el cálculo del estadístico  $\chi^2$  de la caldera 8.

No. de Clase	Intervalo		Marca de Clase Z	Frecuencia Observada $O_i$	P(Z1<Z<Z2)	Ei $fp_i$	$\chi^2$
	Límite Inferior $Z_1$	Límite Superior $Z_2$					
1	35.00	37.86	36.43	2	0.03	0.88	1.42
2	37.86	40.71	39.29	0	0.09	2.50	2.50
3	40.71	43.57	42.14	6	0.18	4.86	0.27
4	43.57	46.43	45.00	9	0.24	6.50	0.96
5	46.43	49.29	47.86	5	0.22	5.98	0.16
6	49.29	52.14	50.71	3	0.14	3.78	0.16
7	52.14	55.00	53.57	2	0.06	1.64	0.08
			Total de frecuencias(f)	26		Valor $\chi^2$ Calculado	<b>5.54</b>

Cuadro 8. Datos para el cálculo del estadístico  $\chi^2$  de la caldera 9.

No. de Clase	Intervalo		Marca de Clase Z	Frecuencia Observada $O_i$	P(Z1<Z<Z2)	Ei $fp_i$	$\chi^2$
	Límite Inferior $Z_1$	Límite Superior $Z_2$					
1	61.98	67.02	64.50	2	0.03	0.87	1.47
2	67.02	72.06	69.54	2	0.10	2.74	0.20
3	72.06	77.11	74.59	3	0.20	5.52	1.15
4	77.11	82.15	79.63	9	0.26	7.15	0.48
5	82.15	87.20	84.67	9	0.22	5.96	1.55
6	87.20	92.24	89.72	2	0.12	3.19	0.44
7	92.24	97.28	94.76	0	0.04	1.09	1.09
			Total de frecuencias(f)	27		Valor $\chi^2$ Calculado	<b>6.38</b>

H. Se calculó la zona crítica de cada una de las calderas:

- Para la caldera 6 es  $\chi^2_{\alpha, k-p-1}$ . Dado que  $\alpha=0.05$ ,  $K= 6$  clases,  $p= 2$  parámetros estimados  $(\sigma, \bar{x})$ , se obtiene que  $\chi^2_{0.05,3}=7.81$
- Para la caldera 7 es  $\chi^2_{\alpha, k-p-1}$ . Dado que  $\alpha=0.05$ ,  $K= 6$  clases,  $p= 2$  parámetros estimados  $(\sigma, \bar{x})$ , se obtiene que  $\chi^2_{0.05,3}=7.81$
- Para la caldera 8 es  $\chi^2_{\alpha, k-p-1}$ . Dado que como  $\alpha=0.05$ ,  $K= 7$  clases,  $p= 2$  parámetros estimados  $(\sigma, \bar{x})$ , se obtiene que  $\chi^2_{0.05,4}=9.49$



- Para la caldera 9 es  $X_{\alpha, k-p-1}^2$ . Dado que  $\alpha=0.05$ ,  $K= 7$  clases,  $p= 2$  parámetros estimados  $(\sigma, \bar{x})$ , se obtiene que  $X_{0.05,4}^2=9.49$
- I. Se comparó el estadístico de prueba de cada una de las calderas con su respectiva zona crítica :
- Para la caldera 6. Se comparó el estadístico  $x^2=4.76$  con la zona crítica  $X_{\alpha, k-p-1}^2=7.81$  de la siguiente forma  $X^2 > X_{\alpha, k-p-1}^2$  por lo tanto se tiene que  $4.76 < 7.81$ . Dado que  $X^2 < X_{\alpha, k-p-1}^2$  se concluye que los valores observados son iguales a los valores esperados o en otras palabras los datos siguen un comportamiento normal.
  - Para la caldera 7. Se comparó el estadístico  $x^2=13.69$  con la zona crítica  $X_{\alpha, k-p-1}^2=7.81$  de la siguiente forma  $X^2 > X_{\alpha, k-p-1}^2$  por lo tanto se tiene que  $13.69 < 7.81$ . Dado que  $X^2 < X_{\alpha, k-p-1}^2$  se concluye que los valores observados son iguales a los valores esperados o en otras palabras los datos siguen un comportamiento normal.
  - Para la caldera 8. Se comparó el estadístico  $x^2=5.54$  con la zona crítica  $X_{\alpha, k-p-1}^2=9.49$  de la siguiente forma  $X^2 > X_{\alpha, k-p-1}^2$  por lo tanto se tiene que  $5.54 < 9.49$ . Dado que  $X^2 < X_{\alpha, k-p-1}^2$  se concluye que los valores observados son iguales a los valores esperados o en otras palabras los datos siguen un comportamiento normal.
  - Para la caldera 9. Se comparó es estadístico  $x^2=6.38$  con la zona crítica  $X_{\alpha, k-p-1}^2=9.49$  de la siguiente forma  $X^2 > X_{\alpha, k-p-1}^2$  por lo tanto se tiene  $6.38 < 9.49$ . Dado que  $X^2 < X_{\alpha, k-p-1}^2$  se concluye que los valores observados son iguales a los valores esperados o en otras palabras los datos siguen un comportamiento normal.

### Elaboración de cartas de control X-S

Las cartas de control "X-S", que son útiles cuando se requiere estimar la desviación estándar de un proceso directamente, en vez de indirectamente o mediante el uso del rango (Montgomery, 2005), se realizaron de la siguiente forma; una vez comprobada la normalidad de los datos:

- A. Se determinó el número de subgrupos y el número de muestras por subgrupo, cuyo caso fue:
- a. 21 subgrupos de 5760 muestras para la caldera 6.
  - b. 23 subgrupos de 5760 muestras para la caldera 7.
  - c. 26 subgrupos de 5760 muestras para la caldera 8.
  - d. 27 subgrupos de 5760 muestras para la caldera 9.
- B. Se calculó el promedio y la desviación estándar por subgrupo. Los cuadros 9, 10, 11, 12 ilustran los resultados.



