



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

## **ÁREA ADMINISTRATIVA**

**TÍTULO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE LA CALIDAD**

**Gestión energética de una estación de bombeo mediante el uso del control estadístico de procesos. Estudio de caso: Acueducto La Esperanza – Refinería del Pacífico. Manabí, 2017.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**AUTOR: Andrade Cedeño, Rogger José. Ing.**

**DIRECTOR: Armas Herrera, Reinaldo. Phd.**

**CENTRO UNIVERSITARIO GUAYAQUIL**

**2017**



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

*Septiembre, 2017*

## APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Doctor.

Reinaldo Armas Herrera

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación, denominado: Gestión energética de una Estación de Bombeo mediante el uso del Control Estadístico de Procesos. Estudio de caso: Acueducto La Esperanza – Refinería del Pacífico. Manabí, 2016., realizado por Rogger José Andrade Cedeño, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, octubre de 2017.

f).....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Doctor.

Reinaldo Armas Herrera

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

Yo Rogger José Andrade Cedeño declaro ser autor del presente trabajo de titulación: Gestión energética de una Estación de Bombeo mediante el uso del Control Estadístico de Procesos. Estudio de caso: Acueducto La Esperanza – Refinería del Pacífico. Manabí, 2016., siendo Reinaldo Armas Herrera director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, concepto, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad.

f).....

Autor.....

Cédula.....

## **DEDICATORIA**

Deseo dedicar el logro de este objetivo a Dios, a mi esposa Ana y a mi hija Analía, la luz de mi vida. Todo el esfuerzo realizado es por ustedes. Los amo infinitamente.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por cuidarme siempre en todos los aspectos de mi vida.

A mi esposa Ana por su total apoyo, su constante amor brindado en todo momento, pero sobre todo su tolerancia y paciencia en los momentos más difíciles.

A mis padres Roger y Amancia por sus continuas enseñanzas y los valores inculcados, permitiéndome desde niño actuar con responsabilidad y ética en mi diario actuar.

Al Dr. Reinaldo Armas y a todos mis profesores por su gran profesionalismo y por todo el apoyo brindado.

A la empresa Refinería del Pacífico Eloy Alfaro, por haberme brindado la confianza de poder realizar esta investigación en sus instalaciones.

## INDICE

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
INDICE .....	vi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	4
1.2. Justificación .....	5
1.3. Objetivos .....	6
1.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.2. Objetivos específicos .....	6
1.4. Metodología .....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Estado de un proceso .....	9
2.1.1. Variabilidad y estabilidad de un proceso .....	9
2.1.2. Capacidad y desempeño de un proceso .....	10
2.2. Control estadístico de procesos (CEP).....	14
2.2.1. Hoja de verificación.....	16
2.2.2. Diagrama de proceso.....	16
2.2.3. Histograma.....	16
2.2.4. Estratificación.....	17
2.2.5. Diagrama de dispersión .....	17
2.2.6. Análisis de Pareto .....	17
2.2.7. Lluvia de ideas .....	17
2.2.8. Análisis de causa - efecto .....	18
2.2.9. Carta de control .....	18

2.3.	Estudio de capacidad en procesos.....	21
2.4.	Calidad Seis Sigma.....	24
2.5.	Control automático de procesos (CAP) .....	26
2.6.	Integración entre el CEP y el CAP.....	29
2.7.	Sistemas de bombeo.....	31
2.7.1.	Generalidades.....	31
2.7.2.	Gestión energética en sistemas de bombeo.....	34
2.7.3.	Mediciones de eficiencia en sistemas de bombeo.....	35
3.	DESCRIPCIÓN .....	38
3.1.	La organización.....	39
3.2.	Estación de bombeo .....	39
3.2.1.	Descripción del sistema .....	39
3.2.2.	Requerimientos de agua .....	42
3.2.3.	Datos técnicos de los equipos.....	43
3.2.4.	Rangos de operación .....	45
3.2.5.	Suministro eléctrico.....	45
3.2.6.	Sistema de control e instrumentación.....	46
4.	RESULTADOS.....	51
4.1.	Análisis de fallas súbitas en el proceso .....	52
4.1.1.	Detección y priorización de fallas súbitas .....	52
4.1.2.	Causa raíz.....	54
4.2.	Análisis de la variabilidad del proceso.....	55
4.2.1.	Selección de variables para el análisis.....	55
4.2.2.	Cartas de control univariable.....	55
4.2.3.	Cartas de control multivariable .....	60
4.2.4.	Causas especiales de variación .....	64
4.2.5.	Causa raíz.....	64
4.3.	Acciones de mejora.....	66
4.4.	Análisis de la capacidad del proceso.....	68

4.4.1. Carta de control sin causas especiales de variación .....	68
4.4.2. Especificaciones de ingeniería para la eficiencia del sistema.....	69
4.4.3. Estudio de capacidad del proceso.....	70
4.5. Análisis económico .....	73
CONCLUSIONES .....	75
RECOMENDACIONES.....	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
ANEXOS.....	82
Anexo 1: Valores de constantes para desarrollo de cartas de control .....	83
Anexo 2: Cartas tradicionales de control (univariable).....	84
Anexo 3: Cartas de control para detección de cambios pequeños (univariable) .....	85
Anexo 4: Cartas de control multivariable .....	86
Anexo 5: Curva característica de las bombas principales.....	87
Anexo 6: Curvas multi-velocidades de las bombas principales.....	88
Anexo 7: Curvas de desempeño de los motores. ....	89
Anexo 8: Ahorros económicos por uso de variadores de velocidad.....	90
Anexo 9: Ahorros económicos por uso del control estadístico de procesos (CEP) ..	91

## RESUMEN

La eficiencia energética es esencial para el desarrollo sostenible de los países, y tiene un gran impacto tanto en la rentabilidad como en la sostenibilidad de la producción de una industria. Las bombas son ampliamente utilizadas en la industria, y están diseñadas para operar en un punto de mejor eficiencia, por lo que desviaciones producen desperdicio de energía. El control estadístico de procesos (CEP) es una herramienta para la gestión de la calidad que sirve para monitorear y controlar procesos, permitiendo identificar las causas que producen variación para que puedan ser removidas, conduciendo así a la mejora continua. Con la aplicación del CEP en el estudio de caso, se detecta que la baja confiabilidad del suministro eléctrico provoca la mayoría de paldas indeseadas. Además se detecta que, en operación continua, la eficiencia cae a valores incluso menores al 70%, aun cuando la especificación de ingeniería del proyecto establece un valor del 73%. Las acciones de mejora ejecutadas evitan que la eficiencia caiga a menos del 72%. Con el proceso mejorado se realiza un estudio de capacidad, y se determina que la planta tiene un nivel sigma entre 3 y 4. Finalmente, para el análisis económico se realizan varios escenarios en función de los requerimientos de agua. Se determina que gracias al uso de variadores de velocidad se logran ahorros entre el 57 y 69% (entre 1,05 y 2,11 MMUSD al año) y que gracias al uso del CEP se logran ahorros adicionales entre 2,4 y 5,3% (73 y 127 MUSD al año).

**PALABRAS CLAVES:** eficiencia energética, sistemas de bombeo, sistemas de control de procesos, variadores de velocidad, control estadístico de procesos, cartas de control, gestión de la calidad.

## **ABSTRACT**

Energy efficiency is essential for the sustainable development of countries, and has a major impact on both profitability and sustainability of an industry's production. Pump systems are widely used in the industry, and are designed to operate at an optimum duty point; deviation from which will result in an energy waste. Statistical Process Control (SPC) is a quality management tool used for process monitoring and control, that allows the identification of especial causes that produce variation so that they can be removed, achieving continuous improvement. With the application of CEP in the case study, it is detected that the low reliability of the electrical supply causes most plant stops. In addition, it is detected that in continuous operation, the efficiency drops to values lower than 70%, even though the engineering specification of the project establishes a value of 73%. The improvement actions implemented prevent efficiency dropping to less than 72%. With the improved process it is developed a capacity study and determined that the plant has a sigma level between 3 and 4. Finally, for the economic analysis several scenarios are made depending on the water requirements. It is determined that because of the use of variable speed drives savings are achieved between 57 and 69% (between 1.05 and 2.11 MMUSD), and that because of the use of CEP additional savings are achieved between 2.4 and 5.3% (73 and 127 MUSD).

**KEYWORDS:** energy efficiency, pump systems, process control systems, variable speed drives, statistical process control, control charts, quality management.

## **1. INTRODUCCIÓN**

## 1.1. Planteamiento del problema

La eficiencia energética es un elemento fundamental en el camino hacia un futuro energético sostenible. A medida que la demanda mundial de energía sigue creciendo para satisfacer las necesidades y aspiraciones de las personas en todo el mundo, las acciones para aumentar la eficiencia energética se vuelven más importantes.

El consumo total de energía eléctrica a finales del 2014 alcanzó los 19841 TWh (teravatio-hora) habiendo aumentado un 1,7% con respecto al año 2013, mientras que la tasa promedio de incremento del consumo eléctrico en el mundo es del 3,4% desde 1974. Los países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) reportan un consumo total de electricidad para el 2014 de 9320 TWh, lo cual representa un decremento del 0,6% con respecto al año 2013. Mientras que los países no miembros del OCDE, dentro del cual se encuentra el Ecuador, reportan un consumo total de electricidad de 10520 TWh lo que representa un incremento del 3,9% en relación a lo consumido en el año 2013, siendo el sector industrial el mayor consumidor de electricidad con un 52% de peso. (Agencia Internacional de Energía, 2016).

Por otro lado, la Agencia de Regulación y Control de Electricidad del Ecuador (2017) ha reportado un consumo de electricidad de 19331 GWh (gigavatio-hora) para el año 2015, lo que significa un incremento del 5,42% con relación al año 2014, siendo el sector residencial el primer consumidor con un 32,11% y el sector industrial el segundo mayor consumidor con un 24% de peso.

En la industria, más que en ningún otro lugar, la eficiencia energética tiene grandes implicaciones y tiene gran impacto tanto en la rentabilidad como en la sostenibilidad de la producción. Desde una perspectiva de rentabilidad, la energía representa los gastos operativos más relevantes en muchos procesos industriales; por lo que un uso efectivo de la energía representa un factor atractivo en cualquier política de reducción de costos.

Las bombas se utilizan ampliamente en la industria para proporcionar diferentes servicios como transferencia de fluidos, sistemas hidráulicos, sistemas de refrigeración y lubricación, entre otros. De hecho, la mayoría de las fábricas, edificios comerciales y municipios dependen de sistemas de bombeo para su operación diaria. Según el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América (2006), en el sector manufacturero las bombas representan el 27% de la electricidad utilizada por los sistemas industriales. En el sector comercial, las bombas se utilizan principalmente en

sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) para proporcionar agua para la transferencia de calor. Los municipios usan bombas para transferencia y tratamiento de agua, sistemas de aguas residuales y para drenaje.

En el Ecuador las aplicaciones industriales que usan estaciones de bombeo son variadas, van desde acueductos, redes de transporte de agua potable, redes de alcantarillado, sistemas de drenajes, sistemas de riego, industria alimenticia, industria cervecera, industria química, transporte de hidrocarburos, industria petrolera, refinerías, industria petroquímica, entre otras. Específicamente en la provincia de Manabí existe un sistema llamado Acueducto La Esperanza – Refinería del Pacífico, que consta con una estación de bombeo grande e importante dentro de la provincia y del país.

Un sistema de bombeo está diseñado para operar en un punto de servicio a la mejor eficiencia; por lo que desviaciones significativas bajo este punto conlleva a desperdicio de energía. El consumo de energía eléctrica es uno de los costos más difíciles de gestionar en las industrias; sin embargo, si se logra realizar correctamente se podrá ahorrar dinero asegurando una mayor productividad y competitividad.

## **1.2. Justificación**

Cuando el gran gurú de la gestión de la calidad y la mejora de procesos W. Edwards Deming murió a los 93 años de edad a finales de 1993, las últimas palabras en sus labios deben haber sido "La administración todavía no entienda la variabilidad en el proceso". (Oakland, 2008).

El Control Estadístico de Procesos (CEP) es una herramienta para la gestión de la calidad que sirve para monitorear y controlar los procesos, permitiendo identificar las causas que producen la variación para que puedan ser removidas, conduciendo así a la reducción de la variabilidad y a la mejora continua del proceso. El CEP es uno de los principales desarrollos tecnológicos del siglo XX por que está basado en principios sólidos, es fácil de usar, tiene impacto significativo y puede ser aplicado en cualquier tipo de proceso. Las técnicas estadísticas como el CEP, junto con otras herramientas de solución de problemas, deben formar parte del sistema de gestión de la organización, cuya efectividad depende de la ejecución exitosa de sus cuatro componentes que son: la planificación de la calidad, el control de la calidad, el aseguramiento de la calidad y la mejora de la calidad. El CEP constituye la base técnica para el control y la mejora de la calidad. (Montgomery, 2013).

La utilización eficiente de la energía es de suma importancia en el sector industrial donde la eficiencia energética no implica producir menos para reducir los consumos energéticos, sino más bien mejorar la eficiencia y productividad de la planta para lograr producir la misma cantidad de productos y servicios con menos recursos. El organismo para la regulación medioambiental de la Unión Europea, denominado Directiva de Prevención y Control Integrados de la Contaminación, también conocido como Directiva IPPC (por sus siglas en inglés), en su documento emitido en el año 2009 denominado *“Best Available Techniques for Energy Efficiency”* incluye al CEP y a los sistemas de control automático de procesos como dos herramientas necesarias para controlar efectivamente los procesos, asegurando una mayor eficiencia energética. En la misma línea, La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, conocida como EPA (por sus siglas en inglés), en el año 2011 publicó el documento denominado *“Lean, Energy & Climate Toolkit. Achieving Process Excellence Through Energy Efficiency and Greenhouse Gas Reduction”* en el cual también se incluyen metodologías de la calidad como Six Sigma y CEP en el paquete de herramientas útiles para lograr la eficiencia energética en las organizaciones, destacando que estas técnicas estadísticas de análisis y control de procesos son útiles para encontrar y abordar causas de variación y desperdicios energéticos en los procesos.

La presente investigación pretende demostrar, mediante un estudio de caso, como el uso del CEP puede resultar en una estrategia eficaz para monitorear, controlar y mejorar el desempeño de una estación de bombeo, logrando así su eficiencia energética y ahorros económicos significativos.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Gestionar la eficiencia energética de un sistema de bombeo mediante el uso del control estadístico de procesos (CEP).

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- ✓ Estudiar las diferentes técnicas y herramientas del control estadístico de procesos (CEP).
- ✓ Estudiar los aspectos técnicos de los sistemas de bombeo y de los sistemas de control automático de procesos.

- ✓ Usar el CEP para monitorear y mejorar el proceso de bombeo de agua del estudio de caso.
- ✓ Determinar los beneficios económicos por eficiencia energética debido a la aplicación del CEP.

#### **1.4. Metodología**

La metodología para la presente investigación consiste en utilizar un estudio de caso para demostrar como el uso del CEP puede ser una estrategia eficaz para gestionar la eficiencia energética de una estación de bombeo y lograr ahorro de dinero.

Para lograr los objetivos de esta investigación, se siguen los siguientes pasos:

- ✓ Dominio de los conceptos, técnicas y herramientas del CEP.
- ✓ Dominio de los conceptos y tecnologías en sistemas de bombeo y sistemas de control automático de procesos.
- ✓ Descripción del funcionamiento del sistema de bombeo del estudio de caso.
- ✓ Selección de variables relacionadas con la eficiencia energética del sistema de bombeo.
- ✓ Uso del CEP para monitorear las variables del proceso e identificar causas especiales de variación.
- ✓ Propuesta de acciones correctivas y preventivas para la mejora del proceso.
- ✓ Establecimiento de especificaciones de eficiencia energética.
- ✓ Análisis de la capacidad del proceso bajo control estadístico.
- ✓ Estimación y análisis del ahorro económico.

## **2. MARCO TEÓRICO**

## 2.1. Estado de un proceso

Un proceso es un conjunto de actividades que interactúan para lograr un resultado. “Todo lo que se realiza en cualquier tipo de organización es un proceso, que requiere entendimiento, tiene variación, debe ser apropiadamente controlado, tiene capacidad y necesita ser mejorado” (Oakland, 2008).

### 2.1.1. Variabilidad y estabilidad de un proceso

Shewhart (1931) clasificó la variabilidad de un proceso en dos categorías: causas especiales y causas comunes de variación. Señaló que las causas especiales de variación pueden ser eliminadas mediante la implementación del control estadístico de procesos para identificar y eliminar la causa raíz que provoca los cambios en el proceso.

Para Gutiérrez y de la Vara (2013) todos los procesos poseen variación debido a la interacción que existe con diversos factores que están agrupados en lo que se conoce como las 6M: materiales, maquinaria, medición, mano de obra, métodos y medio ambiente. Las 6M son susceptibles a cambiar con el tiempo debido a desgastes, desajustes, errores, fallas, descuidos, etc., lo que provoca variaciones a la salida de los procesos, y estas variaciones pueden ser provocadas por causas comunes o especiales. Una variación por causa común es aquella que permanece día a día, y es aportada en forma natural por las condiciones de las 6M, mientras que una variación por causa especial es generada por una situación o circunstancia especial que no está de manera permanente en el proceso.

Cuando solo las causas comunes están presentes en un proceso, el proceso se considera “estable”, “*bajo control estadístico*” o “*bajo control*”. Cuando existen causas especiales de variación, la variación será excesiva y el proceso se considera “*inestable*”, “*fuera de control estadístico*” o con variaciones aleatorias mayores a las esperadas. (Oakland, 2008)

La herramienta estadística que permite monitorear y analizar el comportamiento del proceso con el paso del tiempo es la carta de control, la cual permite distinguir entre las causas comunes y especiales de variación, y caracterizar el funcionamiento del proceso para tomar las acciones de control y mejora.

En una carta de control se grafican los valores que va tomando un estadístico de una variable en estudio, por ejemplo una media muestral, un rango, un porcentaje, etc.; estos valores son representados gráficamente mediante puntos que a su vez se unen

con una línea recta. La línea central de la gráfica representa el promedio, y las líneas correspondientes a los límites superior e inferior definen el rango de variación del estadístico de la variable. Cuando la probabilidad de que la mayoría de valores (puntos) se encuentren dentro de los límites es alta, se dice que el proceso es estadísticamente estable o que se encuentra bajo control estadístico; mientras que si en la carta de control se observan muchos puntos fuera de sus límites o si éstos siguen un patrón no aleatorio, entonces el proceso es inestable o está fuera de control estadístico.

