

## **Reducción de la variabilidad de un proceso de desmineralización de agua por intercambio iónico para la elaboración de bebidas gaseosas**

### ***(Reduction of the variability of a water demineralization process by ion exchange to produce soft drinks)***

Vásquez Reino Edgar Walter<sup>1</sup>

#### **Resumen:**

El presente trabajo analiza la variabilidad de un proceso de desmineralización de agua por intercambio iónico para la elaboración de bebidas gaseosas y la influencia que en la calidad final de los productos tienen las dos variables de calidad como son la dureza y alcalinidad del agua en el proceso. El objetivo de la investigación se centra en reducir la variabilidad del proceso, aumentar su capacidad y establecer un plan de mejora que sea sostenible en el tiempo; para esto, se realizó un trabajo de campo con la metodología del ciclo de la calidad PHVA y diseño de experimentos; se obtuvo el diagnóstico inicial del proceso, se estableció el problema de las dos variables críticas de calidad y de acuerdo con el análisis se concluyó que el proceso era clase 4, no adecuado, estable, incapaz, de alta variabilidad y que necesitaba serios cambios. Con la implementación de la mejora se consiguió que el proceso se comporte como clase 1, adecuado, estable, capaz, con baja variabilidad, y para que los resultados obtenidos en el proceso de desmineralización de agua se mantengan en el tiempo, se implementó controles en el proceso mediante las cartas de control del tipo X-R.

**Palabras clave:** mejora de procesos; variabilidad; capacidad; cartas de control

#### **Abstract:**

This work analyzes the variability of a water demineralization process, by ion exchange, for the soft drinks production, and the influence of the two quality variables in the process: hardness and alkalinity, on the final quality of the products. The objective of the research focuses on reducing the variability of the process, increasing its capacity and establishing an improvement plan that is sustainable over time. For this, a field work was carried out, with the quality cycle and design of experiments, PHVA methodology. The initial diagnosis of the process was obtained, the problem of the two critical quality variables was established and it was concluded that the process was class 4: not adequate, stable, incapable, highly variable and in need of serious changes. After the improvement, the process behaves as class 1: adequate, stable, capable and with low variability. The results obtained in the water demineralization process are maintained over time; controls were implemented by means of the XR type control letters.

**Keywords:** improvement process; variability; capability; control charts

---

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador (edgar.vasquezr@epn.edu.ec)

## 1. Introducción

Posicionarse en el mercado es la meta de toda industria; para lograr este objetivo necesita tener ventajas competitivas a base de la calidad, el precio, la innovación, entre otros. Para tener productos de buena calidad un requisito primordial es la calidad de su materia prima; en la producción de bebidas gaseosas la principal materia prima es el agua. Las bebidas gaseosas tienen o no problemas, de acuerdo con la calidad del agua que se utilice para su elaboración. El sabor característico del agua con dureza y alcalinidad alta, cambio de sabor de la bebida, baja estabilidad y sedimentación, son las inconformidades que se presentan por la variabilidad de la alcalinidad y dureza.

Existen dos formas de controlar estas dos variables: la osmosis inversa y la desmineralización por intercambio iónico. Si se comparan las dos tecnologías, la osmosis inversa tiene la ventaja de un funcionamiento estable pero con alto costo económico; el intercambio iónico es una tecnología económica pero con desventajas de alta variabilidad en su funcionamiento.

Por la desventaja de la alta variabilidad del intercambio iónico, algunas empresas han optado por cambiar de tecnología hacia lo menos económico sin intentar remediar el problema, para mantener bajos costos productivos. Es por esta razón que el objetivo general del presente trabajo se centra en mejorar el proceso de desmineralización por intercambio iónico con la reducción de su variabilidad y aumento de la calidad (Montgomery, 2010, p.6), para que las industrias de bebidas en general, que han optado por esta tecnología, obtengan ventaja competitiva a base de costos y calidad.

Para la calidad de un producto se establecen varias definiciones; una dice: “La calidad es inversamente proporcional a la variabilidad en un proceso” (Montgomery, 2004, p.4). “El control de calidad consiste esencialmente en medir las características de calidad de un producto, compararlas con las especificaciones o requisitos, y cuando hay discrepancias, realizar las adecuaciones necesarias.” (Márquez, 2013, p.53). En cualquier proceso productivo se producen variaciones, siempre existirá una cierta variabilidad, natural, que no se puede evitar, estas causas pueden ser del tipo común o del tipo especial. (Ivancevich & Skinner, 1996, p. 548).