Cuadro 9. Promedio y desviación estándar por subgrupo de la caldera 6.

<b>Promedio y Desviación Estándar de la caldera 6</b>														
<b>Número de subgrupo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
Promedio	36	31	36	37	38	36	36	34	32	44	43	34	35	33
Desviación Estándar	5	14	6	4	3	5	4	7	8	6	0	8	0	5
<b>Número de subgrupo</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>							
Promedio	32	34	36	35	33	30	32							
Desviación Estándar	9	4	3	5	4	5	8							

Cuadro 10. Promedio y desviación estándar por subgrupo de la caldera 7.

<b>Promedio y Desviación Estándar de la caldera 7</b>														
<b>Número de subgrupo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
Promedio	54	42	55	54	54	54	55	53	43	53	58	54	53	54
Desviación Estándar	9	18	7	6	6	8	6	12	14	10	0	13	0	9
<b>Número de subgrupo</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>				
Promedio	47	58	56	51	60	55	53	40	43					
Desviación Estándar	16	6	6	13	7	7	20	10	7					

Cuadro 11. Promedio y desviación estándar por subgrupo de la caldera 8.

<b>Promedio y Desviación Estándar de la caldera 8</b>														
<b>Número de subgrupo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
Promedio	48	45	50	52	52	51	52	49	45	45	47	45	43	41
Desviación Estándar	4	10	5	3	3	5	3	10	5	0	8	0	5	8
<b>Número de subgrupo</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>		
Promedio	47	46	44	42	45	55	52	43	47	53	48	46		
Desviación Estándar	4	4	6	4	4	6	7	5	8	4	12	14		



Cuadro 12. Promedio y desviación estándar por subgrupo de la caldera 9.

Promedio y Desviación Estándar de la caldera 9														
Número de subgrupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Promedio	81	72	80	78	75	81	80	79	71	87	85	76	80	80
Desviación Estándar	10	16	9	7	14	8	7	13	18	10	0	15	0	10
Número de subgrupo	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Promedio	62	78	83	84	84	85	83	64	70	85	97	84	88	
Desviación Estándar	34	16	7	7	12	9	16	69	7	17	7	26	15	

C. Se calculó la media de los promedios y la media de la desviación estándar. Los resultados se muestran en el cuadro 13.

Cuadro 13. Cuadro de medias y referencias.

	Media de promedios	Media de la desviación estándar	Cuadro utilizado para el cálculo
<b>caldera 6</b>	$\bar{\bar{X}} = 35$	$\bar{S} = 6$	Cuadro 9
<b>caldera 7</b>	$\bar{\bar{X}} = 52$	$\bar{S} = 10$	Cuadro 10
<b>caldera 8</b>	$\bar{\bar{X}} = 46$	$\bar{S} = 6$	Cuadro 11
<b>caldera 9</b>	$\bar{\bar{X}} = 79$	$\bar{S} = 14$	Cuadro 12

D. Se calcularon los límites superior, inferior y central utilizando las fórmula 3, 4 y 5 respectivamente (Gryna, 2007)<sup>7</sup> para obtener las gráficas de control de medias (gráfica X) de las figuras 5, 6, 7 y 8.

$$UCL = \bar{\bar{X}} + A_3\bar{S} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3}$$

$$LC = \bar{\bar{X}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 4}$$

$$LCL = \bar{\bar{X}} - A_3\bar{S} \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

<sup>7</sup> El valor de la constante  $A_3$ , se obtuvo de la tabla 20.4, página 677 del libro de Frank M. Gryna (2007). El valor que se ocupó en este caso fue  $A_3=0.39$

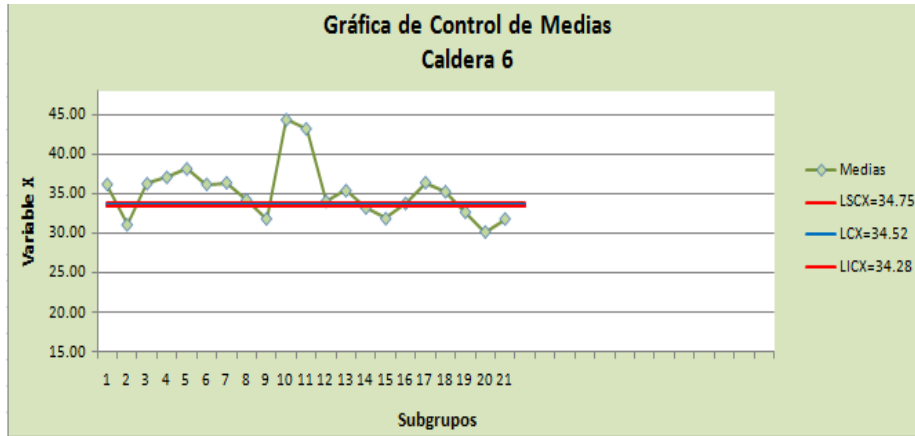


Figura 5. Carta de control X (medias) de la caldera 6.

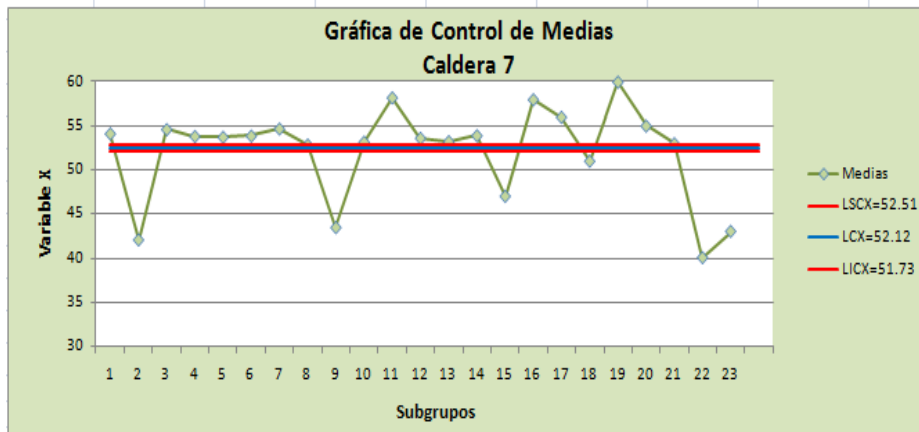


Figura 6. Carta de control X (medias) de la caldera 7.