El índice de inestabilidad proporciona una medida de qué tan inestable es un proceso, permitiendo diferenciar los procesos que de manera esporádica tengan puntos o señales especiales de variación, de los que con frecuencia funcionan en presencia de causas especiales de variación. (Gutiérrez et al., 2013)

El índice de inestabilidad se calcula como se muestra en la ecuación 2.1.

$$S_t = \frac{\text{Número de puntos especiales}}{\text{Número total de puntos}} * 100 \quad 2.1$$

Donde  $S_t$  es el índice de inestabilidad, el *número de puntos especiales* corresponde a la cantidad de puntos relacionados a la causa especial de variación y el *número de puntos totales* corresponde a la cantidad total de puntos que fueron graficados en la carga de control.

### **2.1.2. Capacidad y desempeño de un proceso**

La capacidad de un proceso es la habilidad que tiene el proceso para generar productos dentro de las especificaciones establecidas por el cliente. “Se dice que un proceso es capaz cuando cumple con los requerimientos mínimos de tener el promedio del proceso en el valor nominal y de no tomar cantidades inferiores a las especificadas por el cliente” (Relyea, 2011).

La capacidad de un proceso consiste en conocer la amplitud de la variación natural del proceso para una característica de calidad dada, esto permitirá saber en qué medida tal característica de calidad es satisfactoria, es decir, que cumple con especificaciones.

Otro aspecto importante a la hora de hablar de capacidad de un proceso es la perspectiva de corto o largo plazo. La capacidad de corto plazo se calcula a partir de muchos valores obtenidos en un periodo suficientemente corto de tiempo de manera que las influencias externas sean despreciables, representando así el potencial del

proceso, o lo que es lo mismo, la mejor condición que se puede esperar del mismo. Para analizar y evaluar la capacidad de corto plazo se utilizan los indicadores mostrados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1

*Índices de capacidad en el corto plazo.*

ÍNDICE	DEFINICIÓN.	ECUACIONES
Índice de capacidad potencial del proceso ( $C_P$ )	Indicador de la capacidad potencial del proceso que resulta de dividir el ancho de las especificaciones (variación tolerada) entre la amplitud de la variación natural del proceso.	$C_P = \frac{LES - LEI}{6\sigma}$
Índice de capacidad para la especificación inferior ( $C_{PL}$ )	Indicador de la capacidad de un proceso para cumplir con la especificación inferior de una característica de calidad.	$C_{PL} = \frac{\mu - LEI}{3\sigma}$
Índice de capacidad para la especificación superior ( $C_{PU}$ )	Indicador de la capacidad de un proceso para cumplir con la especificación superior de una característica de calidad.	$C_{PU} = \frac{LES - \mu}{3\sigma}$
Índice de capacidad real del proceso ( $C_{PK}$ )	Indicador de la capacidad real de un proceso que se puede ver como un ajuste del índice $C_P$ para tomar en cuenta el centrado del proceso.	$C_{PK} = \text{Mínimo}[C_{PL}, C_{PU}]$
Índice de centrado del proceso (K)	Es un indicador de qué tan centrada está la distribución de un proceso con respecto a las especificaciones de una característica de calidad dada.	$K = \frac{\mu - N}{\frac{1}{2}(LES - LEI)} * 100$
Índice de Taguchi ( $C_{PM}$ )	Índice de Taguchi similar al $C_{PK}$ que, en forma simultánea, toma en cuenta el centrado y la variabilidad del proceso.	$C_{PM} = \frac{LES - LEI}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - N)^2}}$

*Nota:* Nomenclatura: N = valor objetivo para la correspondiente característica de calidad,  $\mu$  = media del proceso (población),  $\sigma$  = desviación estándar del proceso (población), LES = Límite de especificación superior, LEI = Límite de especificación inferior. Adaptado de "Índices de capacidad para procesos con doble especificación" por H. Gutiérrez y R. de la Vara, 2013, *Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma*, p. 100-107, Derechos Reservados 2013 por McGraw-Hill

En la tabla 2.2 se traduce el valor de los índices de capacidad a porcentaje fuera de especificación. Cuando el valor del índice de capacidad es mayor que 2 se tiene calidad Seis Sigma.

Tabla 2.2.

*Índices de capacidad y su equivalencia en porcentaje fuera de especificación.*

<b>Valor del índice (corto plazo)</b>	<b>Procesos con doble especificación (<math>C_p</math>) % fuera de las dos especificaciones</b>	<b>Con referencia a una sola especificación (<math>C_{PL}</math>, <math>C_{PU}</math>, <math>C_{PK}</math>) % fuera de una especificación</b>
0,2	54,8506	27,4253
0,3	36,8120	18,4060
0,4	23,0139	11,5070
0,5	13,3614	6,6807
0,6	7,1861	3,5930
0,7	3,5729	1,7864
0,8	1,6395	0,8198
0,9	0,6934	0,3467
1,0	0,2700	0,1350
1,1	0,0967	0,0483
1,2	0,0318	0,0159
1,3	0,0096	0,0048
1,4	0,0027	0,0013
1,5	0,0007	0,0003
1,6	0,0002	0,0001
1,7	0,0000	0,0000
1,8	0,0000	0,0000
1,9	0,0000	0,0000
2,0	0,0000	0,0000

*Nota:* Adaptado de “Los índices  $C_p$ ,  $C_{pi}$  y  $C_{ps}$  en términos de la cantidad de piezas malas; bajo normalidad y proceso centrado en el caso de doble especificación” por H. Gutiérrez y R. de la Vara, 2013, *Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma*, p.102-103, Derechos Reservados 2013 por McGraw-Hill

Por otro lado, la capacidad de largo plazo se calcula con muchos valores obtenidos en un periodo suficientemente largo de tiempo como para que los factores externos influyan en el desempeño del proceso. Los índices para el análisis de largo plazo no solo están enfocados a la capacidad del proceso, sino también en el desempeño del proceso en el largo plazo. La tabla 2.3 muestra cuales son estos indicadores de desempeño.

Tabla 2.3

Índices de desempeño del proceso en el largo plazo.

ÍNDICE	DEFINICIÓN.	ECUACIONES
Índice de desempeño potencial del proceso (process performance) ( $P_p$ )	Indicador del desempeño potencial del proceso, que se calcula en forma similar al índice $C_p$ pero usando la desviación estándar de largo plazo.	$P_p = \frac{LES - LEI}{6\sigma_L}$
Índice de desempeño para la especificación inferior ( $P_{PL}$ )	Indicador del desempeño de un proceso para cumplir con la especificación inferior, que se calcula en forma similar al índice $C_{PL}$ pero usando la desviación estándar de largo plazo.	$P_{PL} = \frac{\mu - LEI}{3\sigma_L}$
Índice de desempeño para la especificación superior ( $P_{PU}$ )	Indicador del desempeño de un proceso para cumplir con la especificación superior, que se calcula en forma similar al índice $C_{PU}$ pero usando la desviación estándar de largo plazo.	$P_{PU} = \frac{LES - \mu}{3\sigma_L}$
Índice de desempeño real del proceso ( $P_{PK}$ )	Indicador del desempeño real del proceso, que se calcula en forma similar al índice $C_{PK}$ pero usando la desviación estándar de largo plazo.	$P_{PK} = \text{Mínimo}[P_{PL}, P_{PU}]$

*Nota:* Nomenclatura:  $\mu$  = media del proceso (población),  $\sigma_L$  = desviación estándar de largo plazo, LES = Límite de especificación superior, LEI = Límite de especificación inferior. Adaptado de "Capacidad de largo plazo e índices Pp y Ppk" por H. Gutiérrez y R. de la Vara, 2013, *Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma*, p. 108, Derechos Reservados 2013 por McGraw-Hill

## **2.2. Control estadístico de procesos (CEP)**

El Control Estadístico de Procesos (CEP) es una colección poderosa de herramientas de solución de problemas, que se utiliza para lograr estabilidad en los procesos y mejorar la capacidad mediante la reducción de la variabilidad (Montgomery, 2013).

Para Montgomery (2013) el CEP es uno de los principales desarrollos tecnológicos del siglo XX por que está basado en principios sólidos, es fácil de usar, tiene impacto significativo y puede ser aplicado en cualquier tipo de proceso. Sugiere que las técnicas estadísticas como el CEP, junto con otras herramientas de solución de problemas, deben formar parte del sistema de gestión de la organización, cuya efectividad depende de la ejecución exitosa de sus cuatro componentes que son: la planificación de la calidad, el control de la calidad, el aseguramiento de la calidad y la mejora de la calidad. El CEP constituye la base técnica para el control y la mejora de la calidad.

Sus herramientas principales son: hoja de verificación, histograma, estratificación, lluvia de ideas, análisis de Pareto, análisis de causa-efecto, diagrama de dispersión, diagrama de proceso y cartas de control.

Oakland (2008) propone una estrategia para la resolución de problemas y la mejora continua en los procesos, basándose en las herramientas del CEP. Este enfoque de mejora es presentado en la figura 2.1.

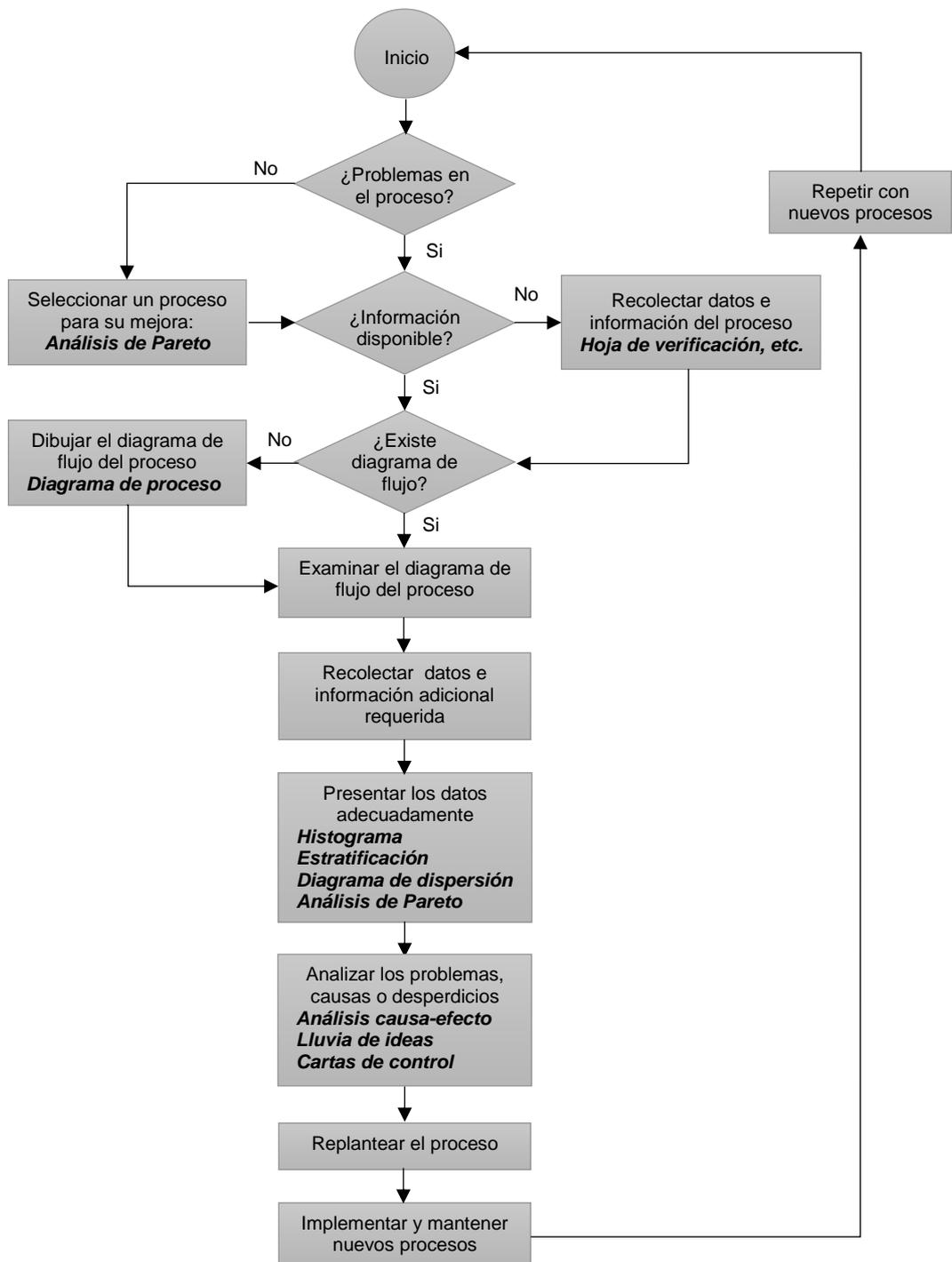


Figura 2.1. Estrategia para la mejora continua de procesos. Adaptado de “Strategy for continuous process improvement” por J. Oakland, 2008, *Statistical Process Control*, p. 279. Derechos Reservados 2008 por Butterworth Heinemann.

A continuación se describe cada una de las herramientas del CEP:

### **2.2.1. Hoja de verificación**

En las primeras etapas de la mejora de procesos, a menudo se vuelve necesario recolectar datos históricos o datos actuales del proceso en investigación. La hoja de verificación puede ser muy útil en esta actividad de recolección de datos (Montgomery, 2013).

Para Gutiérrez et al. (2013) una buena hoja de verificación debe ser sencilla, sistemática, de fácil análisis y debe permitir realizar un primer análisis sobre las principales características de la información en estudio.

### **2.2.2. Diagrama de proceso**

Gutiérrez et al. (2013) identifican tres tipos de diagrama de proceso que son: diagrama de flujo de proceso, diagrama PEPSU y mapeo de proceso.

El diagrama de flujo de proceso es una representación gráfica de la secuencia de los pasos necesarios para producir alguna salida. La salida puede ser un producto físico, un servicio, información o la combinación de las tres (Juran y De Feo, 2010).

Para Gutiérrez et al. (2013) el diagrama PEPSU tiene por objeto analizar el proceso y su entorno, y sus siglas corresponde a los acrónimos proveedores (P), las entradas (E), el proceso mismo (P), las salidas (S) y los usuarios (U). “Los diagramas PEPSU proporcionan una visión general simple de un proceso y son útiles para comprender y visualizar elementos básicos del proceso” (Montgomery, 2013).

Cuando se requiere estudiar el proceso desde lo macro hacia lo micro, Gutiérrez et al. (2013) recomiendan utilizar el mapeo de proceso, ya que en la visión macro no se entra a mucho detalle; en cambio, en la visión micro se puede analizar minuciosamente una parte específica del proceso

### **2.2.3. Histograma**

Un histograma es un resumen gráfico de la variación de un conjunto de datos. Cuatro conceptos relacionados con la variación en un conjunto de datos subyacen a la hora de utilizar el histograma: (1) los valores en un conjunto de datos casi siempre muestran variación, (2) la variación muestra un patrón, (3) los patrones de variación son difíciles de ver en tablas numéricas simples y (4) los patrones de variación son

más fáciles de ver cuando los datos se resumen pictóricamente en un histograma. (Juran et al., 2010).

#### **2.2.4. Estratificación**

Es el método de selección de muestras utilizado cuando la población completa, o el lote, está conformado por un conjunto complejo de características diferentes, por ejemplo, región, ingreso, edad, raza, sexo, educación, etc. En estos casos la muestra debe ser cuidadosamente dibujada en proporciones que representan la composición de la población. (Oakland, 2008).

La estratificación es una poderosa estrategia de búsqueda que facilita entender cómo influyen los diversos factores o variantes que intervienen en una situación problemática, de forma que sea posible localizar diferencias, prioridades y pistas que permitan profundizar en la búsqueda de las verdaderas causas de un problema. (Gutiérrez et al., 2013).

#### **2.2.5. Diagrama de dispersión**

El diagrama de dispersión es una gráfica utilizada para identificar una relación potencial entre dos variables. La forma del diagrama de dispersión usualmente indica que tipo de relación puede existir entre dos variables (Montgomery, 2013).

Oakland (2008) presenta el ejemplo de la temperatura de un proceso y la pureza del producto químico obtenido, y puntualiza que si la temperatura y la pureza están relacionadas, entonces controlando la temperatura del proceso se determinará la calidad del producto químico.

#### **2.2.6. Análisis de Pareto**

La técnica para organizar los datos de acuerdo a su prioridad e importancia y su vinculación en un marco de resolución de problemas es conocida como análisis de Pareto (Oakland, 2008).

Vilfredo Pareto fue un reconocido economista italiano que en uno de sus estudios observó que alrededor del 80 al 90% de la riqueza italiana posaba en manos de entre el 10 y el 20% de la población. Esta distribución ha sido observada en muchos otros campos de manera empírica y se ha convertido en la Regla del 80/20 o Ley de Pareto.

#### **2.2.7. Lluvia de ideas**

La lluvia de ideas, tormenta de ideas o Brainstorming (por su significado en inglés) es una técnica grupal para generar ideas constructivas y creativas de todos los participantes. El uso de esta herramienta debe proporcionar nuevas ideas, o nuevas aplicaciones y uso novedoso de las ideas existentes. (Juran et al., 2010).

Las sesiones de lluvia o tormenta de ideas son una forma de pensamiento creativo encaminada a que todos los miembros de un grupo participen libremente y aporten ideas sobre determinado tema o problema (Gutiérrez et al., 2013).

### **2.2.8. Análisis de causa - efecto**

Para Oakland (2008), el análisis de causa – efecto combina dos herramientas: el diagrama de causa – efecto y la lluvia de ideas.

El diagrama de causa - efecto, también conocido como el diagrama de Ishikawa (debido a su inventor) o el diagrama de espina de pescado (debido a su forma), muestra el efecto en la cabeza de una “espina central” con las causas en los extremos de las “costillas” que se derivan de ella. (Oakland, 2008). Los principales factores o causas se enumeran primero y luego se reducen a sub-causas y sub-sub-causas si es necesario.

Montgomery (2013) destaca que luego de haber identificado y aislado el problema, defecto o error, el diagrama de causa – efecto es una herramienta muy útil para eliminar causas potenciales, sobre todo en situaciones donde las causas no son tan obvias.