La investigación que se realiza es de tipo descriptiva con trabajo de campo mediante el uso del método empírico. La metodología utilizada abarca los ocho pasos del ciclo de calidad, el ciclo PHVA (Gutiérrez y de la Vara, 2013 p.11). Realizado el trabajo de investigación se obtienen los resultados esperados en relación con el aumento de la capacidad del proceso a causa de la reducción de la variabilidad, y el efecto del aumento de la calidad (Montgomery, 2004, p.4), y además se logra demostrar que es posible mantener la mejora con las cartas de control y por efecto de esto se mantendrán los costos.

## 2. Metodología

### 2.1. Análisis de la situación actual

En la *Tabla 1* se resumen la metodología y los materiales que se utilizaron para obtener los datos y parámetros de funcionamiento, de acuerdo con cada etapa de la planta de tratamiento.

Una vez establecidos los datos y parámetros de funcionamiento se realizó el estudio respectivo y se determinaron las variables que causan los problemas de calidad del producto final. Las variables críticas de calidad del proceso de purificación de agua para elaboración de bebidas gaseosas fueron determinadas. Estos valores de salida afectan la calidad del producto final, por lo cual si se mejora su fluctuación en la salida durante todo el proceso de purificación de agua, se puede mejorar la calidad del producto de acuerdo con el siguiente concepto: “Calidad significa ausencia de deficiencias en aquellas características que satisfacen al cliente” (Juran, 1990, p.25).

Tabla 1. Metodología y materiales

Etapa	Parámetro	Metodología	Herramientas
Aireación	Caudal	Volumétrico	Recipiente de 20 litros Cronómetro
	Dureza	Titulación	Kit de dureza
	Alcalinidad	Titulación	Kit de alcalinidad
Clarificación	Dosis coagulante	Volumétrico	Probeta de 100 ml
	Dosis coagulante	Prueba de jarra	Kit de prueba de jarra. Probeta de 100 ml Matraz de 100 ml
Desmineralización	Capacidad	Volumétrico	Recipiente de 20 litros Jarra de 1 litro Llaves de ajuste
	Período regeneración	Medición	Cronómetro
	Tiempo regeneración	Medición	Cronómetro
	Dureza	Titulación	Kit de dureza
	Alcalinidad	Titulación	Kit de alcalinidad
	Conductividad	Medición	Conductímetro
Desinfección	Tiempo de contacto	Volumétrico	Cinta métrica Cronómetro

En la *Figura 1* se puede apreciar el diagrama de bloques del proceso de purificación de agua, en este esquema se observa la secuencia y los procesos que se realizan para la obtención del agua purificada, desde que ingresa el agua cruda hasta la obtención de agua purificada, también se indican los químicos que se adicionan durante todo el proceso.

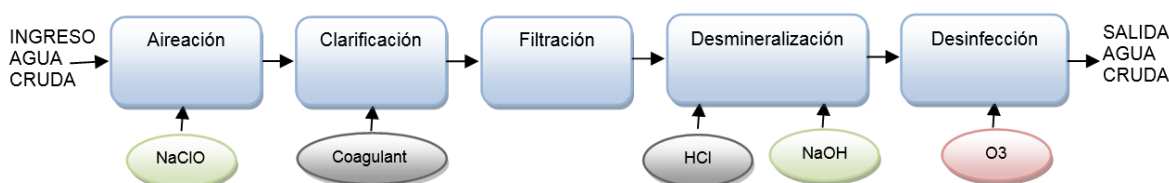


Figura 1. Esquema proceso de purificación de agua

## 2.2. Medición del proceso

Obtenidas las variables críticas de calidad, se procedió a realizar el análisis de estabilidad y capacidad para conocer las condiciones en las cuales trabajaba el proceso y establecer un diagnóstico de la situación del proceso de purificación de agua.

## 2.3. Capacidad

La capacidad del proceso se define como: “la disposición que tiene un proceso para adaptarse a las especificaciones, si se quiere garantizar la fabricación de piezas que cumplan los requisitos de calidad exigidos en las normas” (Arvelo, 1998, p.17).

Se calculó la media de las muestras obtenidas y con la especificación superior establecida del valor máximo para que no genere problemas a las bebidas se procedió a calcular el índice de capacidad. El índice de capacidad potencial del proceso  $C_p$ , se definió en la *Ecuación 1*.

$$Cp = \frac{ES-EI}{6\sigma} \quad [1]$$

Dónde:  $\sigma$  Desviación estándar del proceso ES especificación superior; EI especificación inferior.