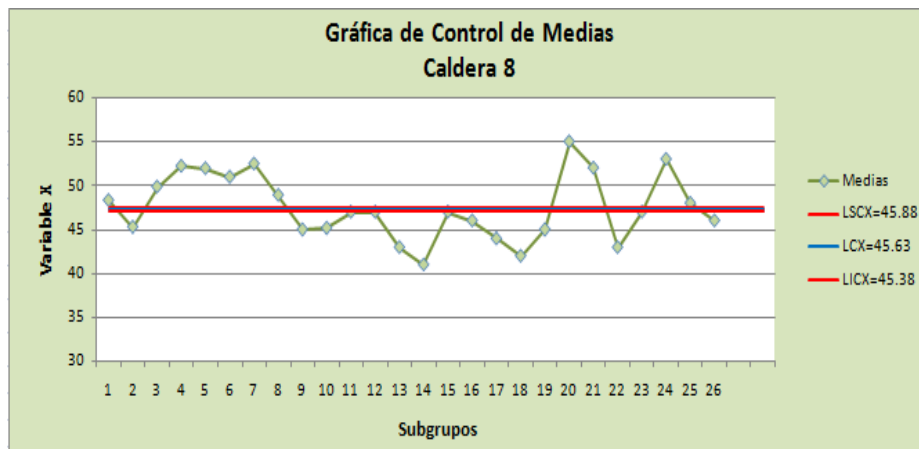


Figura 7. Carta de control X (medias) de la caldera 8.



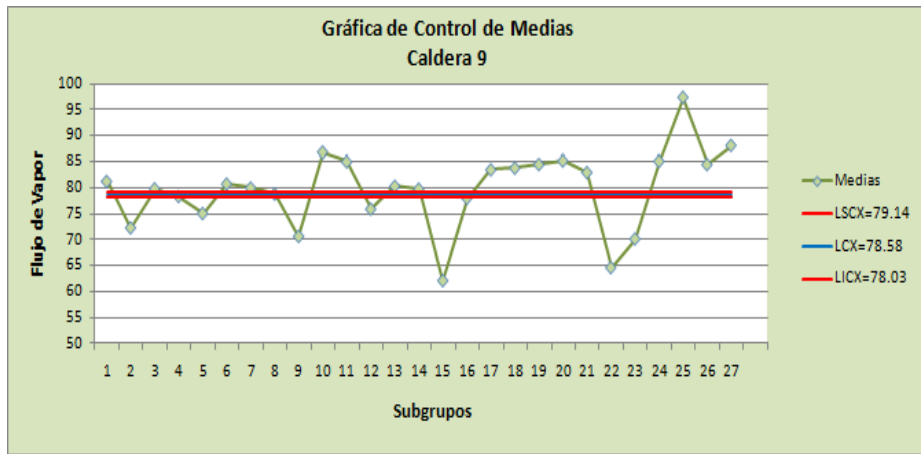


Figura 8. Carta de control X (medias) de la caldera 9.

- E. Se calcularon los límites de control superior, inferior y central, para obtener la grafica de control de desviación estándar (grafica "S") de las figuras 9, 10, 11 y 12 utilizando las fórmulas 6, 7 y 8 (Montgomery, 2005)<sup>8</sup>.

$$\begin{aligned}
 UCL &= B_4 \bar{S} \dots \dots \dots \text{Ecuación 6} \\
 LC &= \bar{S} \dots \dots \dots \text{Ecuación 7} \\
 LCL &= B_3 \bar{S} \dots \dots \dots \text{Ecuación 8}
 \end{aligned}$$

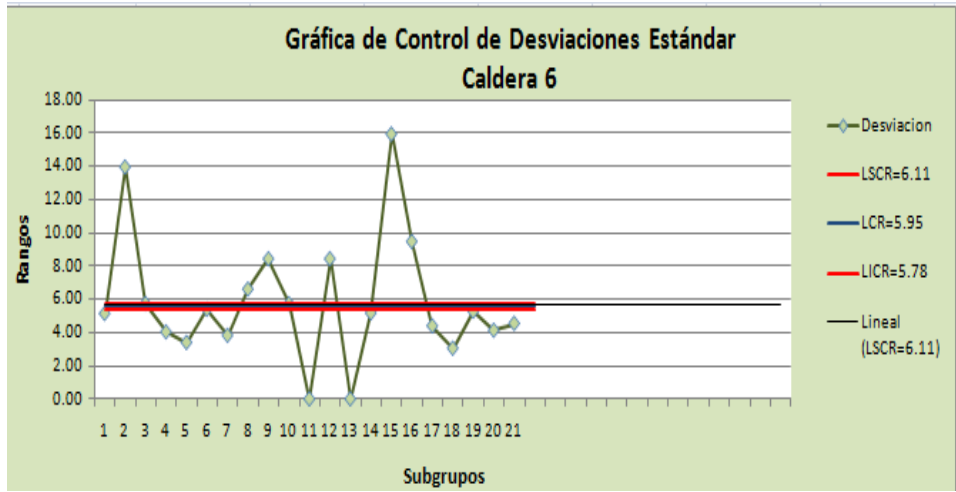


Figura 9. Carta de control S (desviación estándar) de la caldera 6.

<sup>8</sup> El valor de las constantes B<sub>3</sub> y B<sub>4</sub>, se obtuvieron de la tabla VI, página 761 del libro de Montgomery (2005). Los valores correspondientes de B<sub>3</sub> y B<sub>4</sub> utilizados en este artículo fueron 0.97 y 1.03 respectivamente.