### **2.2.9. Carta de control**

Para Montgomery (2013) la carta de control es probablemente la herramienta más sofisticada del CEP, y aunque fue desarrollada en 1920 por Walter A. Shewhart cuando trabajaba en la compañía Bell, es una herramienta poderosa que puede ser utilizada en la actualidad para muchas aplicaciones. Los tres usos fundamentales de las cartas del control son:

1. Reducción de la variabilidad del proceso
2. Monitoreo y vigilancia del proceso
3. Estimación de los parámetros del producto o del proceso

Muchas características de calidad pueden expresarse en términos de una medición numérica. Como ejemplos, el diámetro de un cojinete se puede medir con un micrómetro y se expresa en milímetros o el tiempo para procesar el reclamo de un

seguro puede expresarse en horas. Una característica de calidad medible única, como una dimensión, peso o volumen, se llama *variable*. (Montgomery, 2013).

Juran et al. (2010) destacan lo “elegante” que puede ser la carta de control para distinguir entre las causas especiales y comunes de variabilidad, y mediante la figura 2.2 describe los componentes de la carta de control. Se observa en el eje horizontal el tiempo y en el eje vertical el rendimiento de una variable de calidad. Los puntos trazados muestran el rendimiento de la variable de calidad a medida que avanza el tiempo.

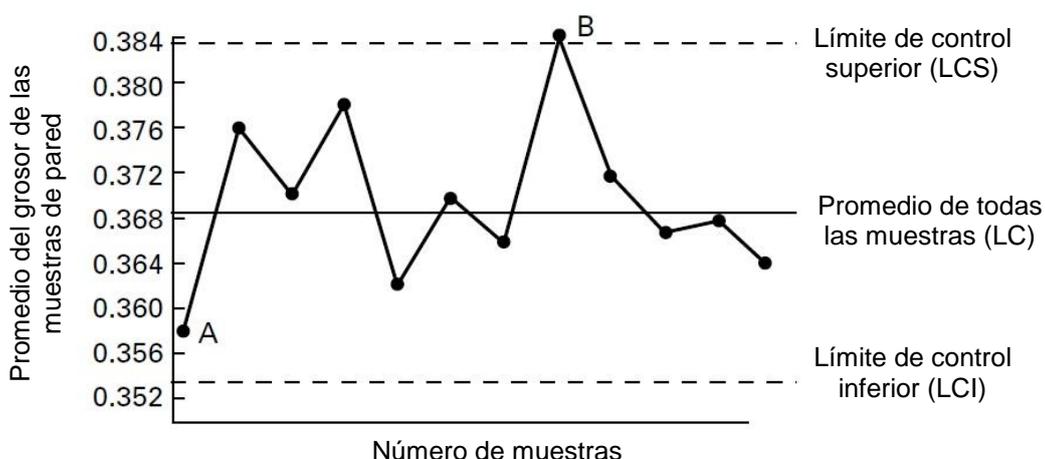


Figura 2.2. La carta de control de Shewhart. Adaptado de “The Shewhart Control Chart” por J. M. Juran y J. A. De Feo, *Juran’s Quality Handbook: The Complete Guide to Performance Excellence*, 2010, p. 109. Derechos Reservados por McGraw-Hill.

La figura 2.2 también exhibe tres líneas horizontales: la línea central (LC) que es el promedio del rendimiento pasado y es por lo tanto el nivel esperado de rendimiento. Las otras dos líneas son la línea de control superior (LCS) y la línea de control inferior (LCI), y son límites estadísticos que permiten separar las causas especiales de las causas comunes de variación.

En el anexo 2 se presenta un resumen conceptual de los tipos de cartas tradicionales de control para una sola variable, también conocidas como cartas tipo Shewhart.

Cuando una organización desea implementar por primera vez una carta de control, las cartas tradicionales son la mejor opción; sin embargo, una desventaja de este tipo de cartas es que son lentas para detectar cambio pequeños en el proceso. Por lo tanto, si la organización ya aplica satisfactoriamente cartas de control tradicionales pero desea potenciar el control con herramientas que detecten cambios pequeños en el proceso, las mejores opciones son las cartas CUSUM y EWMA.

La carta CUSUM (por sus siglas en inglés: *Cumulative Sum Control Chart*) funciona graficando las sumas acumuladas de las desviaciones con respecto a la media global o al valor nominal de la característica de interés, y dentro de esta existen dos subcategorías: la CUSUM con máscara (de dos lados) y la CUSUM tabular (de un solo lado). (Gutiérrez et. al., 2013).

La carta EWMA (por sus siglas en inglés: *Exponentially Weighted Moving-Average*) “promedios móviles exponencialmente ponderados” tiene un desempeño muy parecido a la carta CUSUM en la detección de cambios pequeños en el proceso, con la ventaja de que es más sencilla su realización. (Gutiérrez et. al., 2013).

La figura 2.3 muestra como las cartas tradicionales, CUSUM y EWMA realizan la ponderación al tiempo  $t$  de la información.

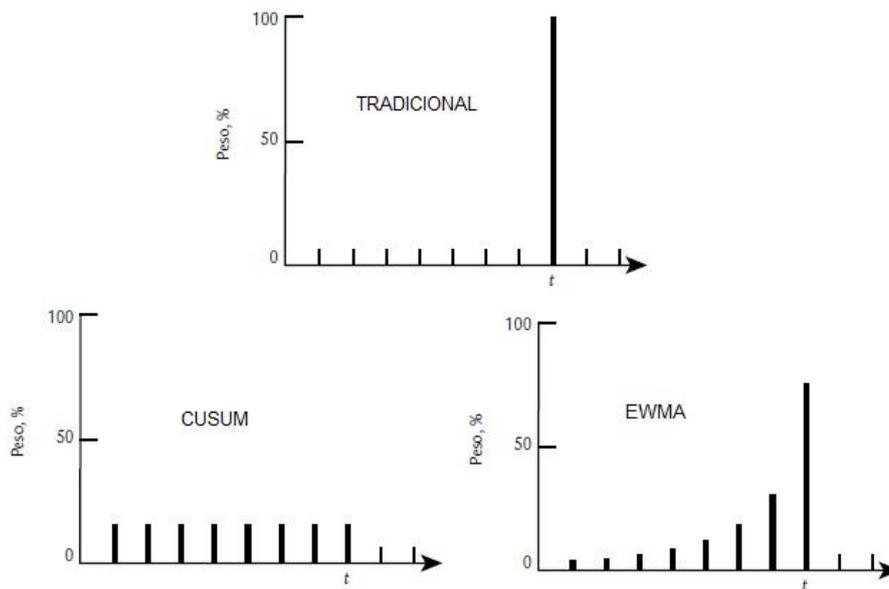


Figura 2.3. Ponderación al tiempo  $t$  de la información en las cartas de control para variables. Adaptado de “Ponderación al tiempo  $t$  de la información en las cartas Shewhart, CUSUM y EWMA” por H. Gutiérrez y R. De la Vara, 2013, *Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma*, p. 255. Derechos Reservados 2013 por Mc Graw Hill.

En el anexo 3 se presenta una tabla resumen de las cartas tipo CUSUM y EWMA.

Las cartas antes descritas corresponden a procesos con una perspectiva univariada, es decir, existe una sola variable de salida del proceso o característica de calidad de interés. En la práctica muchos escenarios de monitoreo y control de procesos involucran múltiples variables, lo que se puede resolver aplicando una carta tipo Shewhart, EWMA o CUSUM para cada variable, pero esto en ocasiones puede ser ineficiente y conducir a conclusiones erróneas; por lo que las cartas de monitoreo y control multivariado de procesos se vuelve una opción más viable. (Montgomery, 2010). Los primeros trabajos de monitoreo y control multivariado de procesos fueron

realizados en 1947 por Harold Hotelling, quien aplicó este procedimiento en bombarderos durante la Segunda Guerra Mundial; es por esto que la carta de control multivariada más conocida lleva su nombre.

Como ya se indicó con anterioridad, las cartas de control univariadas tipo Shewhart (resumidas en el anexo 2) son insensibles ante cambios pequeños de variación, y como alternativa se tienen las cartas tipo CUSUM y EWMA (resumidas en el anexo 3) que son más sensibles a esto cambios. La carta de control multivariada Hotelling  $T^2$ , al igual que su homóloga la carta de control univarido tipo Shewhart, también es relativamente insensible a cambios pequeños y moderados. Para los procesos multivariados donde se desea tener más sensibilidad en el monitoreo, existen las cartas de control multivariadas CUSUM y EWMA, también conocidas como MCUSUM y MEWMA. (Montgomery, 2010).

En el anexo 4 se presenta una tabla resumen de las cartas de control multivariable.

### **2.3. Estudio de capacidad en procesos**

Toda situación de resolución de problemas en cualquier proceso de una organización gira alrededor de la estabilidad y la capacidad del proceso; es decir, el problema puede ser por inestabilidad o por incapacidad y ocurre debido a que el proceso presenta demasiada variación, o por que el promedio del proceso se ha desplazado en relación a una media consistente. (Relyea, 2011).

La figura 2.4 muestra las dos categorías de problemas en proceso que pueden existir. La figura 2.4 (a) muestra el problema de inestabilidad, notándose que la media del proceso (representada en línea entrecortada) se ha desplazado. En este caso el problema de inestabilidad no genera productos fuera del límite de especificación inferior (LEI) ni del límite de especificación superior (LES). Por otro lado, la figura 2.4 (b) muestra un proceso que es estable pero que es incapaz de cumplir con las especificaciones del cliente.

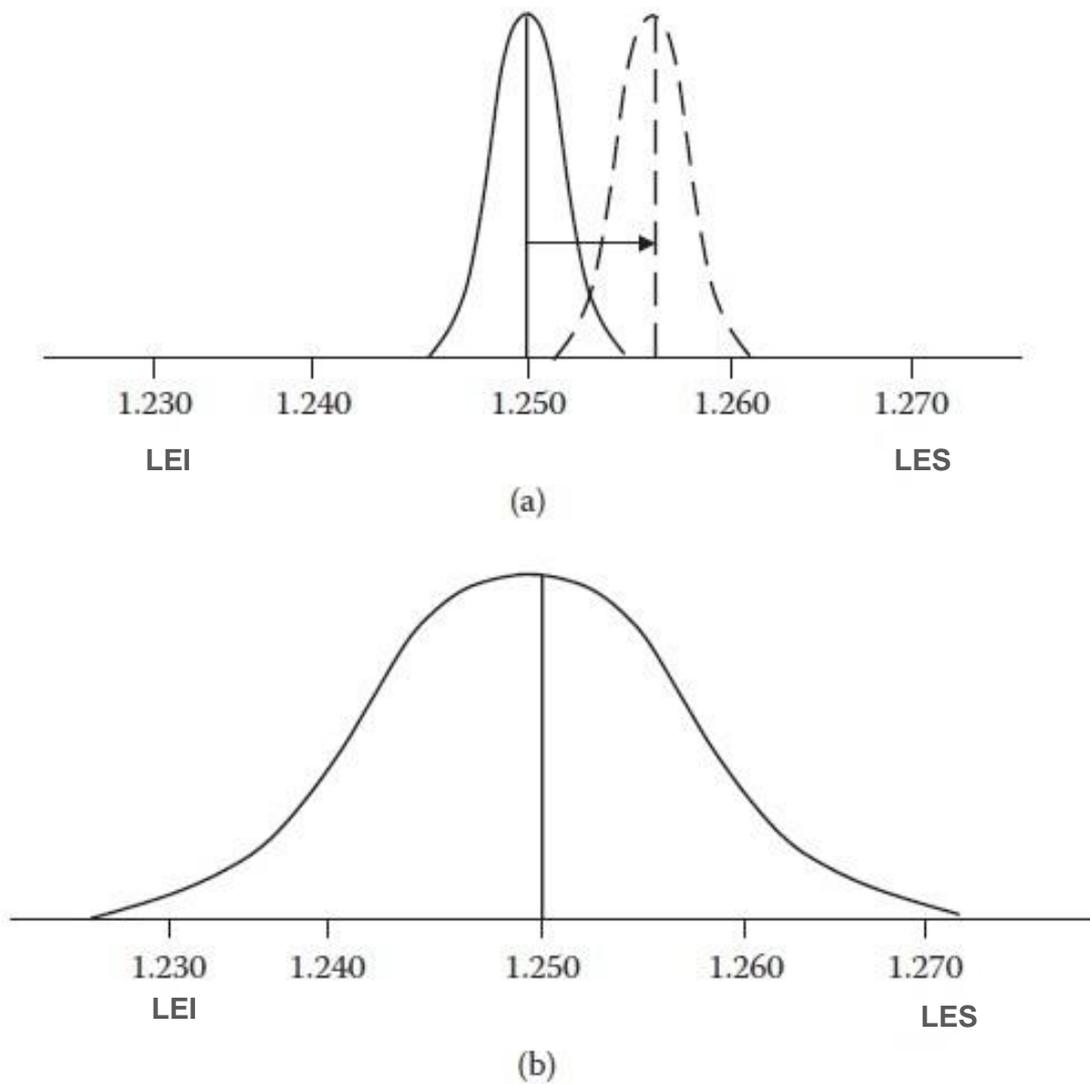


Figura 2.4. Problemas de inestabilidad e incapacidad. (a) La inestabilidad causa desplazamiento de la media del proceso. (b) La incapacidad resulta cuando la variabilidad normal excede las especificaciones del cliente. Adaptado de "The two categories of product problems that can exist" por D. B. Relyea, 2011, *The Practical Application of the Process Capability Study. Evolving from Product Control to Process Control*, p. 31. Derechos Reservados por Tylor & Francis Group.

En la figura 2.5 se describe un diagrama de flujo para llevar a cabo un estudio de capacidad en un proceso.

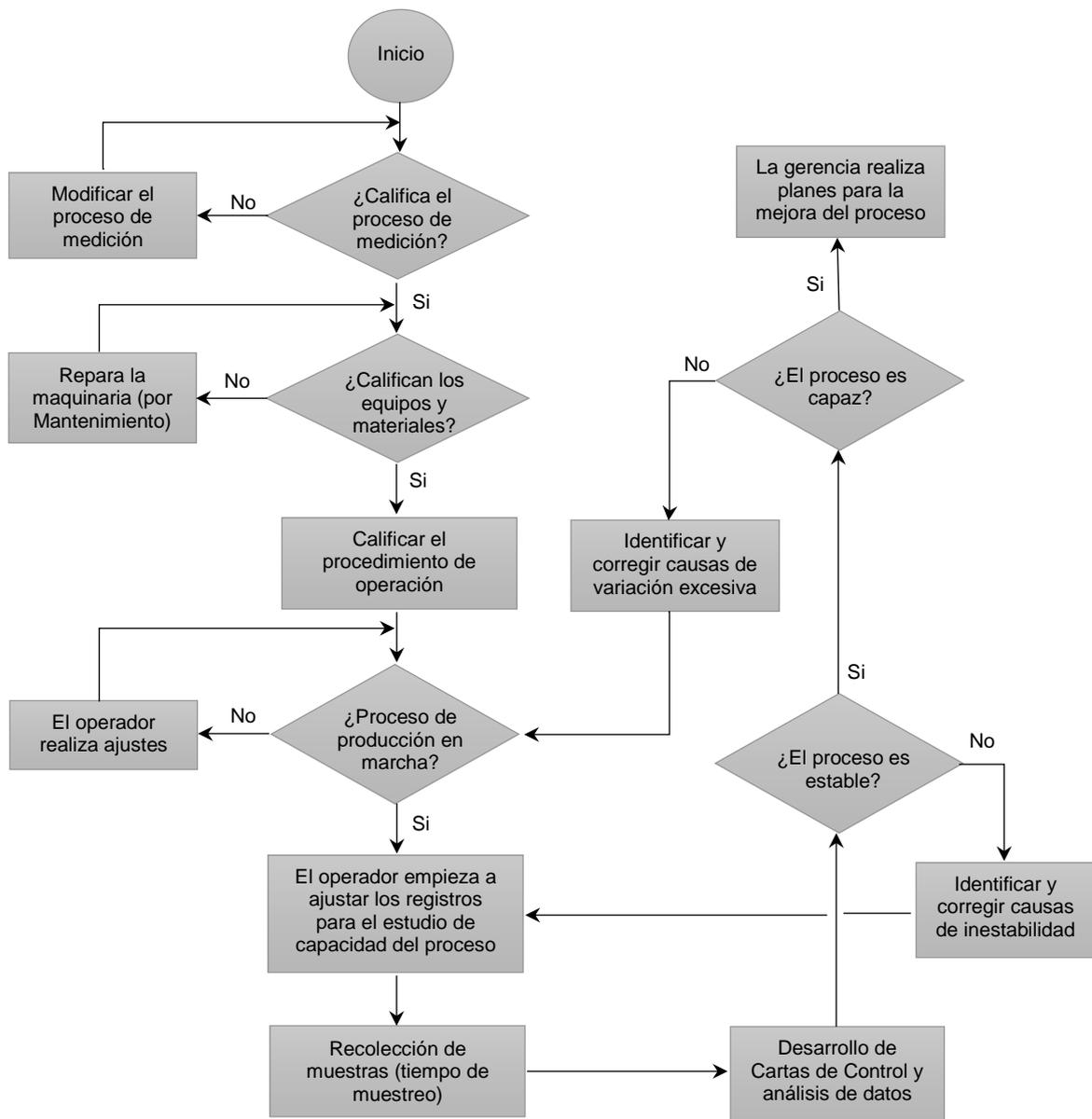


Figura 2.5. Diagrama de flujo para realizar un estudio de capacidad en un proceso. Adaptado de "Process capability study flowchart" por D. B. Relyea, 2011, *The Practical Application of the Process Capability Study. Envolving from Product Control to Process Control*, p. 32. Derechos Reservados por Tylor & Francis Group.

## 2.4. Calidad Seis Sigma

El concepto de Calidad Seis Sigma fue introducido por primera vez por Motorola como una estrategia para mejorar la fiabilidad y calidad de sus productos, los tiempos de ciclo y los costos por pruebas y reparaciones. Sigma es una unidad estadística de medida que describe la distribución sobre la media de un proceso. Un proceso que puede alcanzar una capacidad de alrededor de seis sigma puede esperarse que tenga una tasa de defectos de no más de unas pocas partes por millón, incluso permitiendo algún cambio en la media. En términos estadísticos, esto se aproxima a cero defectos. (Oakland, 2008).

En la figura 2.6 se muestra el concepto de Calidad Seis Sigma de Motorola.