El índice Cp compara el ancho de las especificaciones o variación tolerada para el proceso con la amplitud de la variación real del proceso, como indica la *Ecuación 2*.

$$Cp = \frac{\text{Variaciontolerada}}{6\sigma\text{Variacionreal.}} \quad [2]$$

Un proceso cumple con las especificaciones si: “la variación real es menor que la variación tolerada; por esto debe ser mayor que 1, si es menor, no cumple con las especificaciones”. (Campos y Griful, 2005, p.106). En la industria existe gran cantidad de variables, en un proceso con una sola especificación, ya sea del tipo “entre más grande mejor”, en la que interesa que sean mayores a cierto valor mínimo (EI); o las variables del tipo entre “más pequeña mejor”, donde lo que se quiere es que no excedan un valor máximo (ES). (Gutiérrez y De la Vara, 2013, p. 113).

Si se tienen características de calidad del tipo entre más pequeña mejor, el índice para la especificación superior (Cps) viene dado por la *Ecuación 3*.

$$Cps = \frac{ES-u}{3\sigma} \quad [3]$$

Dónde: u media de la característica de calidad

$\sigma$ : desviación estándar

ES: especificación superior

En la *Tabla 2*, se tienen valores de referencia de los índices de capacidad

**Tabla 2.** Valores referenciales de índice de capacidad

Valores del índice CP	Clase	Decisión
$CP \geq 2$	Mundial	Se tiene calidad 6 sigma
$CP \geq 1,33$	1	Adecuado
$1 < CP < 1,33$	2	Parcialmente adecuado
$0,67 < CP < 1$	3	No adecuado requiere modificaciones
$CP < 0,67$	4	No adecuado modificaciones muy serias

(Fuente: Gutiérrez y De la Vara, 2013, p.99)

## 2.4. Estabilidad

“El control estadístico de procesos tiene como fin observar mediante técnicas estadísticas la estabilidad de un proceso. Los gráficos de control permiten realizar el análisis de forma visual para detectar un exceso de variabilidad que será atribuible a una causa asignable que se podrá investigar y corregir” (San Miguel, 2009, p.173).

Se partió del muestreo con tamaño de subgrupo igual a 5, hasta completar 15 subgrupos repartidos en un período de tiempo como para que se manifieste la variación a largo plazo.

La estabilidad se analizó mediante el índice de estabilidad, que relaciona los datos tomados de las muestras con los puntos que se encuentran fuera de los límites de control, se puede afirmar que si el índice de estabilidad es 0, es su valor ideal y quiere decir que ningún punto se ubicó fuera de los límites de control, es decir no hubo un punto especial. Se calcularon de la siguiente manera:

Si w es el estadístico a graficar, el límite de control inferior se expresa con la *Ecuación 4*; la línea central con la *Ecuación 5* y el límite de control inferior con la *Ecuación 6*.

$$LCI = \mu_w - 3\sigma_w \quad [4]$$

$$LC = \mu_w \quad [5]$$

$$LCS = \mu_w + 3\sigma_w \quad [6]$$

“Con estos límites y bajo condición de control estadístico se tendrá alta probabilidad que los valores de  $w$  estén dentro de ellos. Si  $w$  tiene distribución normal, tal probabilidad será de 99,73 % con lo que se espera que bajo condiciones de control el 99,73 % de las medias de las muestras caigan en estos límites”. (Chase y Aquilano, 2009, p. 339).

Cuando el índice aumenta se considera al proceso inestable, de acuerdo con la experiencia, se consideró el índice de hasta un 15 %, como manejable con las cartas de control.

## 2.5. Metas para las VCC

Se estableció como meta, al final de la mejora, obtener los valores para las variables críticas de calidad por debajo de lo indicado por el departamento de control de calidad y aumentar con esto la capacidad del proceso. Estos valores fueron limitados para las variables críticas de calidad previamente identificadas.

## 2.6. Análisis del proceso

### 2.6.1. Diagrama causa – efecto

De acuerdo con la siguiente definición sobre las causas de variación en un proceso: materia prima, máquinas, materiales, métodos y mano de obra, las llamadas 5 Ms, el proceso productivo en sí y como salida un producto final con todas las variaciones que pueden presentarse (Prat, 2000, p.47), se realizó el diagrama causa-efecto de acuerdo con:

- a. Definición del problema
- b. Exposición de las ideas
- c. Selección
- d. Jerarquización

En una exposición inicial, el dueño del proceso definió y delimitó el problema que recayó en el proceso de desmineralización de agua. Se pasó luego a una lluvia de ideas que permitió realizar la selección preliminar y luego de esto se realizó la jerarquización, de las ideas previamente seleccionadas, basados en la experiencia de los participantes y apoyados con los datos históricos; luego se procedió a elaborar el diagrama causa-efecto.