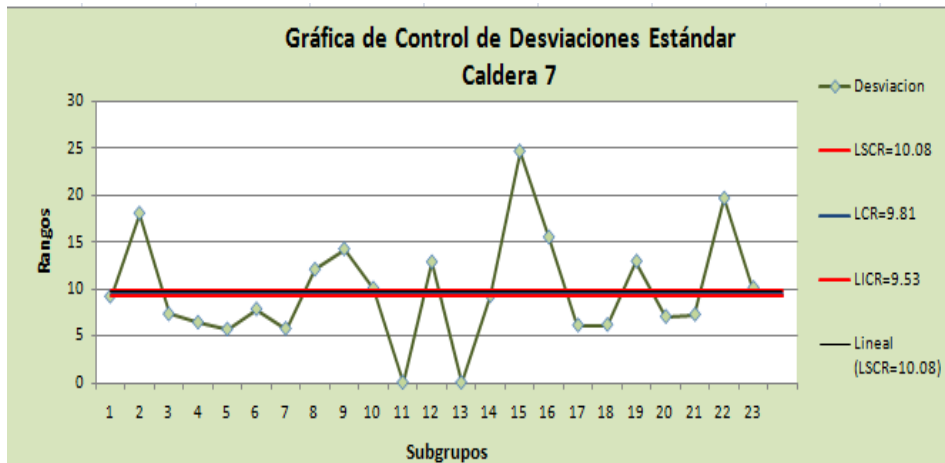


Figura 10. Carta de control S (desviación estándar) de la caldera 7.

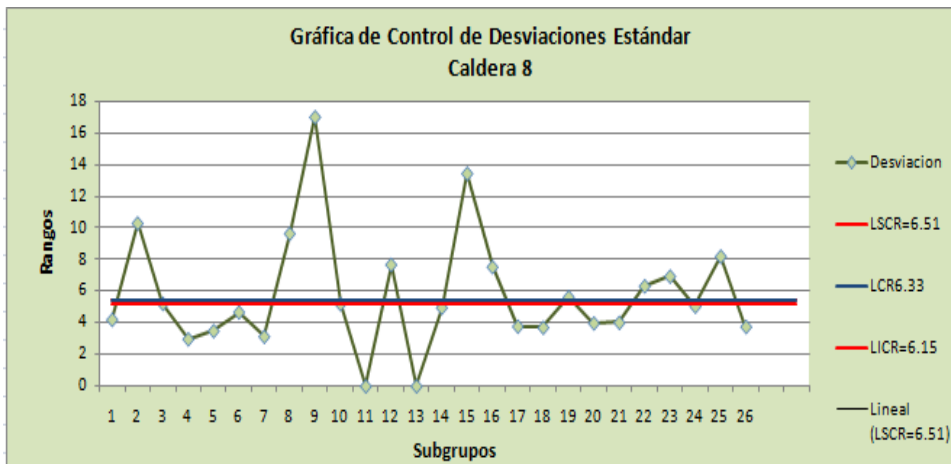


Figura 11. Carta de control S (desviación estándar) de la caldera 8.

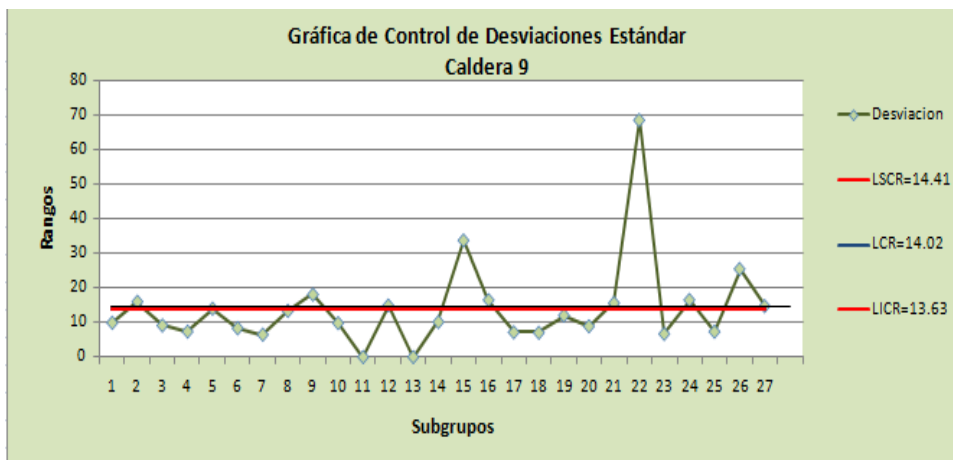


Figura 12. Carta de control S (desviación estándar) de la caldera 9.



### Elaboración de cartas de control para mediciones individuales

En muchas situaciones el tamaño de la muestra usado para monitorear el proceso es  $n=1$ , es decir, la muestra consta de una unidad individual (Montgomery, 2005), por ejemplo:

1. Cuando se usa la tecnología de inspección y medición automatizada, y se analiza cada unidad manufacturada, por lo que no hay ninguna base racional para hacer subgrupos.
2. La velocidad de producción es muy lenta, y no es conveniente dejar que se acumulen tamaños de muestra de  $n>1$  antes del análisis. El largo intervalo entre las observaciones ocasionará problemas con la formación de los subgrupos racionales.
3. Las mediciones repetidas del proceso difieren únicamente por el error de laboratorio o de análisis, como en muchos procesos químicos.
4. Se hacen mediciones múltiples en la misma unidad del producto.
5. Las mediciones de algún parámetro diferirán muy poco y producirán una desviación estándar demasiado pequeña.

Considerando los puntos anteriores y con ayuda de Excel, se desarrollaron cartas de control para mediciones individuales con los datos que se muestran en los cuadros 1, 2, 3 y 4; el procedimiento para la elaboración de estas se muestra enseguida:

- A. Se calculó el rango móvil ( $MR$ ) para cada dato individual con la ecuación 9. Los resultados se muestran en los cuadros 14, 15, 16 y 17.