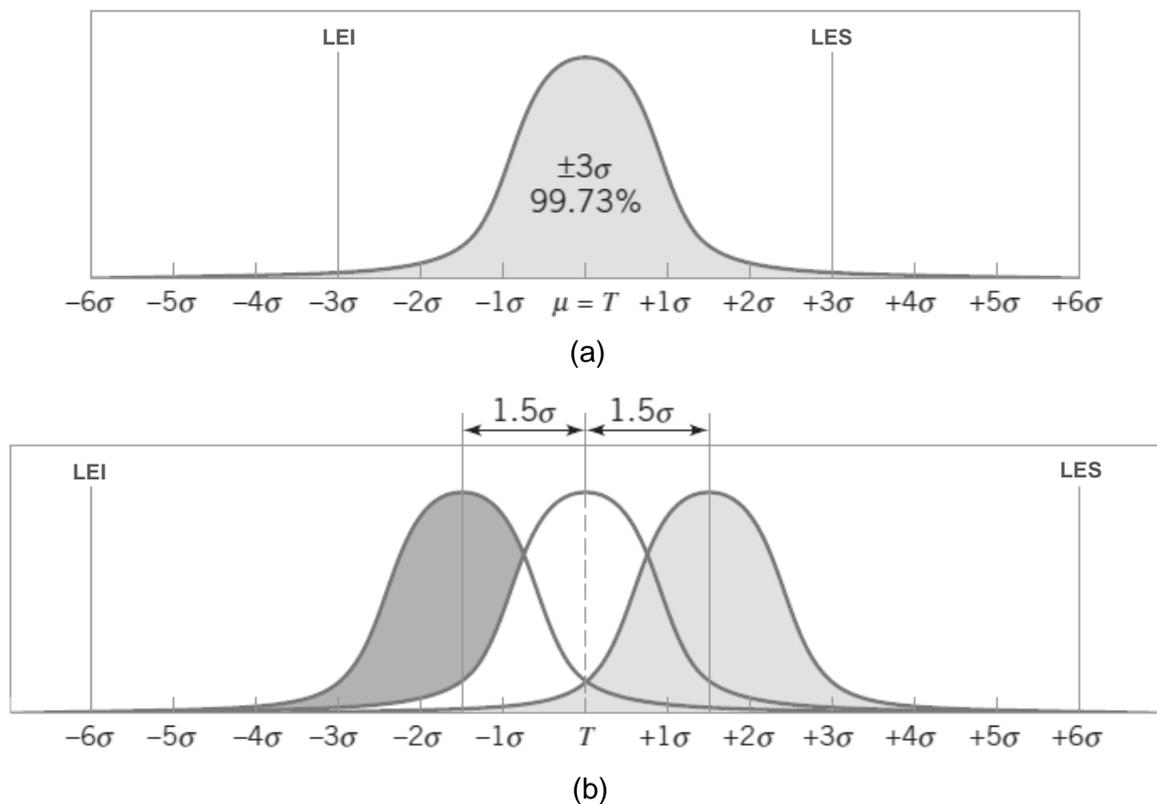


Figura 2.6. Concepto Seis Sigma de Motorola. (a) Distribución normal centrada en la meta  $T$ . (b) Distribución normal con la media desplazada  $\pm 1,5 \sigma$  de la meta  $T$ . Adaptado de "Quality Improvement in the Modern Business Environment" por D. Montgomery, 2013, *Introduction to Statistical Quality Control*, p. 28. Derechos Reservados 2013 por John Wile & Sons, Inc.

La figura 2.6 (a) muestra un proceso centrado con una distribución de probabilidad normal como modelo para una característica de calidad con los límites de especificación en tres desviaciones estándar a cada lado de la media. Como se

muestra en la tabla 2.4, la probabilidad de producir productos dentro de estas especificaciones es 0,9973, lo que equivale a 2700 partes por millón (ppm) defectuosas. Esto se conoce como Calidad Tres Sigma. Cuando la probabilidad de producir productos dentro de los niveles de especificación  $\pm 6\sigma$  es de 0,999999998, la cantidad de ppm defectuosas corresponde a 0,002 y a esto se le conoce como Calidad Seis Sigma.

Tabla 2.4

*Concepto de Seis Sigma de Motorola.*

Límites de especificaciones	Proceso centrado (corto plazo)		Proceso desplazado $\pm 1,5 \sigma$ (largo plazo)	
	% dentro de especificación	ppm defectuosos	% dentro de especificación	ppm defectuosos
$\pm 1$ Sigma	68,27	317300	30,23	697700
$\pm 2$ Sigma	95,45	45500	69,13	608700
$\pm 3$ Sigma	99,73	2700	93,32	66810
$\pm 4$ Sigma	99,9937	63	99,3790	6210
$\pm 5$ Sigma	99,999943	0,57	99,97670	233
$\pm 6$ Sigma	99,9999998	0,002	99,999660	3,4

*Nota:* Adaptado de "Quality Improvement in the Modern Business Environment" por D. Montgomery, 2013, *Introduction to Statistical Quality Control*, p. 28. Derechos Reservados 2013 por John Wile & Sons, Inc.

Cuando se desarrolló inicialmente el concepto Seis Sigma, se hizo una suposición de que cuando el proceso alcanzaba el nivel de Calidad Seis Sigma, la media del proceso seguía estando sujeta a perturbaciones que podrían causar cambios hasta 1,5 desviaciones estándar fuera de la meta. Esta situación se muestra en la figura 2.6 (b), bajo este escenario, un proceso Seis Sigma produciría unos 3.4 ppm defectuosas, tal como indica la tabla 2.4.

Gutiérrez et al. (2013) relacionan el centrado del proceso con la capacidad de corto y largo plazo, indicando que en la práctica un proceso centrado solo se puede tener en el corto plazo, mientras que en el largo plazo la media del proceso se puede desplazar hasta  $\pm 1,5$  desviaciones estándar.

## 2.5. Control automático de procesos (CAP)

Para Love (2007) la automatización de procesos constituye un amplio espectro de tecnologías que se pueden implementar para mejorar el rendimiento de una planta, incluyendo la medición, control, secuencias automatizadas, optimización y soporte para la toma de decisiones. Estas tecnologías se han desplegado cada vez más desde la década de 1970 y los beneficios están ampliamente documentados.

Ogata (2010) refiere que los sistemas de control automático de procesos se analizan y se diseñan en base a la teoría de control, que es una rama interdisciplinaria de la ingeniería y la matemática que se ocupa del comportamiento de los sistemas dinámicos con entradas y de cómo su comportamiento es modificado por la retroalimentación. Los sistemas de control de procesos han desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, y se ha convertido en una parte importante e integral en los procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, etc.

Para estudiar los sistemas de control automático, se debe ser capaz de modelar sistemas dinámicos y analizar las características dinámicas. Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos, bastante bien (Ogata, 2010). La dinámica de muchos sistemas, ya sean mecánicos, eléctricos, térmicos, económicos, biológicos, etc., se describe en términos de ecuaciones diferenciales obtenidas de las leyes físicas que gobiernan un determinado sistema.

En un sistema de control automático el controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina *acción de control*. (Ogata, 2010)

La figura 2.7 muestra mediante un diagrama de bloques los componentes de un sistema de control automático industrial, el cual consiste de un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor (medidor). El controlador detecta la señal de error. La salida del controlador alimenta al actuador (p.e. un motor, una válvula, etc.). El sensor o elemento de medición convierte la variable de salida del proceso en variable manejable (p.e. un desplazamiento, una presión, un voltaje, etc.) que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada de referencia, por lo que el sensor

está en la trayectoria de la realimentación del sistema en lazo cerrado. El punto de ajuste del controlador debe convertirse en una entrada de referencia con las mismas unidades que la señal de realimentación del sensor.

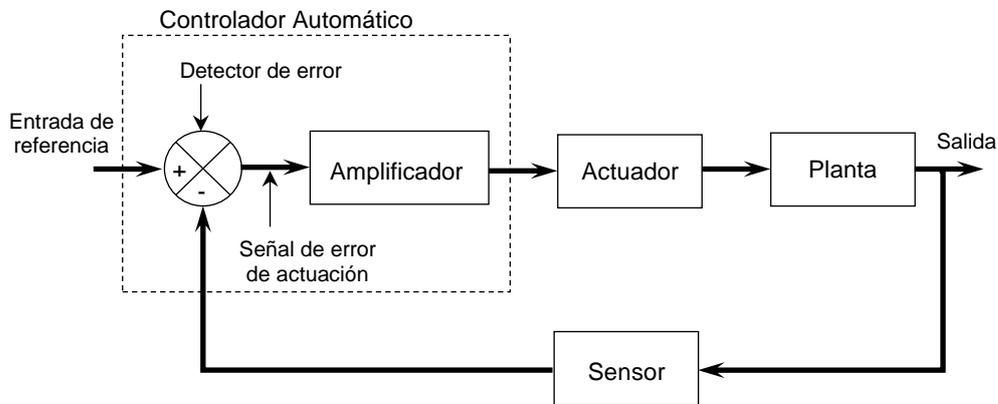


Figura 2.7. Diagrama de bloques de un sistema de control industrial, formado por un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor. Adaptado de “Diagrama de bloques de un sistema de control industrial, formado por un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor (elemento de medición).” por K. Oagata, 2010, *Ingeniería de control moderna*, p. 21. Derechos Reservados 2010 por Pearson Educación, S.A.

El controlador automático más utilizado en la industria es el controlador PID, cuyas siglas corresponden sus componentes proporcional (P), integral (I) y derivativo (D).

El controlador PID es con mucho el algoritmo de control más común. La mayoría de los lazos de realimentación se controlan mediante este algoritmo u otro con pequeñas variaciones (Astrom y Hagglund, 2009). La representación matemática del algoritmo de control PID se presenta en la ecuación 2.2.

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad 2.2$$

Donde  $u(t)$  es la señal de control y  $e(t)$  es el error de control. La señal de control es una suma de tres términos: el término P (que es proporcional al error), el término I (que es proporcional a la integral del error), y el término D (que es proporcional a la derivada del error). Los parámetros de configuración del controlador son la ganancia proporcional  $K$ , el tiempo integral  $T_i$  y el tiempo derivativo  $T_d$ .

En la investigación realizada por Andrade y Macas (2010) se demuestra la forma en la que trabaja el control PID. Se diseñó y construyó un módulo didáctico para controlar nivel y caudal de agua usando un reservorio, una bomba de ½ HP, una servoválvula de control y un sensor de caudal. La figura 2.8 muestra como el controlador PID regula

automáticamente el caudal de agua ante los cambios del punto de consigna (set-point) provocados por el operador del módulo. En un sistema real, los cambios de set-point se realizan en función de la demanda de agua requerida.

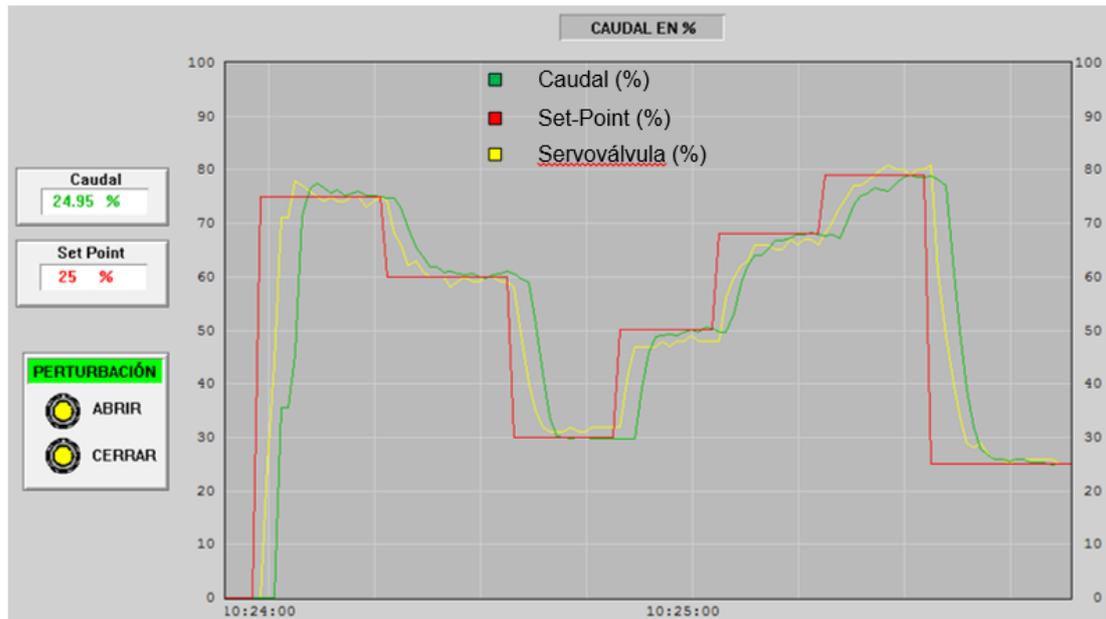


Figura 2.8. Control PID de caudal de agua y cambios de consigna (set point). Tomado de "Respuesta del sistema aplicando el control PID óptimo con variación del punto de consigna (set-point) en el tiempo ( $K_c=0.2$ ,  $T_i=0.08$ ,  $T_d=0.01$ )." por R. Andrade y W. Macas, 2010, *Diseño y construcción de un módulo didáctico para medir y controlar caudal y nivel*, p. 220. Derechos Reservados 2010 por Escuela Politécnica Nacional.

En la figura 2.9 se observa la respuesta del sistema frente a cuatro perturbaciones provocadas voluntariamente. Una perturbación es una señal no deseada que puede ocurrir esporádicamente, por ejemplo puede ser una fuga de agua en la tubería o variaciones indeseadas de presión. Se observa como el controlador PID compensa automáticamente para siempre mantener el caudal de agua deseado.

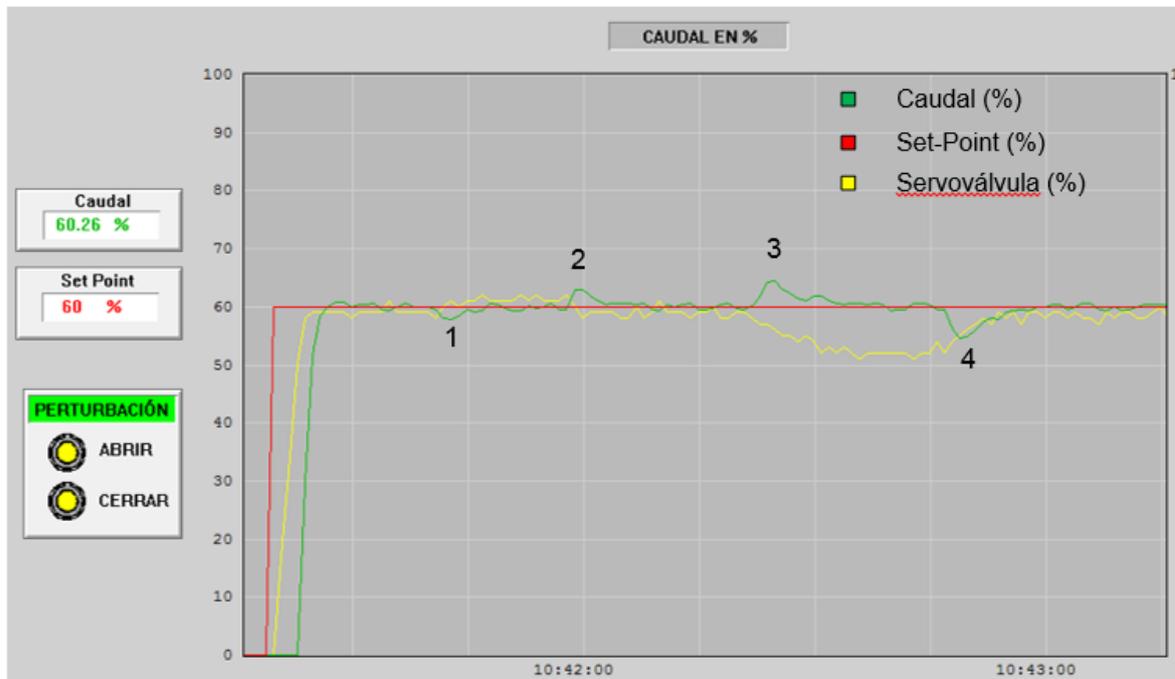


Figura 2.9. Control PID de caudal de agua y generación de perturbaciones 1, 2 3 y 4. Tomado de “Respuesta del sistema aplicando el control PID óptimo manipulando las válvulas de perturbación y bypass.” por R. Andrade y W. Macas, 2010, *Diseño y construcción de un módulo didáctico para medir y controlar caudal y nivel*, p. 221. Derechos Reservados 2010 por Escuela Politécnica Nacional.

## 2.6. Integración entre el CEP y el CAP

En el mundo de la ingeniería, cuando los productos son diseñados las dimensiones son exactas, los cálculos son precisos y las características resultantes son conocidas. Mientras tanto, la manufactura no es tan precisa. Las variaciones pueden ocurrir en cualquier momento en el proceso y a menudo son difíciles de predecir con precisión.

Para Montgomery (2013) existen dos formas de controlar los procesos y reducir la variabilidad de los mismos. La primera es mediante el uso del Control Estadístico de Procesos (CEP), cuyo enfoque es identificar la causa de la variación para que pueda ser removida, conduciendo así a la reducción de la variabilidad y la mejora continua del proceso. Y la segunda es utilizando el Control Automático de Procesos (CAP), que se basa en ajustar el proceso utilizando información sobre su estado actual o desviación de un objetivo deseado (a este concepto se lo conoce como realimentación y es tomado de la teoría de control). Menciona además que ambas técnicas son realmente dos estrategias complementarias para la mejora de la calidad, ya que tienen el objetivo común de reducir la variabilidad del proceso.

Montgomery (2013) también agrega que ambas técnicas han sido desarrolladas históricamente desde ambientes algo diferentes. El CEP a menudo forma parte de la corriente estratégica de la organización destinada a mejorar la calidad, y suele ser una actividad dirigida por la gerencia, es de carácter vertical, brinda una mirada global y tiene énfasis en las personas, métodos y procedimientos; mientras que el CAP es de naturaleza más táctica debido a sus orígenes en organizaciones que aplican la ingeniería de procesos, y su enfoque principal está en el proceso.