Este diagrama identificó las causas raíz de los problemas que se presentaban, de esta manera se establecieron las causas vitales y se obtuvieron las posibles soluciones que permitan la mejora del proceso de desmineralización de agua.

## 2.7. Plan de mejora

Se generaron diferentes alternativas de solución para los problemas y que atendieran a las causas identificadas, con la experticia del personal se propusieron mejoras y se implementaron. Para establecer las mejoras que se realizaron y conocer la interacción que tienen en el proceso, como factores que influyen en la salida de las características de calidad del agua final, se desarrolló un diseño de experimentos en una semana. Se procedió a establecer una sola variable crítica de calidad como la variable que se va a mejorar y analizar, debido a la correlación existente, con un diagrama de dispersión que: “permite evaluar la existencia de relaciones lineales entre variables sin calcular ningún estadístico” (Quezada, 2010, p.124).

### 2.7.1. Diseño de experimentos

Un factor es: “un grupo específico de tratamientos: temperatura, humedad, etc., las diversas categorías de un factor se denominan niveles del factor. El arreglo factorial consiste de todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores de tratamiento” (Kuehl, 2001, p.7).

Se realizó el diseño de experimentos del tipo  $2^k$  con dos niveles, el número de factores dependió de las diferentes alternativas de solución que se generaron en el análisis del proceso. Con el programa estadístico *Minitab*® se desarrolló el experimento y la aleatoriedad en su ejecución.

### 2.8. Implementación de la mejora

Una vez conocida la solución y la interacción de las demás soluciones en la salida del proceso, se partió con la implementación de acuerdo con los lineamientos establecidos en la propuesta preliminar de la mejora. Para la evaluación de la mejora implantada se realizaron corridas confirmatorias de datos. Durante una semana se operó el proceso en estas condiciones, se tomaron los 15 subgrupos normales y se realizó nuevamente todo el análisis.

### 2.9. Implementación de las cartas de control

La carta de control asegura la continuidad de una mejora y se define como: “Un método gráfico para evaluar si un proceso está o no en un estado de control estadístico, es decir cuando solo actúan causas comunes o aleatorias, inherentes a cualquier proceso”. (Armand, 1994, p.421).

Para lograr que las mejoras obtenidas se mantengan en el tiempo se procedió a diseñar un sistema con tres niveles: el proceso, la documentación y el monitoreo. En el caso de estudio, se modificó el proceso de acuerdo con las soluciones propuestas y los procedimientos de trabajo correspondientes al proceso. Para el monitoreo se implementó cartas de control de medias y rangos.

#### 2.9.1. Elaboración de cartas $\bar{X} - R$

Metodología (Gutiérrez y De la Vara, 2013, p. 225):

- a. Problemática
- b. Detallar utilidad de la carta de control
- c. Definir los objetivos de la carta de control dentro del proceso
- d. Lista de variables que se pueden analizar
- e. Considerar recurso humano, costos y equipos
- f. Elegir la carta apropiada.

#### 2.9.2. Aplicación de la carta de control

El muestreo se realizó de una forma tal que los subgrupos de las muestras fueran homogéneos para que estas aparezcan como diferencias entre los subgrupos y no como diferencias entre las muestras del subgrupo. Se utilizó el método al instante, de muestreo por turno; cada uno asiste al punto de muestreo cada media hora para tomar los subgrupos. La frecuencia del muestreo, de media hora, logró que la carta sea utilizada de manera sistemática para detectar cambios de manera oportuna en el proceso. Para determinar los límites de control se partió de los establecidos en el análisis inicial; cuando existieron puntos fuera de los límites durante la aplicación de la carta, se procedió a verificar qué causó estos cambios, se aplicó la corrección y se volvió a calcular nuevamente los límites.

### 3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos de las mediciones del proceso de desmineralización, se muestran en la *Tabla 3*.

**Tabla 3.** Muestreo de salida de agua del proceso.

	DUREZA (ppm)					ALCALINIDAD (ppm)				
	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5
1	15	10	32	23	9	11	9	73	100	11
2	40	40	20	26	25	75	50	15	84	20
3	21	37	39	40	28	50	64	70	95	88
4	25	38	40	45	35	29	77	83	66	75
5	40	38	36	40	44	96	45	75	72	90
6	8	42	38	40	9	11	64	77	85	10
7	42	20	12	25	41	40	44	14	29	75
8	10	15	21	40	40	9	40	71	83	90
9	12	25	20	42	38	33	55	75	86	85
10	39	17	34	36	42	45	10	12	48	68
11	23	6	20	25	20	45	8	87	93	80
12	20	6	6	20	12	44	12	56	78	90
13	9	9	18	20	15	21	24	27	70	80
14	37	1	9	21	25	45	10	24	36	30
15	18	32	39	40	33	33	40	70	72	83

Se comprobó la correlación entre la dureza y la alcalinidad, para esto, se utilizó el diagrama de correlación con la ayuda del programa *Minitab®*, de la *Tabla 3* de las muestras. Del análisis de correlación se obtuvo: Correlación - Dureza-alcalinidad; Correlación de Pearson = 0,867.