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}| \dots \dots \dots \text{Ecuación (9)}$$

Donde

- MR = Rango móvil
- $x_i$  = Valor promedio individual
- $x_{i-1}$  = Valor promedio individual – valor promedio individual anterior

Cuadros 14. Promedio y rango móvil de la caldera 6.

Número de subgrupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Promedio	36	31	36	37	38	36	36	34	32	44	43	34	35	33
Rango Móvil		5.10	5.20	0.80	1.10	1.90	0.20	2.10	2.30	12.40	1.14	9.15	1.36	2.17
Número de subgrupo	15	16	17	18	19	20	21							
Promedio	32	34	36	35	33	30	32							
Rango Móvil	1.21	2	2	1	2	3	2							

Cuadros 15. Promedio y rango móvil de la caldera 7.

Número de subgrupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Promedio	54	42	55	54	54	54	55	53	43	53	58	54	53	54
Rango Móvil		12	12.50	0.78	0.09	0.14	0.81	1.83	9.40	9.72	5.06	4.61	0.38	0.67
Número de subgrupo	15	16	17	18	19	20	21	22	23					
Promedio	47	58	56	51	60	55	53	40	43					
Rango Móvil	6.89	11	2	5	9	5	2	13	3					

Cuadros 16. Promedio y rango móvil de la caldera 8.

Número de subgrupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Promedio	48	45	50	52	52	51	52	49	45	45	47	45	43	41
Rango Móvil		3	4.50	2.30	0.20	0.90	1.40	3.50	3.90	0	2	2	2	2
Número de subgrupo	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
Promedio	47	46	44	42	45	55	52	43	47	53	48	46		
Rango Móvil	6	1	2	2	3	10	3	9	4	6	5	2		

Cuadros 17. Promedio y rango móvil de la caldera 9.

Número de subgrupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Promedio	81	72	80	78	75	81	80	79	71	87	85	76	80	80
Rango Móvil		9	7.60	1.50	3.30	5.70	0.80	1.20	8.20	16.20	1.70	9.20	4.50	0.60
Número de subgrupo	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Promedio	62	78	83	84	84	85	83	64	70	85	97	84	88	
Rango Móvil	17.80	16	5.50	0.30	0.70	0.70	2.30	18.50	5.60	15.10	12.10	12.80	3.50	

B. Se determinó la media de los datos y la media del rango móvil. Esta información se muestra en el cuadro 18.

Cuadro 18. Media de los datos y media del rango móvil

	Media de los datos ( $\bar{X}$ )	Media del rango móvil	Cuadro utilizado para el cálculo del rango móvil
<b>Caldera 6.</b>	$\bar{X} = 35.21$	$\overline{MR} = 2.92$	Cuadro 14
<b>Caldera 7</b>	$\bar{X} = 52.09$	$\overline{MR} = 5.23$	Cuadro 15
<b>Caldera 8</b>	$\bar{X} = 47.46$	$\overline{MR} = 3.24$	Cuadro 16
<b>Caldera 9</b>	$\bar{X} = 79.77$	$\overline{MR} = 6.93$	Cuadro 17



C. Se calcularon los límites de control para la gráfica de valores individuales (figuras 13, 14, 15 y 16) utilizando las fórmulas 10, 11 y 12 (Gryna, 2007)<sup>9</sup>.

$$UCL = \bar{X} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \dots \dots \dots \text{Ecuación (10)}$$

$$\text{Línea central} = \bar{X} \dots \dots \dots \text{Ecuación (11)}$$

$$LCL = \bar{X} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \dots \dots \dots \text{Ecuación (12)}$$

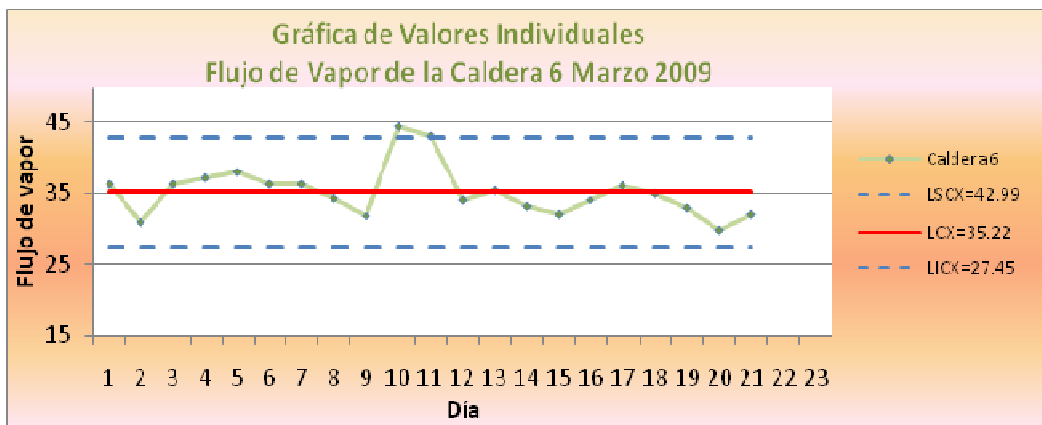


Figura 13. Carta de control de valores individuales de la caldera 6.