En los recientes años muchos investigadores han mostrado su interés en la integración de las técnicas del CEP y el CAP para reducir la variabilidad, mejorar la calidad y la productividad en los procesos. La figura 2.10 muestra la propuesta de Montgomery (2013) para combinar el control estadístico de procesos y el control automático de procesos.

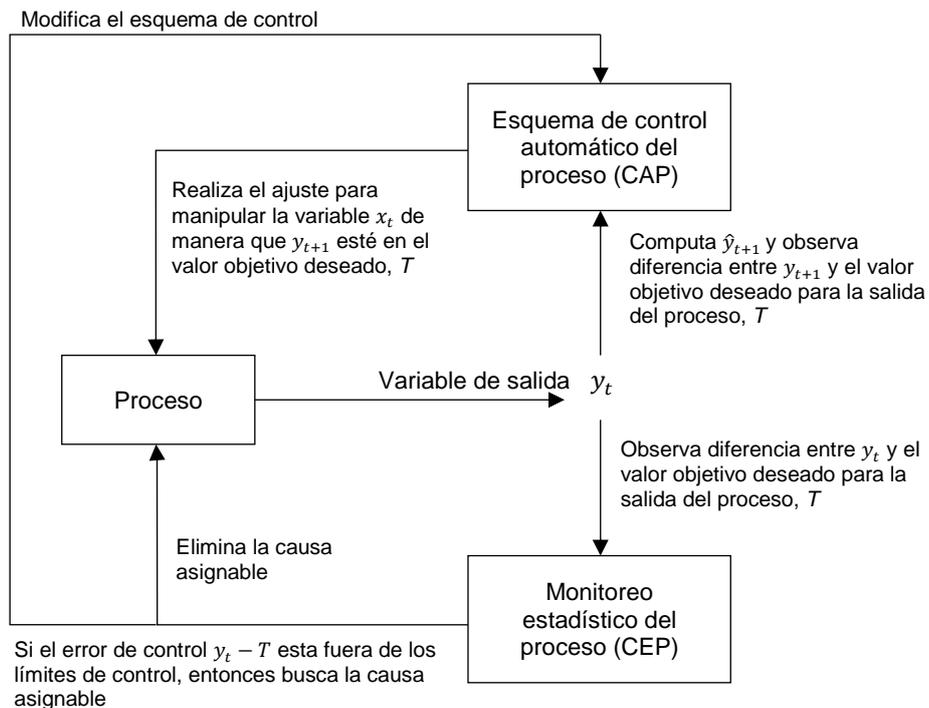


Figura 2.10. Integración entre el control estadístico de procesos y el control automático de procesos. Adaptado de "Engineering process control and statistical process monitoring." por D. Montgomery, 2013, *Introduction to Statistical Quality Control*, p. 556. Derechos Reservados 2013 por John Wiley & Sons, Inc.

Otros investigadores como Rahim, Siddiqui y Elshafei (2014) recomiendan utilizar el CEP tanto a la entrada como a la salida del proceso y proponen el esquema de integración mostrado en la figura 2.11.

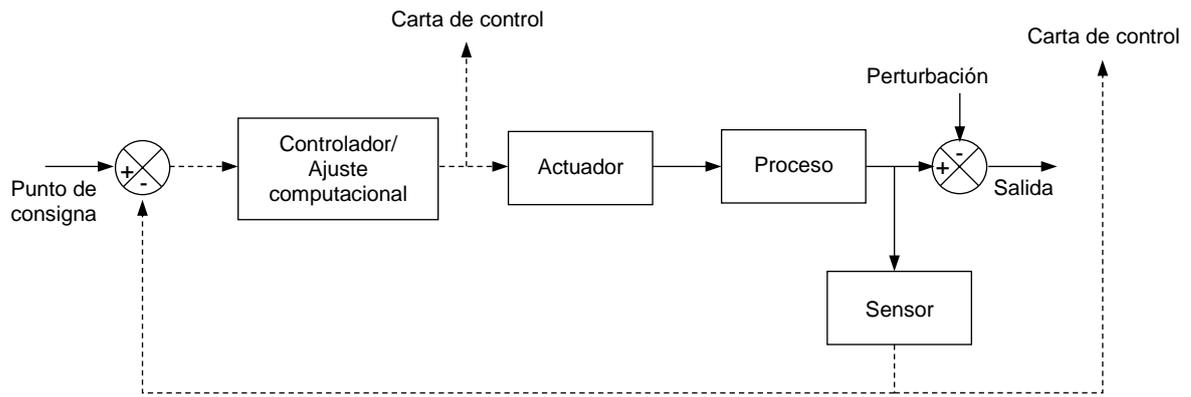


Figura 2.11. Integración entre el CEP y el CAP. Adaptado de "Integration of Multivariable Statistical Process Control and Engineering Process Control." por A. Rahim, Y. Siddiqui y M. Elshafei, 2014, *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, p. 474. Recuperado de <http://ieom.org/ieom2014/pdfs/104.pdf>

En la figura 2.11, el proceso se alimenta a través de un actuador. El flujo de datos y el flujo de material se representan respectivamente por líneas entrecortadas y continuas. La salida se mide por el sensor y el valor medido es sustraído del punto de consigna (valor objetivo) para generar el error. Este error se utiliza en el bloque del controlador que realiza cálculos matemáticos basados en la cantidad de error y el modelo matemático de la planta para ajustar o manipular la entrada del proceso a través del actuador. En el esquema propuesto, los gráficos de control del CEP se emplean tanto en las entradas como en las salidas del proceso para detectar causas asignables de variación.

## 2.7. Sistemas de bombeo

### 2.7.1. Generalidades

Un sistema de bombeo típico se conforma por bombas, motores, controladores de moto-bombas, reservorio, válvulas, tuberías, filtros e instrumentos de medición. En los sistemas modernos también se cuenta con instrumentación electrónica y con un sistema de control automático de procesos que permite automatizar y controlar el proceso de bombeo; aunque en algunos casos también permite realizar optimizaciones. En la figura 2.12 se muestra un esquema de los componentes de un sistema de bombeo.

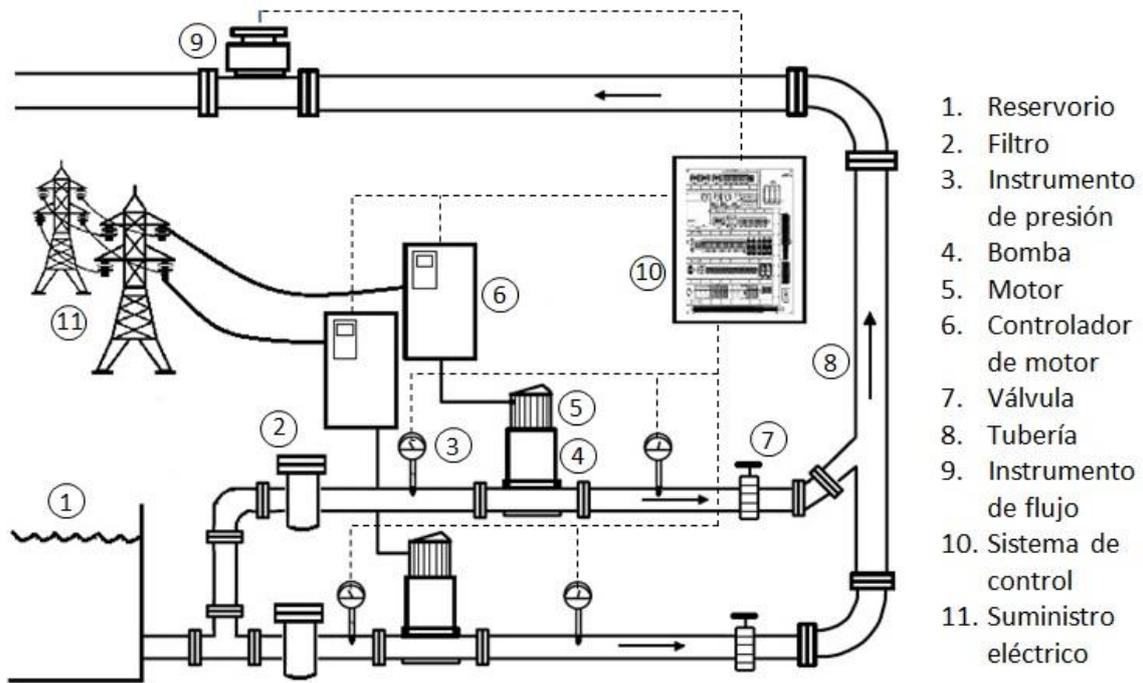


Figura 2.12. Esquema típico de los componentes de un sistema de bombeo. Adaptación propia.

El sistema tiene dos entradas y una salida. La primera entrada es la fuente de agua, que puede ser, por ejemplo, un reservorio, un tanque, un río, una represa, etc. La segunda entrada es la fuente de energía eléctrica con sus equipos asociados, como subestación eléctrica, transformadores, celdas eléctricas, cables, etc. La salida es el flujo o caudal de agua bajo condiciones hidráulicas previamente establecidas durante la fase de diseño.

El propósito de la bomba es convertir la energía mecánica (rotación) en energía hidráulica (caudal, velocidad y presión). El motor convierte la energía eléctrica en energía mecánica necesaria para mover a la bomba. Los sensores de presión colocados en la succión y descarga de la bomba permiten monitorear su desempeño. El sensor de flujo, además de permitir monitorear el desempeño hidráulico del sistema, también provee una medida de la cantidad de fluido consumido. (Karassik, Messina y Cooper, 2008).

Dependiendo de las características de la demanda de agua y las necesidades del proceso, el controlador de la moto-bomba puede ser: arrancador directo, arrancador estrella-triángulo, arrancador suave y variador de velocidad. Las tres primeras tecnologías no controlan la velocidad de la moto-bomba, únicamente logran arrancar la moto-bomba hasta alcanzar su velocidad nominal, lo cual puede ser factible cuando no

se requiere regular el flujo de agua. El variador de velocidad si controla la velocidad y capacidad de la moto-bomba, lo que permite a su vez regular el flujo en función de la demanda. (Schneider Electric, 2015).

Otro aspecto importante que se debe conocer en sistemas de bombeo son las curvas características del desempeño del sistema. Las curvas características de una bomba son una representación gráfica de cómo sus parámetros operacionales como altura dinámica, potencia y eficiencia varían con el caudal, lo que permite dar una buena indicación del desempeño de la bomba. Normalmente estas curvas son suministradas por el fabricante del equipo. En la figura 2.13 se muestra, de manera simplificada, las curvas características de una bomba centrífuga.

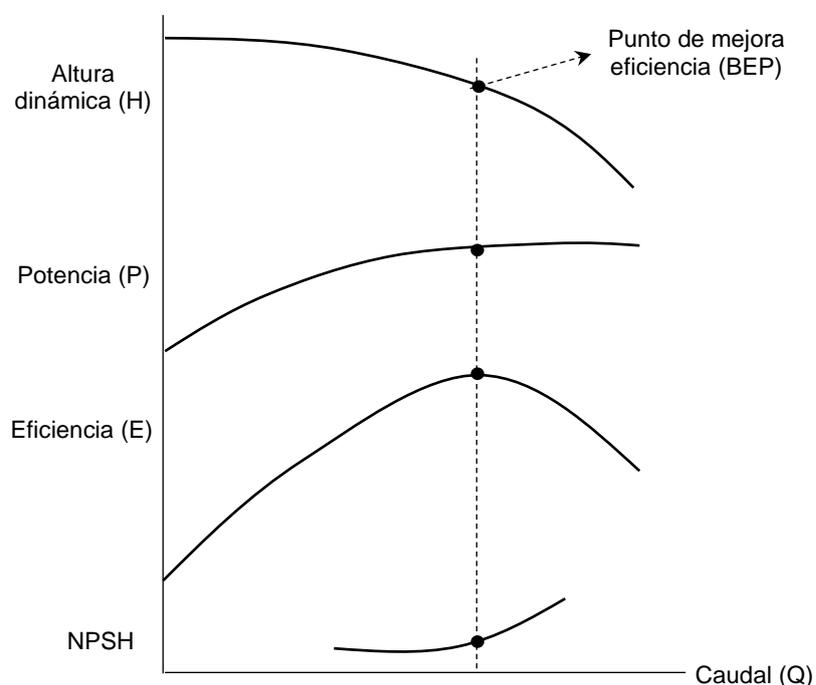


Figura 2.13. Curvas características del desempeño de una bomba centrífuga. Adaptado de “Performance Characteristics Curves” por I. Karassik, J. Messina, P. Cooper y C. Heald, 2008, *Pump Handbook*, p. 2.18-2.21, Derechos Reservados 2008 por Mc Graw Hill.

De la figura 2.13 se describen las siguientes variables: la Altura Dinámica (H), es el equivalente al diferencial de presión generado por la bomba entre la descarga (salida) y la succión (entrada), normalmente expresado en metros (m) o en pies (ft). La Potencia (P), es la potencia absorbida por la bomba para generar caudal y presión, normalmente expresado en kilovatios (kW) o caballos de potencia al freno (bhp). La eficiencia (E) es la eficiencia con la cual la potencia en el eje del motor es convertida en caudal y presión, normalmente se expresa como porcentaje (%). El caudal (Q) es la tasa de flujo entregado por la bomba a través de su descarga, normalmente expresado

en litros por segundo (L/s). La Altura Neta Positiva de Succión (NPSH) es la altura total en la entrada de la bomba por encima de la presión de vapor, expresado en metros (m) o pies (ft). El NPSHR es el NPSH requerido por una bomba en su entrada y el NPSHA es el NPSH disponible en el sistema en uso. Para prevenir la cavitación, el NPSHA debe ser mayor que el NPSHR. (Karassik, Messina y Cooper, 2008).

### **2.7.2. Gestión energética en sistemas de bombeo**

Capehart, Turner y Kennedy (2012) definen a la gestión energética como “el uso eficiente y efectivo de la energía para maximizar los beneficios (minimizar costos) y mejorar la ventaja competitiva”.

Para Rossiter y Jones (2015) los estudios de eficiencia energética en sistemas de bombeo a menudo se concentran en el tipo de esquema empleado para la modulación de la capacidad del sistema. Consideran que las evaluaciones energéticas de bombeo usualmente se centran en identificar esquemas de control ineficientes que se diseñan para alinear el flujo entregado por el sistema con los requerimientos del proceso, pero desperdiciando una cantidad considerable de energía.

Los enfoques tradicionales para variar la capacidad de un sistema de bombeo que Rossier et al. (2015) han identificado son (a) la recirculación, (b) el uso de válvulas de control a la descarga de la bomba, y (c) el bombeo en paralelo con el uso de válvulas de control a la descarga de cada bomba. Todos estos esquemas de control pueden producir significativos desperdicios de energía cuando se usan en sistemas en donde los requerimientos de flujo varían frecuentemente o donde las bombas están sobredimensionadas.

Investigadores como Karassik et al. (2008), Capehart et al. (2011) y Rossier et al. (2015), coinciden en que cuando se requiere controlar la capacidad del sistema de bombeo para suplir la demanda variable de flujo, la solución más recomendada es usar variadores de velocidad, sumado a que estos equipos permiten logra una mejor eficiencia energética en el sistema.

Complementariamente, Chapman (2012) indica que el variador de velocidad se ha convertido en el método favorito para controlar la velocidad de motores. Además, Capehart et al. (2011) consideran que los variadores de velocidad son sistemas de control de motores que reducen la energía de entrada al motor cuando éste no opera a plena carga, por lo que estos equipos pueden producir ahorros sustanciales en los

costos operacionales de los motores, y pueden mejorar las operaciones en sistemas que previamente usaban motores sin ningún tipo de control de velocidad.

Pero en aplicaciones de mayor tamaño e importancia, sobre el variador de velocidad existe un sistema automático de control de procesos, tal como se mostró en la figura 2.12. Anteriormente se mencionó que el controlador automático más utilizado en la industria es el controlador PID, y es en este sistema donde se pueden realizar tareas adicionales para mejorar aún más la eficiencia energética. La investigación realizada por Gomes, Queiroz y Coelho (2012) sobre eficiencia energética en procesos industriales y controladores PID, demuestra como una adecuada estrategia de control junto con un procedimiento correcto de ajuste del controlador pueden contribuir con el ahorro de consumo de energía.

La automatización de procesos puede contribuir a mejorar la eficiencia energética de las plantas de producción industrial de muchas maneras. La implementación de mejores estrategias de monitoreo, control y optimización mejora el desempeño energético directamente, a través de la reducción de residuos (muy frecuentemente asociada con oscilaciones indebidas en los parámetros principales del proceso), e indirectamente, a través de mejores prácticas de mantenimiento. (Nonavita y ABB, 2013).

### **2.7.3. Mediciones de eficiencia en sistemas de bombeo**

En general, la eficiencia de una máquina o equipo se refiere a como ésta puede convertir una forma de energía en otra. Si una unidad de energía es provista a una máquina, y su salida es la mitad de la unidad, su eficiencia es del 50%.

La eficiencia total de un sistema de bombeo como el indicado en la figura 2.12 se calcula como la relación entre la potencia del agua entregada por el sistema de bombeo y la potencia eléctrica suministrada a la entrada del sistema. (Karassik et al. 2008). Matemáticamente se expresa así:

$$E_{f_{\text{Total}}}(\%) = \frac{\text{Potencia del agua entregada por el sistema de bombeo}}{\text{Potencia eléctrica suministrada al sistema}} \cdot 100 \quad 2.3$$

Otra forma de calcular la eficiencia total es mediante el producto entre la eficiencia de cada equipo, es decir la eficiencia de la bomba, la eficiencia del motor y la eficiencia del controlador de la moto-bomba (Karassik et al. (2008). Matemáticamente se expresa así:

$$E_{f_{Total}}(\%) = E_{f_{Bomba}}(\%) * E_{f_{Motor}}(\%) * E_{f_{Variador}}(\%)$$

2.4

### Eficiencia en una sola bomba.

La eficiencia de una bomba hidráulica es la relación entre la potencia del fluido (salida) y la potencia del eje (entrada) (Karassik et al. (2008). Matemáticamente se calcula así:

$$E_{f_{Bomba}}(\%) = \frac{P_{Fluido}}{P_{Eje}} * 100 \quad 2.5$$

$$P_{Fluido} = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad 2.6$$

Donde Q es el caudal suministrado por la bomba,  $\rho$  es la densidad del fluido, g es la aceleración de la gravedad y H es la altura dinámica de la bomba. La eficiencia total de una bomba centrífuga también puede ser definida como el producto de tres eficiencias individuales: mecánica, volumétrica e hidráulica. La eficiencia mecánica incluye las pérdidas en los cojinetes, la caja de empaquetadura y los sellos mecánicos. La eficiencia volumétrica incluye las pérdidas debido a fugas a través de los anillos de desgaste, los orificios de balance y las holguras de los álabes en el caso de los propulsores semiabiertos. La eficiencia hidráulica representa pérdidas por fricción de líquido y otras pérdidas en la voluta y el impulsor (Karassik et al., 2008).