#### 3.1. Cálculo de capacidad

Para el cálculo de la capacidad del proceso se utilizaron los resultados de la *Tabla 3* para obtener la media y la desviación estándar del proceso se aplicaron las *ecuaciones 7, 8 y 9*. La desviación estándar se calculó con la *Ecuación 8*.

$$\text{Media: } \mu = \frac{(X_1+X_2+X_3+\dots+X_n)}{n} = 23,93 \quad [7]$$

$$\sigma = \sqrt{S^2} \quad [8]$$

Donde:

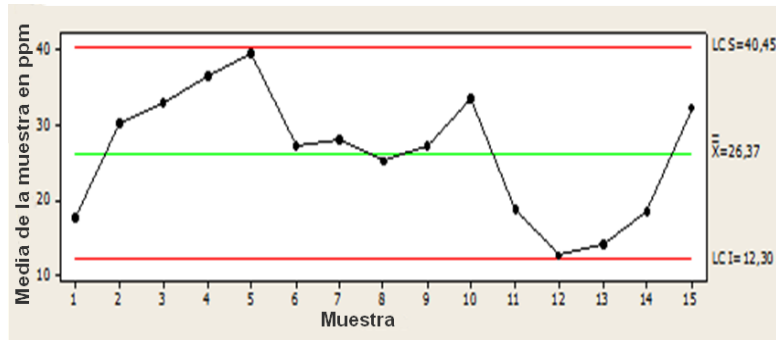
$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}]^2}{n} = 153,01 \quad [9]$$

$$\text{Entonces: } \sigma = \sqrt{S^2} = \sqrt{153,01} = 12,37$$

De acuerdo con la variable de la dureza de salida del proceso y con la consideración que la especificación superior está determinada por el Departamento de Control de Calidad, en un valor no mayor a 40 ppm, el índice de capacidad se calculó con la Ecuación 10.

$$CPS = \frac{ES - \mu}{3\sigma} = \frac{40 - 23,93}{3 * 12,37} = 0,43 \quad [10]$$

Con los valores de los índices de capacidad obtenidos se puede ver que el proceso tiene baja capacidad para cumplir con las especificaciones que demandan las variables de calidad. Del análisis de capacidad realizado y de acuerdo con la comparación que se realizó con la *Tabla 3* de referencia, el proceso cayó en categoría 4; por esta razón se realizó la mejora del proceso. Se trazó el gráfico de control de la dureza (*Figura 2*) con los valores de la *Tabla 3*.



**Figura 2.** Gráfico de control de Dureza (Límites naturales de control: LCS= 40,45; LCI= 12,30)

Se compararon los límites naturales de control con las especificaciones reales y se observó que no caen dentro de los límites naturales, por tanto se puede decir que el proceso no era capaz de cumplir con las especificaciones que el departamento de control de calidad espera.

### 3.2. Identificación de las causas raíz principales

Con la herramienta de lluvia de ideas se obtuvieron los siguientes resultados:

#### **Materia Prima:**

- Calidad del hipoclorito de sodio
- Instrumentos equivocados
- Variabilidad excesiva en el agua que entrega el pozo profundo
- Calidad del agua de ingreso a la planta de tratamiento
- Calidad de los lechos filtrantes

#### **Máquinas:**

- Se debe realizar un sedimentador de alta taza
- Los filtros rápidos son muy pequeños
- Se debe colocar un sistema de lecho mixto que permita bajar los parámetros del agua de salida del desmineralizador
- Colocar filtros de carbón luego del desmineralizador
- Colocar un desgasificador entre las columnas del desmineralizador
- Desmineralizador mal dimensionado
- Material del desmineralizador equivocado

#### **Mano de obra:**

- Operador no capacitado
- Descuido del operador
- Mala manipulación de equipos
- Mala operación de filtros y columnas del desmineralizador



- e. Operador realiza diversas funciones ajenas al sistema de agua

**Mediciones:**

- Calibrar instrumentos
- El control de calidad del agua luego del desmineralizador se debe hacer cada media hora
- Acciones correctivas en control de calidad
- Mediciones incorrectas
- Calidad de los reactivos para la medición
- Mala lectura de las mediciones

**Métodos:**

- Los filtros lentos se debe lavar con presión superficial
- Se debe aumentar la dosis de regenerante para la columna catiónica
- Se debe aumentar la dosis del regenerante para la columna aniónica
- Se deben aumentar los tiempos de retro lavado de las columnas catiónica y aniónica
- Se debe ablandar el agua antes de ingresar al desmineralizador
- Exceso de presión en las columnas del desmineralizador

### 3.3. Diagrama causa- efecto

Se puede observar en la *Figura 3*.