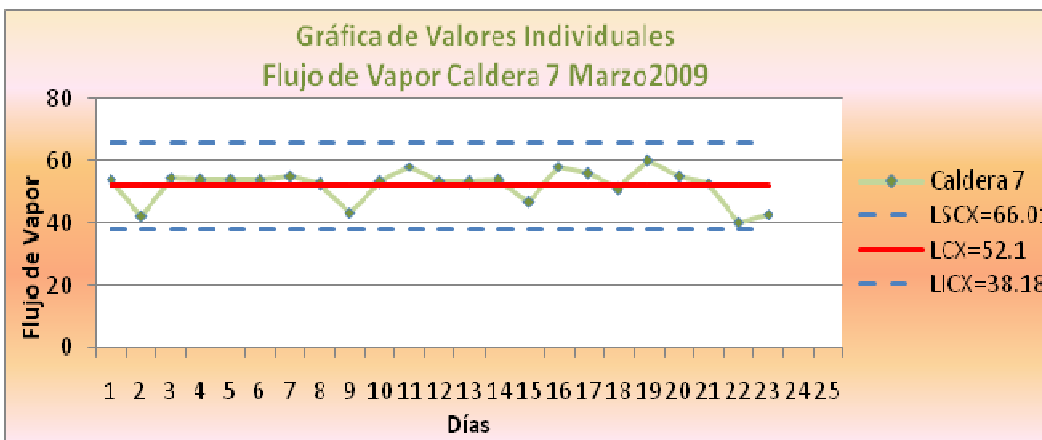


Figura 14. Carta de control de valores individuales de la caldera 7.

<sup>9</sup> La constante  $d_2$  se obtuvo de la tabla 20.4, página 677 del libro de Frank M. Gryna (2007). El valor de  $d_2$  utilizado en este artículo fue 1.128

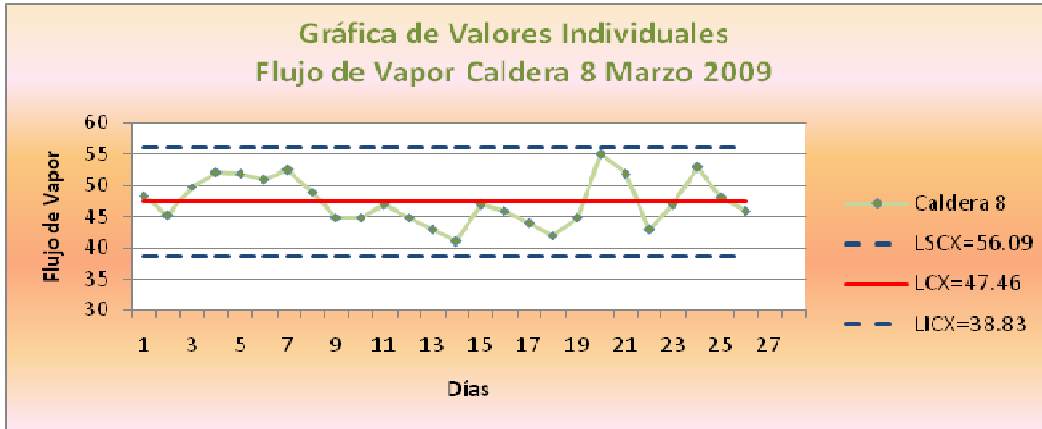


Figura 15. Carta de control de valores individuales de la caldera 8.

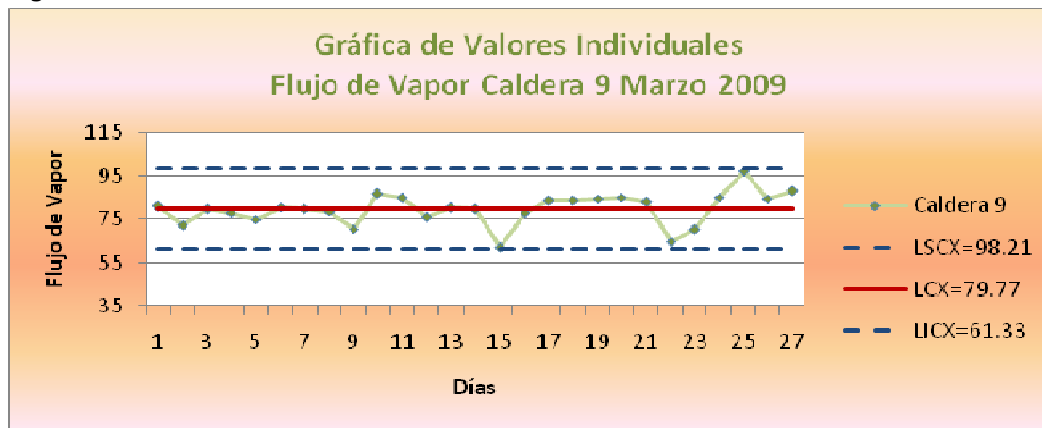


Figura 16. Carta de control de valores individuales de la caldera 9.

D. Se calcularon los límites de control para la gráfica de rangos móviles (figuras 17, 18, 19 y 20) utilizando las fórmulas 13, 14 y 15 (Gryna, 2007)<sup>10</sup>.

$$UCL = \overline{MR} * D_4 \dots \dots \dots \text{Ecuación (13)}$$

$$\text{Línea central} = \overline{MR} \dots \dots \dots \text{Ecuación (14)}$$

$$LCL = \overline{MR} * D_3 \dots \dots \dots \text{Ecuación (15)}$$

<sup>10</sup> Las constantes  $D_3$  y  $D_4$  se obtuvieron de la tabla 20.4, página 677 del libro de Frank M. Gryna (2007). Los valores de  $D_3$  y  $D_4$  fueron: 0 y 3.267 respectivamente.