Aunque las pérdidas mecánicas y volumétricas son componentes importantes, la eficiencia hidráulica es el factor más importante. La mayoría de bombas centrífugas de mediano y gran tamaño ofrecen eficiencias entre el 75 y 93%, y las de pequeño tamaño entre el 50 y 70%.

### Eficiencia en un solo motor.

Los motores toman potencia eléctrica y producen potencia mecánica, pero no toda la potencia que toma la máquina aparece en forma útil a la salida debido a que siempre existen pérdidas (Chapman 2012). La eficiencia de un motor de inducción se define como la relación entre la potencia mecánica de salida (en el eje) y la potencia de eléctrica de entrada. La diferencia entre la potencia de salida y la potencia de entrada del motor de inducción corresponde a las pérdidas que ocurren en el interior del mismo. Matemáticamente se calcula así:

$$E_{f_{Motor}}(\%) = \frac{P_{Eje}}{P_{Eléctrica}} * 100 \quad 2.7$$

Para el caso de los motores de inducción trifásicos, que son lo que se utilizan en grandes aplicaciones de bombeo, la potencia eléctrica de entrada se calcula así:

$$P_{\text{Eléctrica}} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot fp \quad 2.8$$

Donde  $V_L$  es el voltaje de línea,  $I_L$  es la corriente de línea y  $fp$  es el factor de potencia.

Para Chapman (2012), las pérdidas que ocurren en un motor de inducción son cuatro:

- ✓ Pérdidas eléctricas o pérdidas en el cobre, que se producen por el calentamiento resistivo en los devanados del estator (armadura) y del rotor (campo) del motor.
- ✓ Pérdidas en el núcleo, producidas por histéresis y por corrientes parásitas.
- ✓ Pérdidas mecánicas, asociadas a la fricción en los cojinetes del motor y al rozamiento entre las partes móviles con el aire encerrado en la carcasa del motor.
- ✓ Pérdidas dispersas o misceláneas, que son aquellas que no pueden situarse dentro de las categorías anteriores y que convencionalmente representan el 1% de la plena carga.

En general la eficiencia de un motor eléctrico está entre 82 y 97% dependiendo del tamaño del motor y de su velocidad nominal. Los motores de inducción de gran tamaño llegan a eficiencias del 97%, y casi con seguridad cualquier motor de inducción sobre los 10 hp (7,457 kW) logra una eficiencia sobre el 90%.

#### Eficiencia en un solo variador de velocidad.

Los variadores de velocidad usan la tecnología de la electrónica de potencia y los dispositivos de estado sólido, y su funcionamiento se basa en la conmutación eléctrica de transistores de potencia para transformar y controlar voltajes y corrientes en aplicaciones de alta potencia.

La eficiencia de un variador de velocidad depende de las pérdidas térmicas que ocurren en sus dispositivos internos, sin embargo una de las grandes ventajas de esta tecnología es que las pérdidas internas en sus dispositivos electrónicos es relativamente baja. Según la Guía Técnica para Variadores de Velocidad de ABB (2011), estos equipos logran eficiencias entre el 97 y 99%.

### **3. DESCRIPCIÓN**

### **3.1. La organización**

La futura Refinería del Pacífico (RDP) es el principal proyecto estratégico de la historia del Ecuador que se ejecuta en la provincia de Manabí, y sus principales objetivos son: contribuir con la transformación de la matriz productiva del país, cubrir con la demanda creciente de derivados del petróleo, ahorrar costos al país por importación de combustibles y exportar los excedentes a mercados estratégicos. Para desarrollar este proyecto se creó la empresa Refinería del Pacífico Eloy Alfaro Compañía de Economía Mixta (RDP – CEM).

Uno de los servicios críticos que requiere la RDP es el abastecimiento de agua dulce cruda, para lo cual se ha construido un acueducto llamado Acueducto La Esperanza – RDP. Este sistema hidráulico tiene como principal objetivo suministrar agua dulce cruda de forma ininterrumpida, fiable y segura a la RDP; y además, como parte de una estrategia de responsabilidad social empresarial, el acueducto también dota de agua a los municipios de los cantones de Manta, Montecristi y Jaramijó, de la provincia de Manabí, considerados como zonas de influencia del proyecto RDP.

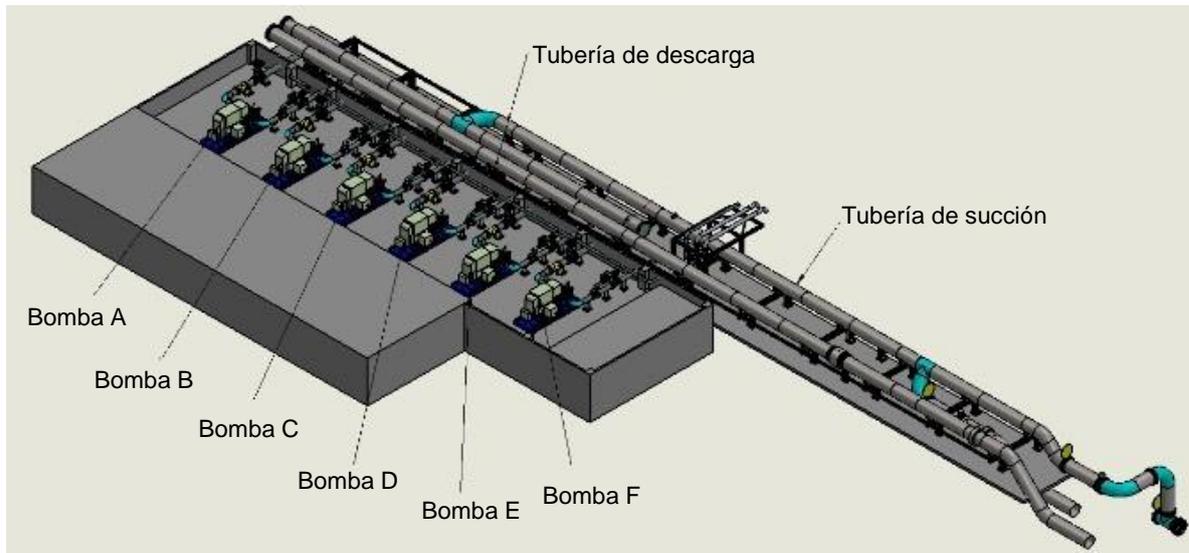
El agua es primordial para los procesos principales y auxiliares de una refinería, se utiliza por ejemplo en el proceso de desalación del crudo de petróleo, generación de vapor de agua necesario para los procesos de refinación, sistemas de enfriamiento, sistemas de intercambio de calor, entre otros. Es tan importante el agua para una refinería, que su ausencia conllevaría a tener que parar la planta, lo cual significaría grandes pérdidas económicas. Los habitantes de Manta, Montecristi y Jaramijó también se verían afectados por cortes prolongados del suministro de agua, impactando directamente en su calidad de vida, lo que a su vez provocaría una percepción negativa sobre el proyecto.

### **3.2. Estación de bombeo**

#### **3.2.1. Descripción del sistema**

El Acueducto La Esperanza – RDP consta de una estación de bombeo conformado por seis (6) bombas centrifugas horizontales principales, que tienen una capacidad de diseño de 1100 m<sup>3</sup>/h cada una, las cuales operan con disposición en paralelo permitiendo en su conjunto lograr una capacidad de diseño total de 6600 m<sup>3</sup>/h. Este sistema de bombeo capta el agua cruda desde la presa La Esperanza ubicada en el cantón Bolívar de la provincia de Manabí, y la envía a la RDP y a los cantones de Manta, Montecristi y Jaramijó a través de un acueducto de 48 pulgadas de diámetro y

93 kilómetros de longitud. La figura 3.1 muestra el esquema del sistema de bombeo principal.



*Figura 3.1.* Esquema del sistema de bombeo principal. Adaptado de “Estación de bombeo principal” por Refinería del Pacífico, 2016, *Manual de Operación del Acueducto La Esperanza – RDP*, p. 35. Derechos Reservados 2016 por Refinería del Pacífico.

Bajo condiciones normales de operación, las bombas principales succionan el agua por medio de una tubería que se conecta al desagüe de fondo de la presa La Esperanza, aprovechando así la presión hidrostática de la misma; sin embargo, cuando el desagüe de fondo se encuentre en mantenimiento o fuera de servicio por otras razones, la operación se la realiza a través de un sistema de bombeo emergente que capta el agua desde el tope de la presa y la envía hacia la succión de las bombas principales. Este esquema se muestra en la figura 3.2.

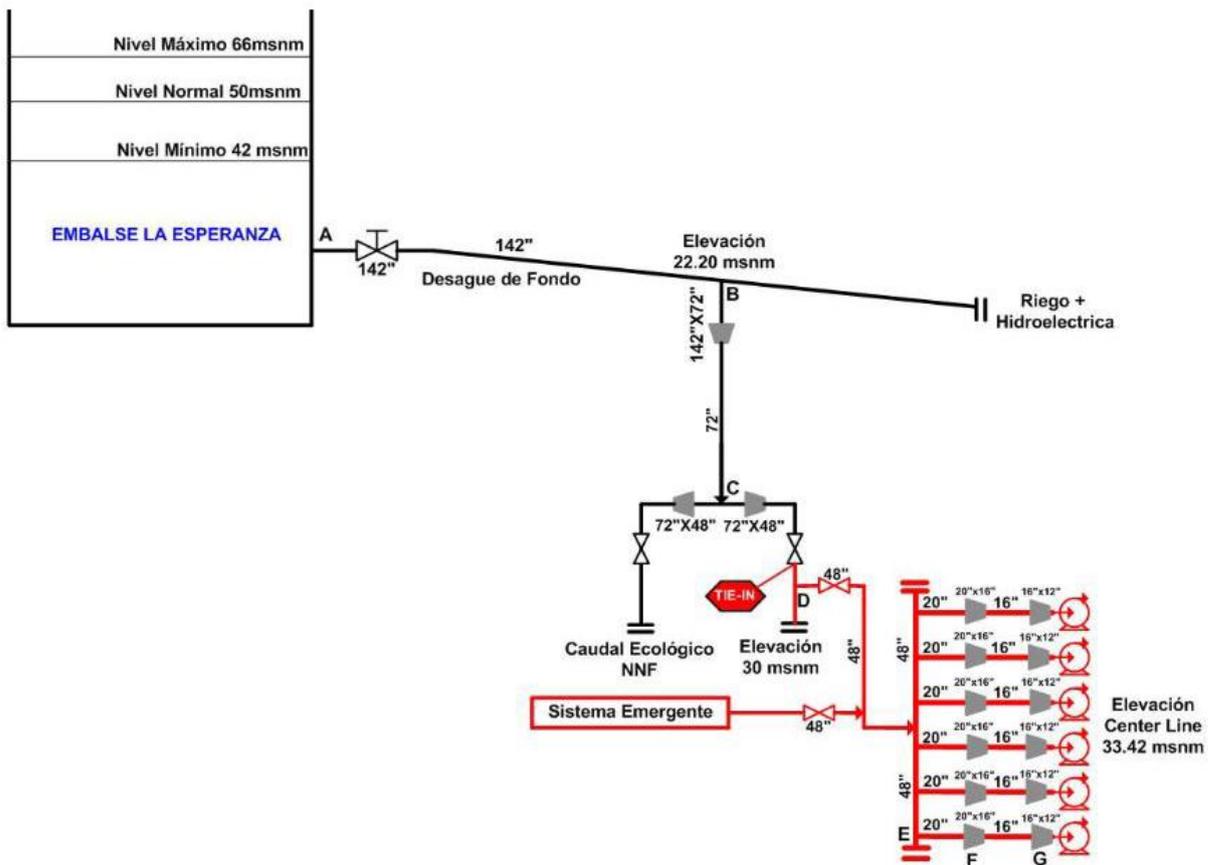


Figura 3.2. Diagrama de flujo del sistema de bombeo. Adaptado del “Esquema general del acueducto Represa La Esperanza - RDP” por Refinería del Pacífico, 2016, *Manual de Operación del Acueducto La Esperanza – RDP*, p. 12. Derechos Reservados 2016 por Refinería del Pacífico.

Las bombas principales son alimentadas a través de un cabezal de 48 pulgadas que recibe agua desde:

- ✓ Tubería de 48 pulgadas conectada a tubería existente proveniente del desagüe de fondo de la presa “La Esperanza”.
- ✓ Tubería de 48 pulgadas proveniente desde el sistema de bombeo emergente que capta el agua desde el tope de la presa. Dicho sistema sólo está en operación cuando el desagüe de fondo de la presa “La Esperanza” se encuentre fuera de servicio.

Las líneas de succión de 20 pulgadas de cada una de las bombas principales están conectadas al cabezal de succión de 48 pulgadas. Cada una de las líneas de succión cuenta con una válvula de bloqueo asociada al permisivo de arranque de la bomba correspondiente. Adicionalmente cada línea de succión dispone de un filtro tipo “T” para la remoción de sedimentos o partículas que puedan ingresar en el impulsor de la bomba.

En la línea de descarga de cada bomba, se tiene una válvula de bloqueo de tipo compuerta y motorizada, asociada al permiso de arranque de la bomba correspondiente. Lo antes descrito se muestra en la figura 3.3.

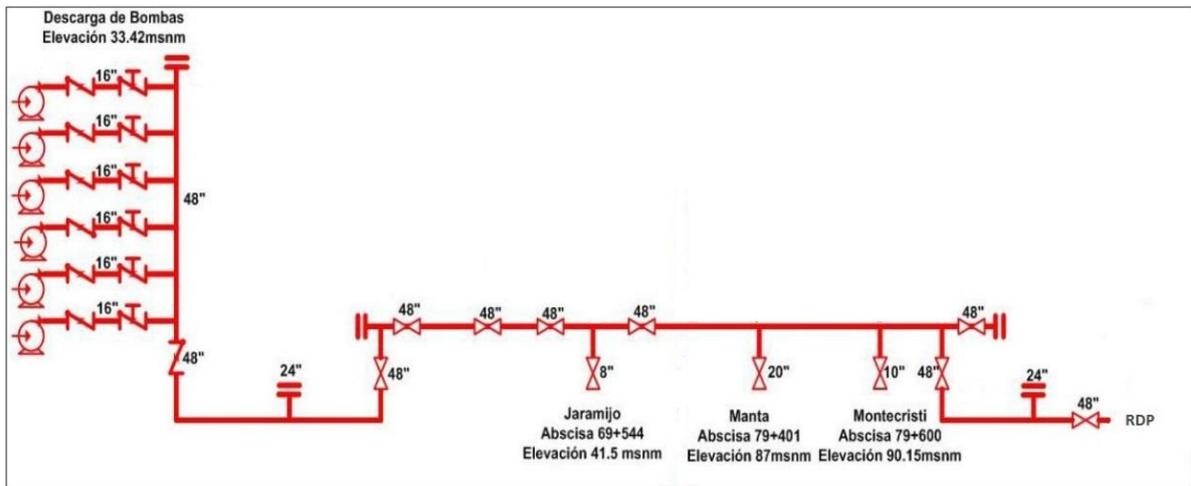


Figura 3.3. Diagrama de flujo del sistema de bombeo – Descarga de agua y acueducto. Adaptado de “Esquema general del acueducto Represa La Esperanza - RDP” por Refinería del Pacífico, 2016, *Manual de Operación del Acueducto La Esperanza – RDP*, p. 12. Derechos Reservados 2016 por Refinería del Pacífico.

Cada bomba es accionada por un motor eléctrico de inducción. El arranque y regulación de las revoluciones de cada bomba-motor es realizado por un variador de velocidad cuyo propósito es que el sistema logre bombear el caudal de agua requerido a la mejor eficiencia posible.

### 3.2.2. Requerimientos de agua

Como ya se mencionó anteriormente, el objetivo de este acueducto es suministrar agua a la futura Refinería del Pacífico y los cantones considerados parte de la zona de influencia del proyecto. La tabla 3.1 contiene los requerimientos de agua para cada cliente.

Tabla 3.1

*Requerimientos de agua por cliente*

<b>Clientes</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>
Refinería del Pacífico	4000
Manta	1250
Montecristi	450
Jaramijó	300

### 3.2.3. Datos técnicos de los equipos

Los datos y parámetros técnicos de las bombas, motores y demás equipos se registran en un documento llamado Hoja de Datos. De la hoja de datos de las bombas principales se tiene la siguiente información técnica mostrada en las tablas 3.2 y 3.3.

Tabla 3.2

*Condiciones de diseño de cada bomba centrífuga principal*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Cabezal requerido	384	m
Presión de descarga	38,46	Kgf/cm <sup>2</sup>
Capacidad de diseño	1100	m <sup>3</sup> /h

Tabla 3.3

*Rendimiento de cada bomba centrífuga principal.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Potencia nominal (BHP)	1454,7	kW
Eficiencia nominal	79	%
Región preferida de operación	889 - 1484,1	m <sup>3</sup> /h

*Nota:* Datos proporcionados por el fabricante de las bombas.

De los datos de placa del motor de inducción registrados en la hoja de datos del mismo se tienen los datos técnicos mostrados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4

*Datos técnicos de cada motor de inducción.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Potencia	2250	HP
Corriente	267	A
Voltaje	4160	V
Velocidad en R.P.M.	3600	R.P.M.
Número de fases	3	-
Frecuencia	60	Hz
Eficiencia	96	%
Factor de potencia	0,91	-

*Nota:* Datos proporcionados por el fabricante de los motores.

El variador de velocidad presenta los parámetros técnicos mostrados en la tabla 3.5.

Tabla 3.5

*Datos técnicos de cada variador de velocidad.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Potencia	2250 / 1678	hp / kW
Corriente	267	A
Voltaje	4160	V
Fases	3	-
Frecuencia	60	Hz
Rango de regulación	0 - 100	%
Eficiencia	mayor a 96	%

*Nota:* Datos proporcionados por el fabricante de los variadores de velocidad.