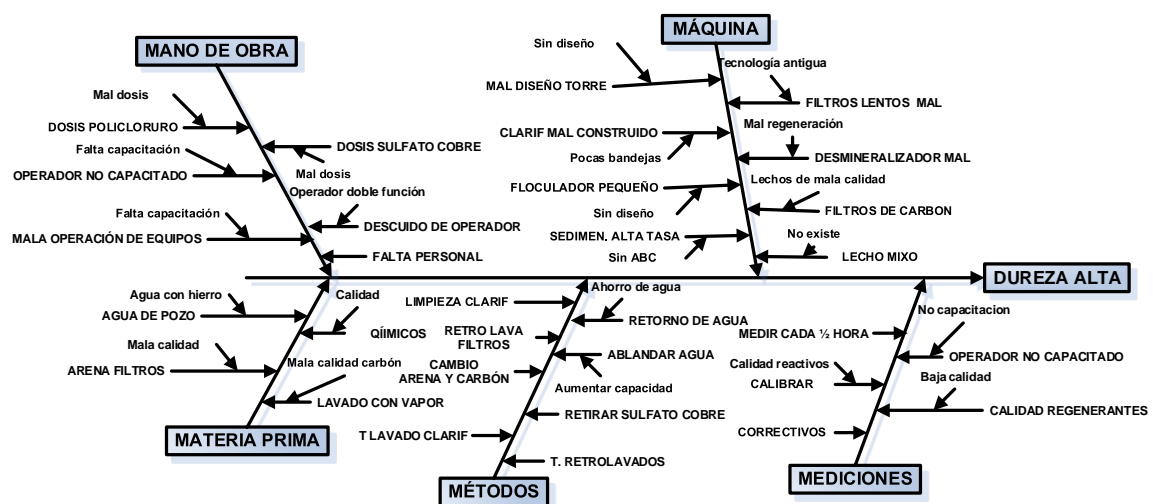


Figura 3. Diagrama causa-efecto del proceso

### 3.4. Mejora del proceso de purificación de agua

#### 3.4.1. Elección de la solución al problema

De los resultados de los análisis anteriores y con la experticia de los operadores, el jefe de control de calidad y el jefe de producción, se resolvió implementar el siguiente plan de mejora que permitiera eliminar las causas especiales del proceso:

- Recortar los intervalos entre cada regeneración del equipo desmineralizador
- Aumentar el tiempo de retro lavado de cada columna en el proceso de regeneración
- Aumentar la dosis de regenerante para la columna catiónica y para la columna aniónica
- Elaborar un manual de regeneración y arranque por turno del equipo desmineralizador
- Implementar por inicio las cartas de control tipo X-R en la etapa de desmineralización

### 3.4.2. Diseño de experimentos

Para mejorar la respuesta de salida del proceso y conocer la influencia de las cuatro posibles soluciones arriba anotadas se procedió a realizar un diseño de experimentos del tipo  $2^k$ , para este caso fueron cuatro factores y se aplicó al proceso durante una semana.

Los factores son:

- A: Intervalos de regeneración; nivel alto 3 h, nivel bajo 0
- B: Retro lavado Nivel alto: 10 min nivel bajo 5 min
- C: Dosis Nivel alto: 2 (doble) Nivel bajo (1)
- D: Manual Nivel alto: 1 Nivel bajo: 0

Del diseño de experimentos resultó que el factor A fue el que más incidió.

### 3.4.3. Implementación de la mejora

- a) Recortar los intervalos entre cada regeneración del equipo desmineralizador
- b) Aumentar el tiempo de retro lavado de cada columna
- c) Aumentar la dosis del regenerante
- d) Elaborar un manual de regeneración y arranque por turno del equipo desmineralizador
- e) Implementar las cartas de control tipo X-R en la etapa de desmineralización

### 3.4.4. Evaluación de la mejora sobre las vcc

Una vez establecida la mejora e implementada por una semana se procedió a tomar datos, de la misma manera que para realizar el diagnóstico inicial se tomó 15 subgrupos de cinco muestras cada uno en dos días de funcionamiento. El muestreo se realizó de la siguiente manera: El encargado del laboratorio de control de calidad indicó al operador el punto de muestreo y la frecuencia del mismo, el operador llevó la muestra al laboratorio para realizar las mediciones.