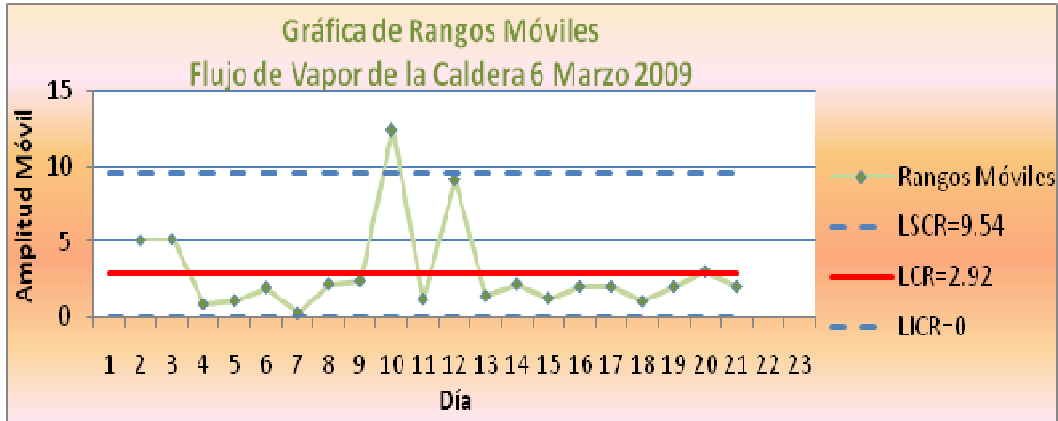


Figura 17. Carta de control de rangos móviles de la caldera 6.

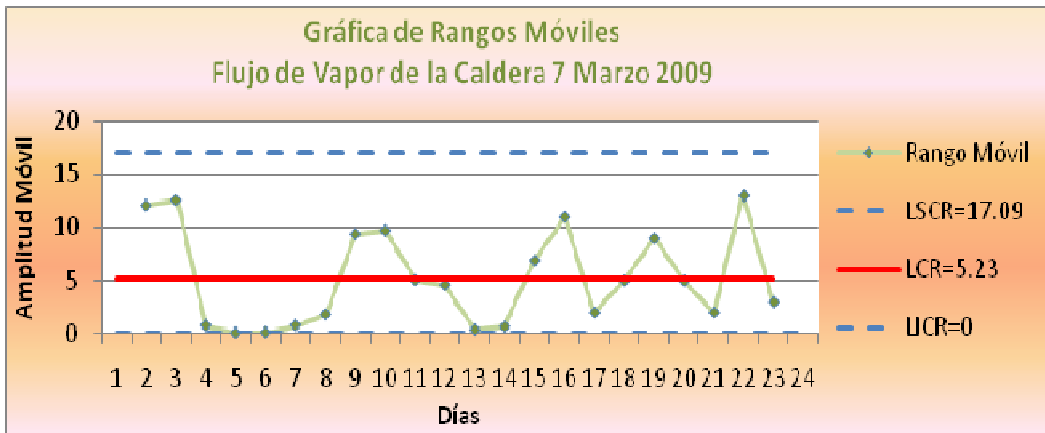


Figura 18. Carta de control de rangos móviles de la caldera 7.

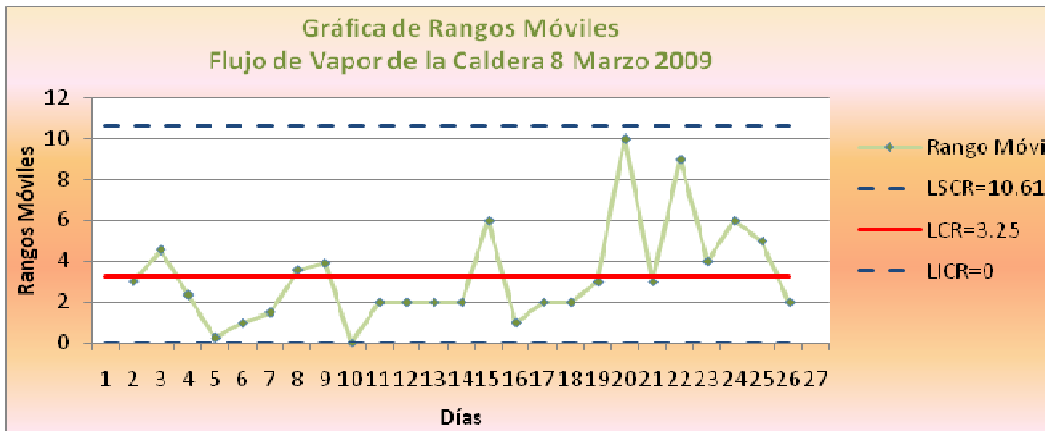


Figura 19. Carta de control de rangos móviles de la caldera



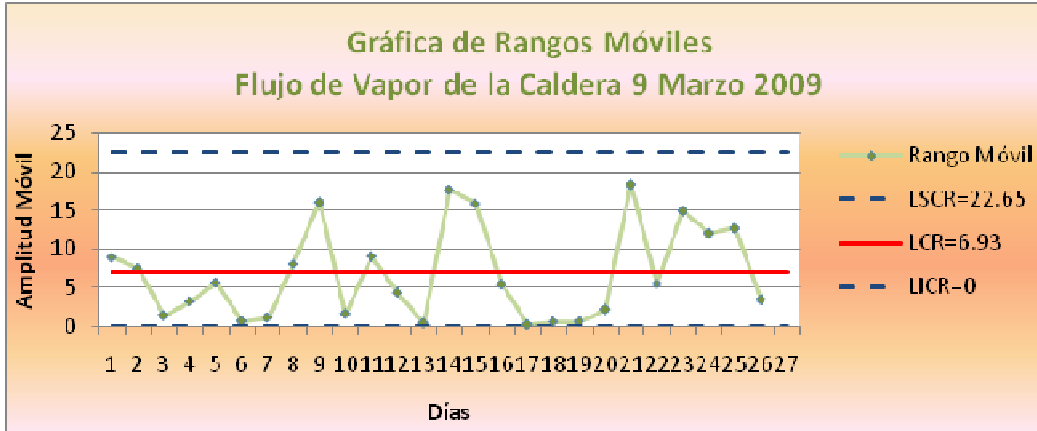


Figura 20. Carta de control de rangos móviles de la caldera 9.