### 3.2.4. Rangos de operación

Los rangos de caudal de acuerdo al número de bombas en servicio se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6

*Rangos de operación.*

# de bombas	Caudal mínimo (m <sup>3</sup> /h)	RPM mínimos permanentes	Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	RPM máximas permanentes
1	1000	2900	1200	3010
2	2000	2900	2400	3114
3	3179	3010	3600	3210
4	4000	3090	5480	3550
5	5000	3330	6000	3545
6	6000	3400	6000	3520

*Nota:* Tomado de "Rangos de operación del sistema de bombeo principal" por Refinería del Pacífico, 2015, *Filosofía de Operación y Control de Acueducto La Esperanza - RDP*, p. 19 - 20. Derechos Reservados 2015 por Refinería del Pacífico.

### 3.2.5. Suministro eléctrico

El suministro eléctrico a la estación de bombeo se lo realiza mediante la red eléctrica pública a un nivel de voltaje de 69 kV. Para esto se construyó una subestación eléctrica que forma parte de la infraestructura de la planta en la cual existen dos bahías que alimentan energía a dos transformadores de potencia de 15 MVA cada uno, y que reducen el voltaje de 69 kV a 4,16 kV necesarios para alimentar a los variadores de velocidad. En operaciones normales cada transformador de potencia toma el 50% de la carga, sin embargo, si uno de los transformadores tiene que ser deshabilitado por temas de mantenimiento, el otro transformador puede cubrir la totalidad de la carga.

La salida de cada transformador llega a cada una de las dos barras del switchgear. El switchgear es un equipo eléctrico conformado por celdas que permite realizar maniobras y protecciones hacia los equipos alimentados, como los variadores de velocidad y otros equipos de servicios auxiliares. Cada celda del switchgear alimenta eléctricamente a un variador de velocidad, y para cada celda existe un relé de protección que comandan la apertura del circuito cuando ocurren fallas eléctricas.

Tanto en la subestación eléctrica como en el switchgear existen instrumentos para mediciones eléctricas llamados transformadores de corriente y transformadores de potencial, que permite medir la corriente y el voltaje respectivamente. Estos instrumentos se comunican con los relés de protección, los que a su vez se comunican con el sistema de control de la estación para poder monitorear variables eléctricas como voltaje, corriente, frecuencia, factor de potencia, potencia activa y potencia reactiva.

### 3.2.6. Sistema de control e instrumentación

La estación de bombeo es supervisada, monitoreada y controlada mediante un sistema de supervisión, control y adquisición de datos, que es más conocido en la industria como SCADA por sus siglas en inglés (Supervisory Control And Data Acquisition). El SCADA es un tipo de sistema de control industrial que utiliza computadores, equipos de red, interfaces hombre-máquina, controladores lógicos programables y otros dispositivos electrónicos para controlar procesos industriales. Los sistemas SCADA pueden realizar también Control Automático de Procesos (CAP) o también llamado Control Ingenieril de Procesos (CIP). La figura 3.4 muestra la pantalla principal del SCADA, donde se observan todos los subsistemas.

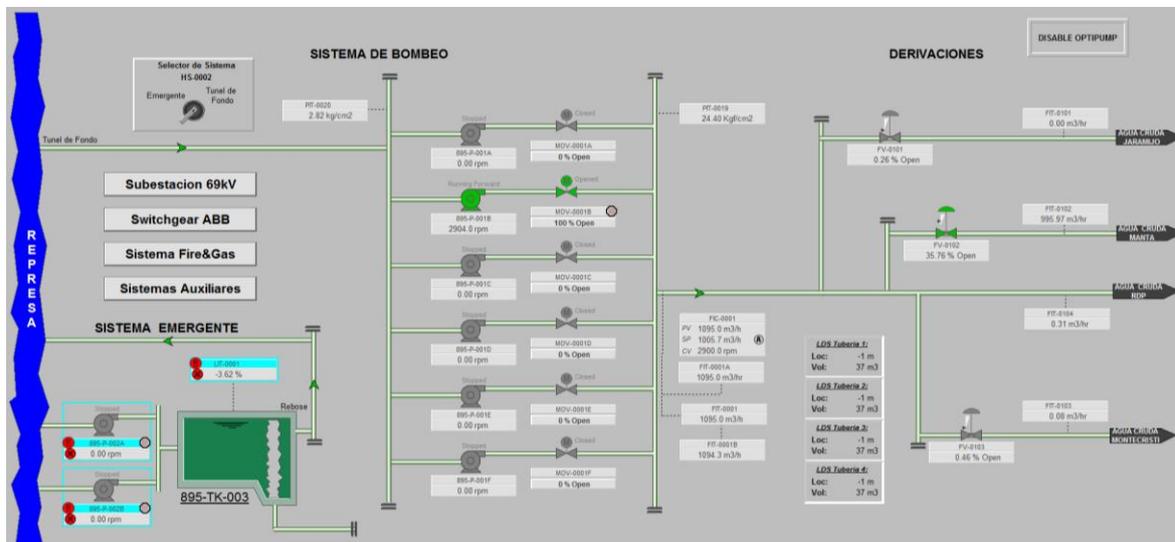


Figura 3.4. Pantalla principal de operación en el SCADA. Tomado de “Sistema de bombeo” por Refinería del Pacífico, 2016, *Manual de Operación del Acueducto La Esperanza – RDP*, p. 46. Derechos Reservados 2016 por Refinería del Pacífico.

Las variables del proceso de bombeo son medidas y transmitidas hacia el SCADA mediante instrumentación electrónica de campo. Cada instrumento de campo cuenta con un certificado de calibración, lo cual asegura la buena calidad y confiabilidad de

las medidas realizada. En las pantallas del SCADA mostradas en las figuras 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8, se puede apreciar la siguiente instrumentación:

- Transmisores indicadores de presión diferencial (PDIT)
- Transmisores indicadores de presión (PIT)
- Transmisores indicadores de flujo del tipo ultrasónico (FIT)
- Sensores de temperatura del tipo RTD (TE)
- Sensores de vibración radial (VT)
- Sensores de vibración axial (SE)

En las pantallas también se observan válvulas, que pueden ser:

- Válvulas manuales on-off (HOV)
- Válvulas motorizadas on-off (MOV)
- Válvulas reguladoras de presión (PV)
- Válvulas reguladoras de caudal o flujo de agua (FV)

La figura 3.5 corresponde a la pantalla desde la cual se realiza la supervisión, monitoreo y control de las bombas, válvulas y otros equipos asociados a la estación de bombeo. Para cada bomba se tiene: una válvula HOV para bloquear la succión de la bomba, un PDIT para monitorear la condición del filtro de succión, un PIT para monitorear la presión de succión, un PIT para monitorear la presión de descarga, una MOV utilizada durante los procesos de arranque/parada de la bomba y una PV utilizada para labores de mantenimiento y pruebas en la bomba.

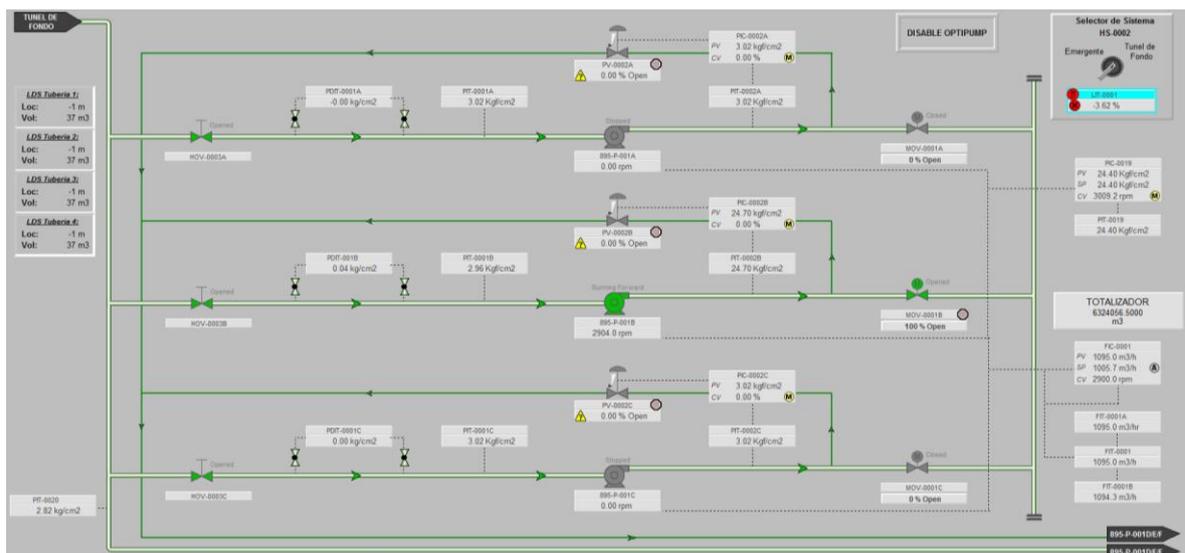


Figura 3.5. Pantalla de operación para bombas A, B y C en el SCADA. Tomado de “Sistema de bombeo principal 895-P-0001A/B/C” por Refinería del Pacífico, 2016, *Manual de Operación del Acueducto La Esperanza – RDP*, p. 46. Derechos Reservados 2016 por Refinería del Pacífico.

En el cabezal de descarga se cuenta con un FIT para medir el caudal consumido y para realimentar el proceso hacia el sistema de control. Se puede observar en esta pantalla el bloque de control de flujo FIC-0001, este bloque contiene el algoritmo de control PID principal que controla los variadores de velocidad que a su vez controlan las revoluciones de las moto-bombas, permitiendo finalmente tener una regulación del flujo de agua en función de la demanda. Se aprecia también el bloque de control de presión PIC-0019 cuya función es controlar las bombas principales cuando existen condiciones de presión inseguras, es decir, en condiciones normales el FIC-0001 controla el bombeo, en condiciones anormales el PIC-0019 toma el control. El bloque totalizador es un acumulador del volumen de agua bombeada.

En la figura 3.6 se muestra la pantalla del SCADA destinada a la supervisión, monitoreo y control de las operaciones en las derivaciones hacia los cantones de Manta y Jaramijó. Es común encontrar un PIT para monitorear la presión, un FIT para monitorear el caudal entregado, una FV para regular el caudal en base a lo solicitado por cada cliente, y un bloque de control de flujo FIC que también utiliza el algoritmo de control PID para automatizar la operación.

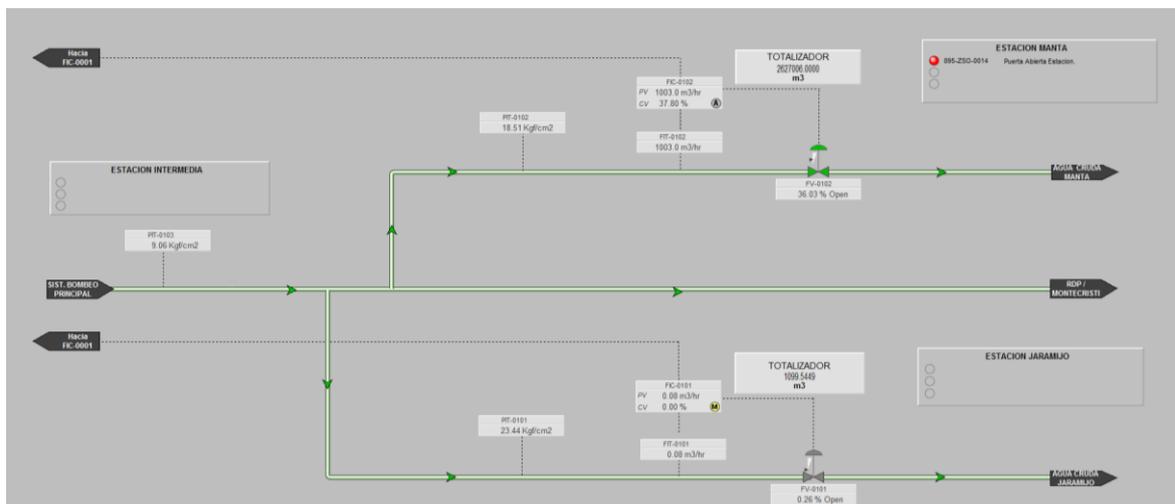


Figura 3.6. Pantalla de operación de derivaciones de Manta y Jaramijó en el SCADA. Tomado de "Derivaciones Manta y Jaramijó" por Refinería del Pacífico, 2016, *Manual de Operación del Acueducto La Esperanza – RDP*, p. 47. Derechos Reservados 2016 por Refinería del Pacífico.

La supervisión, monitoreo y control de las operaciones en Montecristi y RDP se realizan desde la pantalla del SCADA mostrada en la figura 3.7. En el caso de Montecristi se encuentran los mismos equipos que en Manta y Jaramijó, descritos con anterioridad.

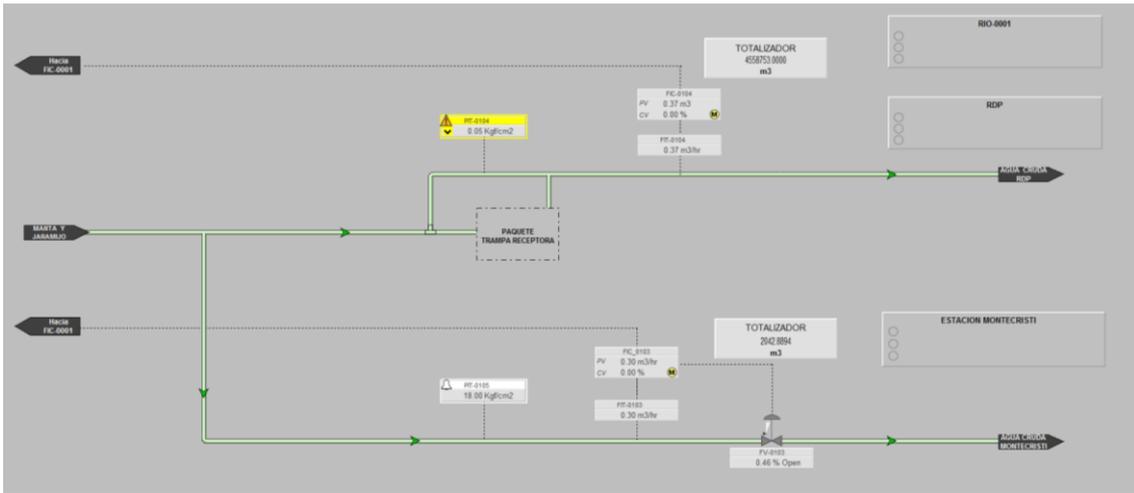


Figura 3.7. Pantalla de operación de derivaciones de Montecristi y RDP en el SCADA. Tomado de “Derivaciones de Montecristi y RDP” por Refinería del Pacífico, 2016, *Manual de Operación del Acueducto La Esperanza – RDP*, p. 47. Derechos Reservados 2016 por Refinería del Pacífico.

Complementariamente al SCADA, existe un sistema de monitoreo de condiciones mecánicas en bombas, que utiliza datos de temperaturas y vibraciones en las bombas. El propósito de este sistema es poder realizar mantenimientos predictivos a las bombas. La pantalla que permite monitorear las temperaturas y vibraciones en las bombas se muestra en la figura 3.8

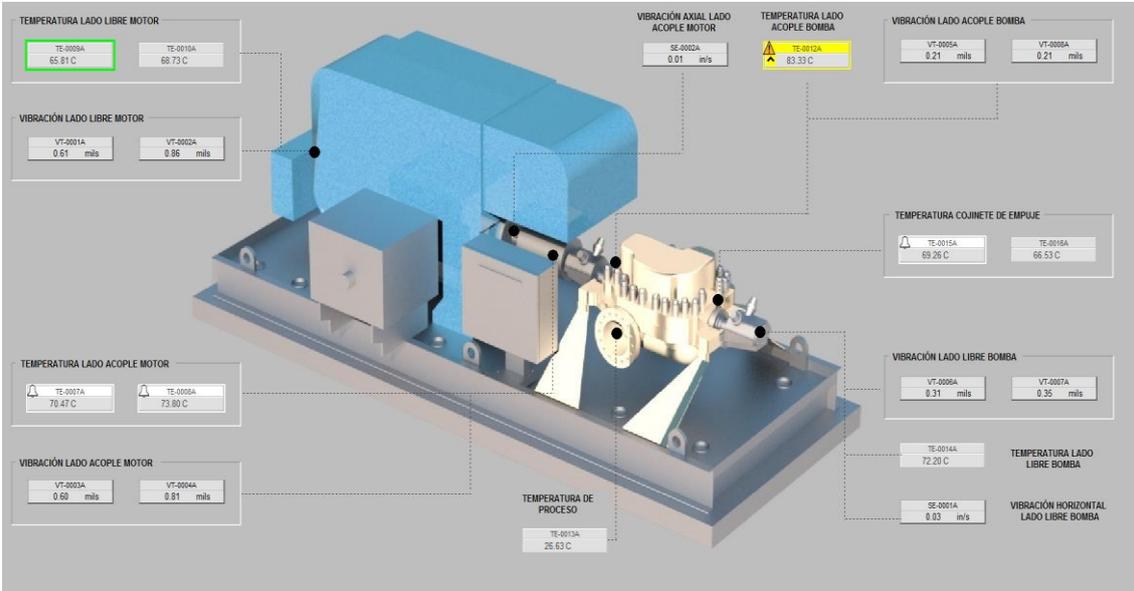


Figura 3.8. Pantalla de sistema de monitoreo de condiciones mecánicas, vibraciones y temperaturas. Tomado de “Sistema de vibración y temperatura de bombas principales” por Refinería del Pacífico, 2016, *Manual de Operación del Acueducto La Esperanza – RDP*, p. 55. Derechos Reservados 2016 por Refinería del Pacífico.

El SCADA también permite monitorear las variables eléctricas del sistema. La alimentación eléctrica descrita en el numeral 3.2.2 está conformada por una subestación eléctrica y el switchgear. La figura 3.9 muestra la pantalla del SCADA destinada a las mediciones eléctricas en la subestación, y la figura 3.10 muestra la pantalla para las mediciones eléctricas en el switchgear.