## 3.5. Muestreo de la variable dureza

Los resultados se pueden observar en la *Tabla 4*.

### 3.5.1. Carta de control de la variable dureza

Con la *Tabla 4* se procedió a realizar el gráfico de control (*Figura 4*) con la mejora. Los límites naturales de control fueron: LCS= 21,01 y LCI= 3,07 estos valores cayeron dentro de las especificaciones reales, se afirmó que el proceso fue capaz de cumplir con las especificaciones.

### 3.5.2. Análisis de capacidad

Se calculó la capacidad del proceso de purificación de agua con la mejora implementada durante una semana, con los resultados de la *Tabla 4* se aplicaron las ecuaciones 11, 12 y 13.

$$\text{Media: } \mu = \frac{(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n)}{n} = 12.04 \quad [11]$$

$$\text{Desviación estándar } \sigma = \sqrt{S^2} \quad [12]$$

Dónde:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}]^2}{n} = 44.75 \quad [13]$$

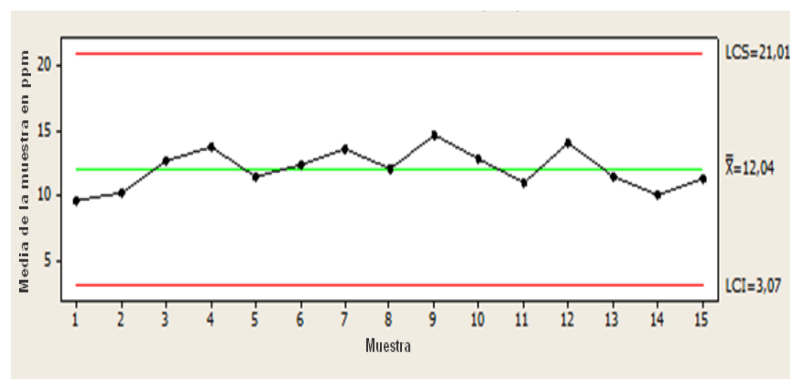
$$\text{Entonces: } \sigma = \sqrt{S^2} = \sqrt{44.75} = 6.69$$

Se calculó con la *Ecuación 14* el índice de capacidad del proceso con la mejora implementada:

$$CPS = \frac{ES - \mu}{3\sigma} = \frac{40 - 12,04}{3 * 6,69} = 1,39 \quad [14]$$

**Tabla 4.** Valores luego de la mejora del proceso.

DUREZA (ppm)					
	M1	M2	M3	M4	M5
1	5	10	20	5	8
2	5	12	16	8	10
3	8	15	20	8	12
4	10	12	22	10	15
5	5	15	20	5	12
6	8	14	18	10	12
7	5	20	30	5	8
8	8	15	22	5	10
9	10	20	30	5	8
10	10	14	20	10	10
11	5	12	18	8	12
12	5	15	30	5	15
13	5	10	20	8	14
14	5	10	18	5	12
15	8	12	18	8	10



**Figura 4.** Carta de control proceso mejorado de variable Dureza

### 3.5.3. Problemática

Se obtuvo como resultado que la mayor cantidad de causas para el problema descrito se encuentra en el subproceso de desmineralización, es por esta razón que se pretende implementar la carta de control en el punto inmediato luego del equipo desmineralizador, es decir antes que el agua ingrese a la cisterna recolectora de agua purificada.

Una vez implementada la carta de control se observó que el proceso permanece estable y no tiene puntos especiales dentro del funcionamiento del mismo. En cuanto a la variabilidad se puede decir que permanece dentro de lo establecido al inicio y que mantiene la capacidad que se calculó al momento de la implementación de la mejora y de las cartas de control, es decir no varían los resultados en el transcurso del tiempo, con los procedimientos aplicados de acuerdo con el plan.

### 3.5.4. Aplicación de la carta de control

Al aplicar la carta al subproceso “desmineralización” se debe considerar en el momento del muestreo para el análisis que las muestras sean tomadas bajo las mismas circunstancias, se debe considerar los parámetros de regeneración, tiempo de retro lavado y tiempos de funcionamiento.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