### Resultados

Un diagrama de control puede indicar una condición fuera de control cuando uno o más puntos se hallan fuera de los límites, o bien cuando los puntos localizados exhiben algún patrón de comportamiento no aleatorio. Para llegar a la conclusión de que el proceso está fuera de control es necesario considerar cualquiera de las siguientes situaciones (Montgomery, 2007):

1. Uno o más puntos están fuera de los límites de control.
2. Una corrida de por lo menos 7 u 8 puntos, donde el tipo de corrida podrá ser:
  - a. Ascendente o descendente,
  - b. Sobre la línea central o bajo de ella, o bien
  - c. Una por encima o por debajo de la mediana.
3. Dos o tres puntos consecutivos fuera de los límites de advertencia de dos sigmas, pero todavía entre los límites de control.
4. Cuatro o cinco puntos consecutivos más allá de los límites sigma.
5. Un patrón anormal o no aleatorio en los datos.
6. Uno o más puntos cerca de un límite de advertencia o de control.

Con base en estas situaciones, los resultados observados de las cartas de control desarrolladas son:

- De las cartas de control X-S de las figuras 5 a 12, resulta imposible emitir un juicio con respecto al comportamiento de las calderas, debido a que los límites de control inferior, superior y central determinados son muy estrechos y no permiten visualizar de manera concisa si el proceso se encuentra o no bajo control estadístico.
- De las cartas de control para mediciones individuales de medias, en la figuras 13 a 16 se observa que los límites de control superior, inferior y central sí permiten observar el desempeño de la variable.
  - ✓ Caldera 6. La carta de control muestra que existen dos causas asignables, una ocurrida el día 10 y otra el día 11, así mismo, se detecta una corrida que inicia a partir del día 5 y concluye el día 9.
  - ✓ Caldera 7. La carta de control muestra que no existen causas asignables, sin embargo se presenta una corrida que inicia el día 3



- y concluye el día 8 y se observa una ligera tendencia hacia el límite inferior que inicia el día 11 y concluye el día 16.
- ✓ Caldera 8. La carta de control no muestra causas asignables, sin embargo presenta comportamiento cíclico a partir del día 11 y que termina el día 18.
  - ✓ Caldera 9. La carta de control muestra que no existen causas asignables, sin embargo es evidente un comportamiento cíclico a partir del día 1 hasta el 12, así mismo, se detecta una corrida que inicia el día 16 y concluye el día 22.
- De las cartas de control para mediciones individuales de rangos móviles (figuras 17 a 20) se muestra que los límites de control superior, inferior y central permiten observar el desempeño de la variable.
    - ✓ Caldera 6. La carta de control muestra que existe una causa asignable ocurrida el día 10, así mismo, se presenta una corrida que inicia el día 13 y concluye el día 19.
    - ✓ Caldera 7. La carta de control muestra que no existen causas asignables, sin embargo se observa una corrida que inicia el día 4 y concluye el día 8, también se observa un comportamiento cíclico a partir del día 16 y que concluye el día 23.
    - ✓ Caldera 8. La carta de control muestra que existe una causa asignable ocurrida el día 10, así mismo, se presenta una tendencia que inicia el día 5 y concluye el día 9 y finalmente se observa un comportamiento cíclico que inicia el día 18 y concluye el día 25.
    - ✓ Caldera 9. La carta de control muestra que no existen causas asignables, sin embargo se observa una tendencia que inicia el día 17 y concluye el día 21.
  - Los argumentos anteriores son suficientes para determinar que el proceso de flujo de vapor de las calderas no se encontró bajo control estadístico durante el período de tiempo analizado

### Conclusiones

Se concluye que el uso de las herramientas para el Control Estadístico del Proceso además de ser un apoyo para la reducción de la variabilidad de un proceso o sistema, también ayudan en el análisis del estado actual del mismo, siempre y cuando se aplique la herramienta adecuada. En éste artículo se resalta la importancia de tener dominio sobre el uso de las herramientas estadísticas, ya que una mala aplicación puede repercutir en la inferencia que se realice sobre los procesos analizados, una complicación clara se presentó al aplicar las cartas de control "X-S" para analizar el comportamiento de las calderas 6, 7, 8 y 9, donde los resultados obtenidos no fueron convincentes y no aportaron evidencia útil para hallar alguna causa y lograr una mejora en el proceso. Derivado de esta complicación para analizar el proceso de flujo de vapor de las calderas, que se presentó al desarrollar las cartas de control X-S, se tomó la decisión de elaborar cartas de control para mediciones individuales; estas cartas si dieron finalmente un panorama claro del desempeño de la caldera en estudio.

Es importante mencionar que el superintendente del área comento al inicio del estudio, que a su consideración las calderas no habían tenido un desempeño excelente, sin dudar que las calderas ya se encontraban bajo control estadístico, sin embargo, con la realización de las cartas de control se le mostro al superintendente del área, que existieron comportamientos anormales en determinados días (corridas y tendencias



antes mencionadas), por lo tanto era recomendable verificar las causas que originaron tales anormalidades.

### **Referencias bibliográficas**

Arnoletto, E. J. "Administración de la producción como ventaja competitiva"; Eumed.net, Edición electrónica, 2007, [www.eumed.net/libros/2007b/299/](http://www.eumed.net/libros/2007b/299/). Consultada el 10 de Noviembre de 2009.

Dale H. B. "Control de calidad", Prentice Hall. Primera edición, 1995

Evans, J. R. y W. Lindsay, "Administración y control de la calidad", Thomson, Cuarta Edición, 2000.

Gryna, F. M., Richard C. H. Chua, J.A. Defeo y Método Juran, "Análisis y planeación de la calidad", Quinta Edición, 2007.

Montgomery, D. "Control Estadístico de la calidad", Limusa Wiley. Tercera Edición, 2005.

Pérez, C. "Control Estadístico de la Calidad", Alfaomega-rama. Primera Edición, 1999.

Vilar B. J. F. "Control estadístico de los procesos", Fundación Confemetal, Primera Edición, Madrid, 2005.

Vaughn. "Control de Calidad", Limusa Wiley, Séptima reimpresión, 1993.