- Con el diagnóstico del proceso de purificación de agua se obtuvo un índice de capacidad de 0,43 los límites naturales LCS= 40,45 y LCI= 12,30; así el proceso no era capaz de cumplir con las especificaciones técnicas que requerían de 40 ppm máximo de dureza y 80 ppm máximo de alcalinidad, el índice de estabilidad del proceso dio como resultado un valor igual a 0, y con variabilidad del tipo alta. Con esto se logró describir al proceso como: Clase 4, no adecuado, estable, incapaz, de alta variabilidad y que requiere serios cambios.
- Para poner bajo control el proceso de desmineralización de agua se procedió a realizar cambios en el proceso, y se obtuvo el aumento en el índice de capacidad de 0,43 inicial a 1,39, la variabilidad pasó de alta a baja y los límites naturales de control LCS= 21,01 y LCI= 3,07, con lo cual el proceso se describe como: clase 1, adecuado, estable, capaz y con baja variabilidad.
- Se establecieron controles para mantener la mejora lograda en el proceso; la aplicación de las cartas de control, el muestreo y la elaboración de las cartas cada hora; se estandarizó el subproceso de desmineralización con la aplicación de un manual de arranque y regeneración.

### 4.2. Recomendaciones

- Realizar el muestreo de manera sistemática y ordenada de acuerdo con el plan establecido para el manejo de las cartas de control, se debe realizar un análisis diario de las cartas de control y un análisis mensual o trimestral para prever tendencias de inestabilidad en el proceso.
- Los instrumentos de medición deben ser calibrados al menos cada tres meses; se recomienda realizar la calibración de los equipos con un organismo de normalización que garantice el correcto funcionamiento y una medición confiable.
- Regularizar los planes de mantenimiento para los equipos, optar por el mantenimiento preventivo como estrategia para el correcto funcionamiento del proceso; actualmente se realiza mantenimiento correctivo anual.

## Bibliografía

- Armand, V. (1994). *Control total de la calidad*. (1era. ed.). Nueva York: Editorial MC Graw Hill.
- Arvelo, Á. (1998). *Capacidad de los procesos industriales: Métodos estadísticos exigidos por la norma ISO 9000*. (1era ed.). Caracas, Venezuela: Universidad Católica Andrés Bello.
- Canela, M. y Griful, E. (2005). *Gestión de la calidad*. (1da ed.) Reimpresión. Barcelona, España; UPC.
- Carot, A. (1998). *Control estadístico de la calidad*. Valencia, España: Servicio de Publicaciones.
- Chase, J. y Aquilano, R. (2009). *Administración de la producción y Operaciones* (12ava ed.). México: Editorial MC Graw Hill.

- Crosby, P. (2009). *La calidad no cuesta*. (1era ed.). México: Editorial Patria.
- Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos*. (2da ed.). Colombia: Editorial Universidad de Antioquia.
- Evans, J. y William, M. (2005). *Administración y Control de la Calidad*. (6ta ed.). México: Editorial Thompson.
- Grez, B. (2003). *Seis sigmas para directivos*. España: Editorial Mc.Graw Hill.
- Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2013). *Control Estadístico de la calidad y seis sigmas*. (3era ed.). México: Editorial Mc. Graw Hill.
- Harrington, J. (1997). *Administración total del mejoramiento continuo*. Colombia: Editorial McGraw-Hill.
- Hudson, W. y Maynard, J. (2001). *Manual del ingeniero Industrial*. (4ta ed.). México: Editorial Mc Graw Hill.
- Ivancevich, L. Lorenzi, P. y Skinner, S. (1996) *Gestión: Calidad y Competitividad*. (1era ed.). España: Irwin.
- Juran, M. (1990). *Juran y el Liderazgo para la Calidad*, un manual para directivos. Madrid, España: Editorial Díaz de Santos, S.A.
- Kuehl, R. (2001). *Diseño de experimentos*. (2da ed.). México: Editorial Thompson S.A.
- Márquez, M. (2013). *Metodología seis sigma para control de calidad*. (2da ed.). Publishing P.
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. (2da ed.). México: Grupo Editorial Limusa – Wiley.
- Montgomery, D. (2010). *Control estadístico de la calidad*. (3era ed.). México: Grupo Editorial Limusa – Wiley.
- Oriol, A. (2005). *Costes de calidad y de no calidad*. (3er ed.). Barcelona, España: Editorial Planeta de Angostini.
- Pérez, F. (1994). *Gestión de la calidad empresarial*. Madrid, España: Editorial Esic.
- Prat, B. (2000). *Métodos Estadísticos: Control y mejora de la calidad*. (2da ed.). Barcelona, España. Editorial UPC.
- Quezada L. (2010) *“Estadística para Ingenieros”* (1era ed.) Lima, Perú: Empresa Editora Macro.
- San Miguel, P. (2009). *Calidad*. (1era ed.). Madrid España: Editorial Paraninfo S.A.
- Verdoy, P. (2006). *Manual de control estadístico de calidad: Teoría y aplicaciones*. España: Publicación de la Universidad de la Jaume I.