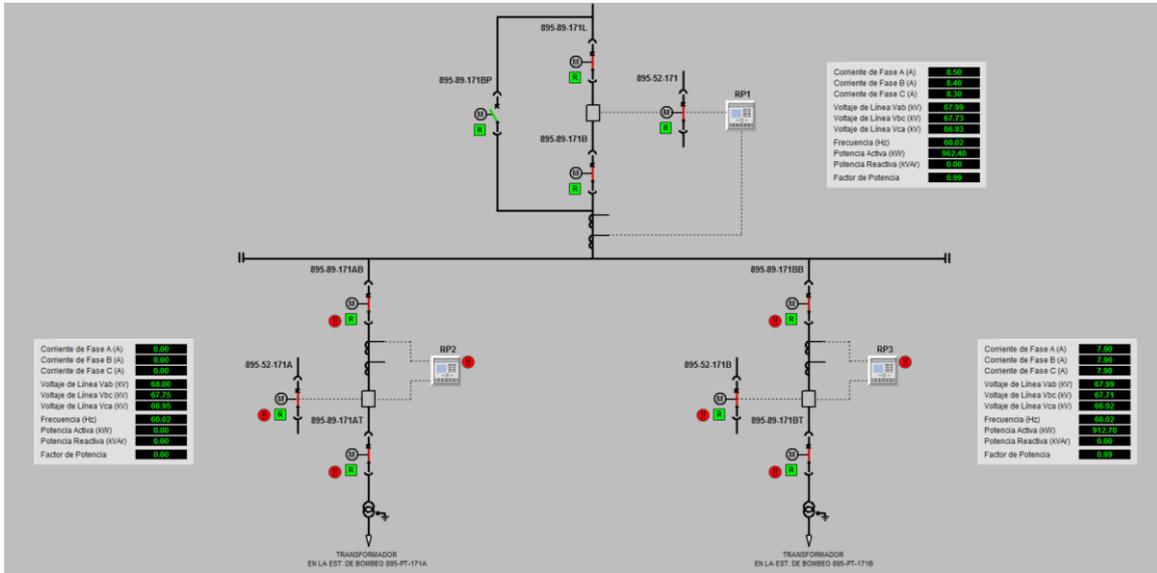


Figura 3.9. Pantalla de mediciones y maniobras eléctricas en la subestación. Tomado de “Monitoreo Subestación” por Refinería del Pacífico, 2016, *Manual de Operación del Acueducto La Esperanza – RDP*, p. 34. Derechos Reservados 2016 por Refinería del Pacífico.

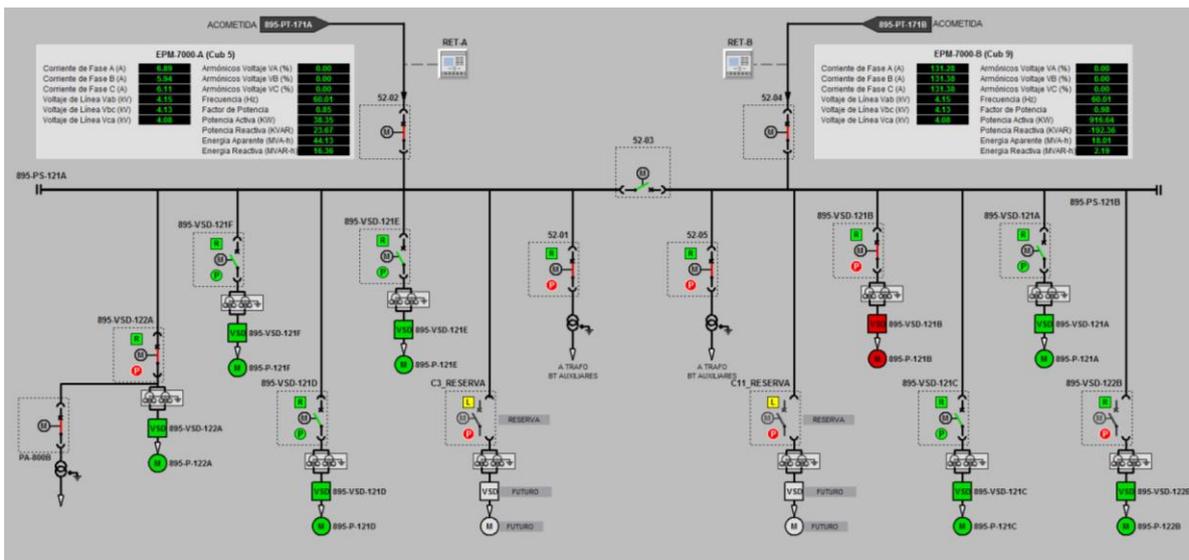


Figura 3.10. Pantalla de mediciones y maniobras eléctricas en el switchgear y variadores de velocidad. Tomado de “Monitoreo de Switchgear y Variadores” por Refinería del Pacífico, 2016, *Manual de Operación del Acueducto La Esperanza – RDP*, p. 34. Derechos Reservados 2016 por Refinería del Pacífico.

## **4. RESULTADOS**

## 4.1. Análisis de fallas súbitas en el proceso

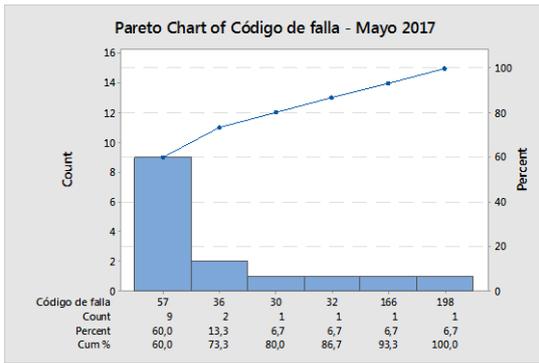
### 4.1.1. Detección y priorización de fallas súbitas

Cuando una moto-bomba en el sistema de bombeo principal deja de operar por factores externos no planificados, a esto se le considera una falla súbita en el sistema. El equipo que controla la moto-bomba es el variador de velocidad, y una de las bondades de este equipo es que tiene una memoria interna la cual registra eventos, alarmas y fallas. Los mensajes, la codificación, la descripción y las recomendaciones para cada falla se encuentran documentados en el Manual de Solución de Problemas, entregado por el fabricante del equipo, cuyo esquema se muestra en la figura 4.1.

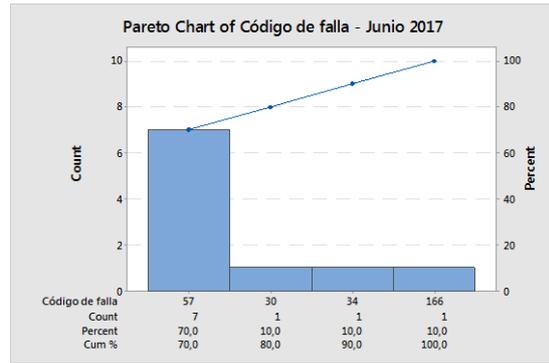
All Drive Types	PF7000A	PF7000B	PF7000C	Main Drive	Heatpipe Drive	Fault Message	Fault Code	Description	Recommended Action(s)
			X	X		CabinetTemp High (C-Frame Only)	70	The drive has a temperature switch in several cabinets, and all the N/C switches are connected in series and fed back to the XIO input. The levels are set differently for different cabinets.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identify which switch has opened, and focus on that cabinet.</li> <li>Check for proper air flow within the identified section.</li> <li>Verify that the stirring fans are operating correctly.</li> <li>Verify that the ambient temperature is within tolerances.</li> </ul>
X						Capability Limit	465	The motor current exceeded maximum allowable level for the variable torque drive. Drive was limiting the motor current to the safe level for drive thermal protection, but new speed operating point cannot be achieved higher than 6 Hz.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ensure that the drive is not used for constant torque load condition.</li> </ul>
					X	CMC Blcked Exhst	477	There is possibly blockage to the CMC exhaust/inlet airflow. <b>Note:</b> This fault word is used exclusively on Heatpipe drives.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ensure that there are no obstructions to the path of the outgoing/incoming air flow.</li> <li>Check for cooling fan deterioration.</li> <li>Verify if the trip setting (P813/P814) matched factory recommended value.</li> </ul>
					X	CMC Blcked Inlet	480	There is possibly blockage to the CMC exhaust/inlet airflow. <b>Note:</b> This fault word is used exclusively on Heatpipe drives.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ensure that there are no obstructions to the path of the outgoing/incoming air flow.</li> <li>Check for cooling fan deterioration.</li> <li>Verify if the trip setting (P813/P814) matched factory recommended value.</li> </ul>
					X	CMC Double Fans	474	The drive has just lost two or more of the cooling fans.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verify the fan contactors, fan overload and the 120V wiring to the XIO card.</li> </ul>
					X	Cnv Airflow Loss	505	The cooling airflow velocity on the specified power stack is below the trip/warn level.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ensure that there are no obstructions to the path of the outgoing/incoming air flow.</li> <li>Check for cooling fan deterioration. Verify if the trip (P840) and warn setting (P841) matched factory recommended values.</li> </ul>
					X	Cnv Double Fans	473	The drive has just lost two or more of the cooling fans.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verify the fan contactors, fan overload and the 120V wiring to the XIO card.</li> </ul>
					X	CMC Fan9 Ctctr	487	Loss of the cooling fan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verify the fan contactor, fan overload and the 120V wiring to the XIO card.</li> </ul>
					X	Cnv Fan3 Ctctr	482		
					X	Cnv Fan4 Ctctr	483		
					X	Cnv Fan5 Ctctr	484		
					X	Cnv Fan6 Ctctr	485		
					X	Cnv Fan7 Ctctr	486		
					X	Cnv Fan9 Ctctr	487		
X						Control Pwr Loss	57	There has been a loss or dip in the control power feeding the drive for more than 5 cycles.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ensure that the power source is active and investigate the reliability of the source.</li> <li>Check control power input to ACB.</li> </ul>

Figura 4.1. Esquema de los mensajes de fallas del Manual de Solución de Problemas de los variadores de velocidad. Tomado de "PowerFlex 7000 Medium Voltage AC Drives. Troubleshooting Guide" por Rockwell Automation, 2015. Derechos Reservados 2015 por Rockwell Automation.

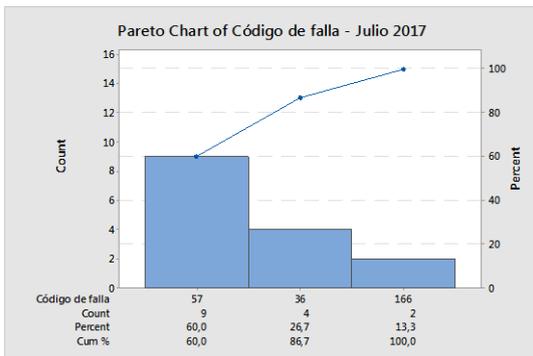
Luego de extraer los datos históricos de fallas de cada uno de los variadores de velocidad, se utiliza la herramienta de diagrama de Pareto con el objetivo de determinar el 20% de fallas que provocan el 80% de paradas indeseadas en el sistema de bombeo. Se utiliza la herramienta informática MINITAB 17 y se desarrolla el diagrama para los meses de marzo, junio y julio del 2017, y un acumulado de marzo a julio del 2017; teniendo los resultados mostrados en las figuras 4.2.



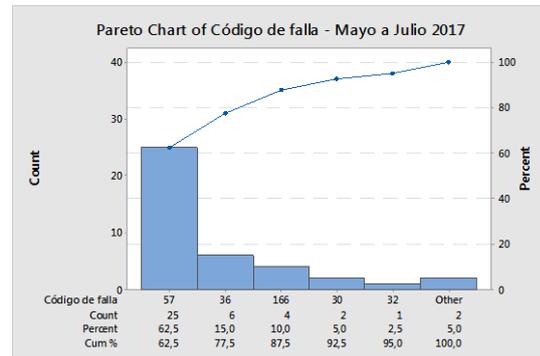
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.2. Diagramas de Pareto para fallas en variadores de velocidad. (a) Mayo del 2017. (b) Junio del 2017. (c) Julio del 2017. (d) Acumulado de Mayo a Julio del 2017.

En la figura 4.2 se puede observar que la principal falla que ocasiona apagado no planificado de moto-bombas es la 57, que junto con las fallas 36 y 166 conforman el 80% de problemas prioritarios de resolver.

En la tabla 4.1 se muestra el código de falla, mensaje y descripción para las fallas prioritarias determinadas en el diagrama de Pareto de la figura 4.2. (d).

Tabla 4.1

20% de fallas que provocan el 80% de paradas indeseadas en moto-bombas.

Código	Mensaje	Descripción
57	Perdida de potencia de control	Ha existido una pérdida o caída en la alimentación eléctrica de control del VFD por más de 5 ciclos.
36	Entrada de protección #2	Entrada estándar de fallo / advertencia externa incluida que permite al usuario final instalar un contacto auxiliar de protección (por ejemplo, relé de protección de alimentación de entrada) que puede activar un fallo de accionamiento o advertencia, dependiendo de la configuración de la clase InputProt2 (P444).
166	Contactador de entrada abierto	El contactor de entrada ha sido abierto sin una señal de mando del VFD. Verificar el feedback del contactor y el cableado de 120V al ACB.

#### 4.1.2. Causa raíz

Para determinar la causa raíz de las fallas identificadas en el punto anterior, se utiliza la herramienta de diagrama causa – efecto (también conocido como diagrama de espina de pescado o diagrama de Ishikawa). Esta herramienta permite vincular y sintetizar las diferentes causas (entradas) a un efecto (salida), categorizando en las 6M estudiadas anteriormente. La figura 4.3 muestra el diagrama de casusa – efecto.

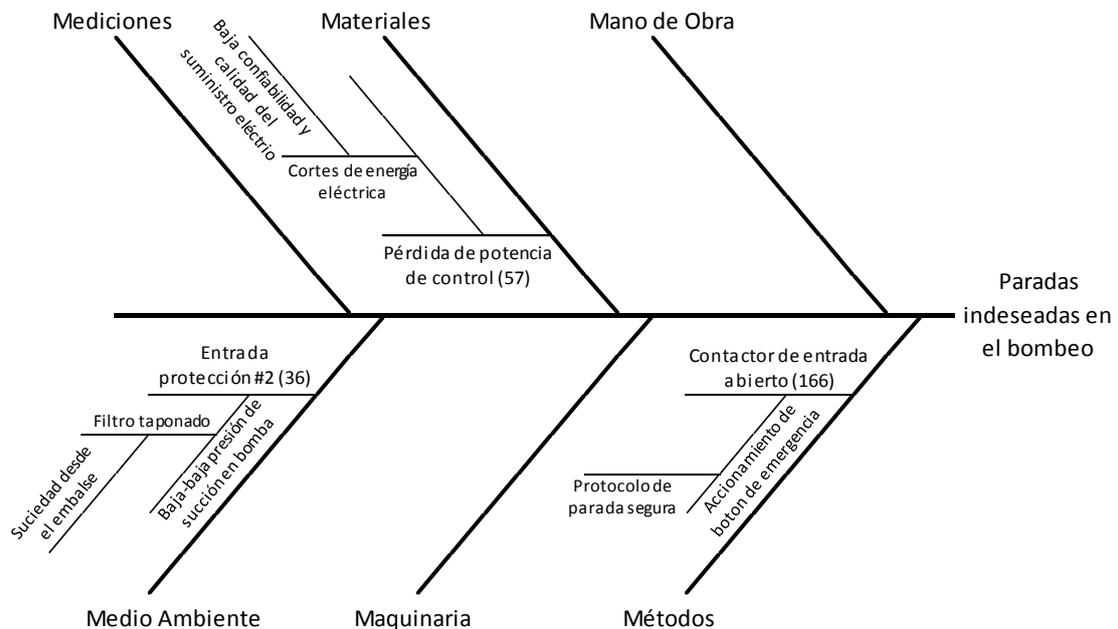


Figura 4.3. Diagrama de causa – efecto para las paradas indeseadas en el sistema de bombeo. El diagrama causa – efecto de la figura 4.3 muestra las causas raíz que provocan apagados indeseados en el sistema de bombeo. La primera y más frecuente, con un 62,5% de ocurrencia, es la baja confiabilidad del suministro eléctrico, el cual es

competencia de la empresa eléctrica suministradora del servicio, provocando cortes súbitos de energía y paradas en moto-bombas. La segunda causa, con un 15% de ocurrencia, corresponde a suciedad proveniente desde el embalse el cual provoca taponamiento de filtros de succión en bombas. La tercera causa, con el 10% de ocurrencia, corresponde a paradas de emergencia desde el botón rojo tipo hongo, la cual es accionada por el operador, y han sido provocadas durante pruebas de confiabilidad y seguridad del sistema ante emergencias.

## 4.2. Análisis de la variabilidad del proceso

En esta sección se analiza el comportamiento del sistema de bombeo durante condiciones continuas de operación.

### 4.2.1. Selección de variables para el análisis

Las variables a ser monitoreadas y analizadas se categorizan en tres grupos: variables de entrada, variables de salida y variables de proceso. La tabla 4.2 muestra información relevante de las variables consideradas para el análisis de la variabilidad del proceso.

Tabla 4.2

*Variables para análisis de la variabilidad.*

Variable	Tipo	Instrumento de medida	Fuente
Voltaje eléctrico (promedio 3 fases)	Entrada	Transformador de potencial	Red de suministro eléctrico
Frecuencia eléctrica	Entrada	Transformador de potencial	Red de suministro eléctrico
R.P.M. (promedio bombas operando)	Entrada	Tacómetro	Operador y Sistema de Control
Presión en cabezal de succión	Entrada	Transmisor de presión	Nivel de agua en la represa y tanque de operación con sistema emergente.
Eficiencia	Proceso	Instrumentos de flujo, presión, voltaje y corriente.	Sistema de bombeo

### 4.2.2. Cartas de control univariable

El análisis se lo realiza para la variable de interés, que en este caso es la eficiencia del sistema de bombeo, la cual se calcula con las ecuaciones 2.3 a la 2.8. Los inputs de estas ecuaciones son los datos provenientes de los instrumentos de presión, flujo,

voltaje y corriente disponibles desde el sistema SCADA. La eficiencia es una variable de naturaleza continua, por lo que el análisis inicia con una carta de Individuales, que es la carta más sencilla para este tipo de variables. El monitoreo de la eficiencia se lo realiza desde el 09 de septiembre del 2016 al 15 de agosto del 2017, filtrando los periodos en los que el sistema ha estado inoperativo y utilizando un tiempo de muestreo de 6 horas. Se utiliza la herramienta informática MINITAB 17, dando como resultado la carta mostrada en la figura 4.4.

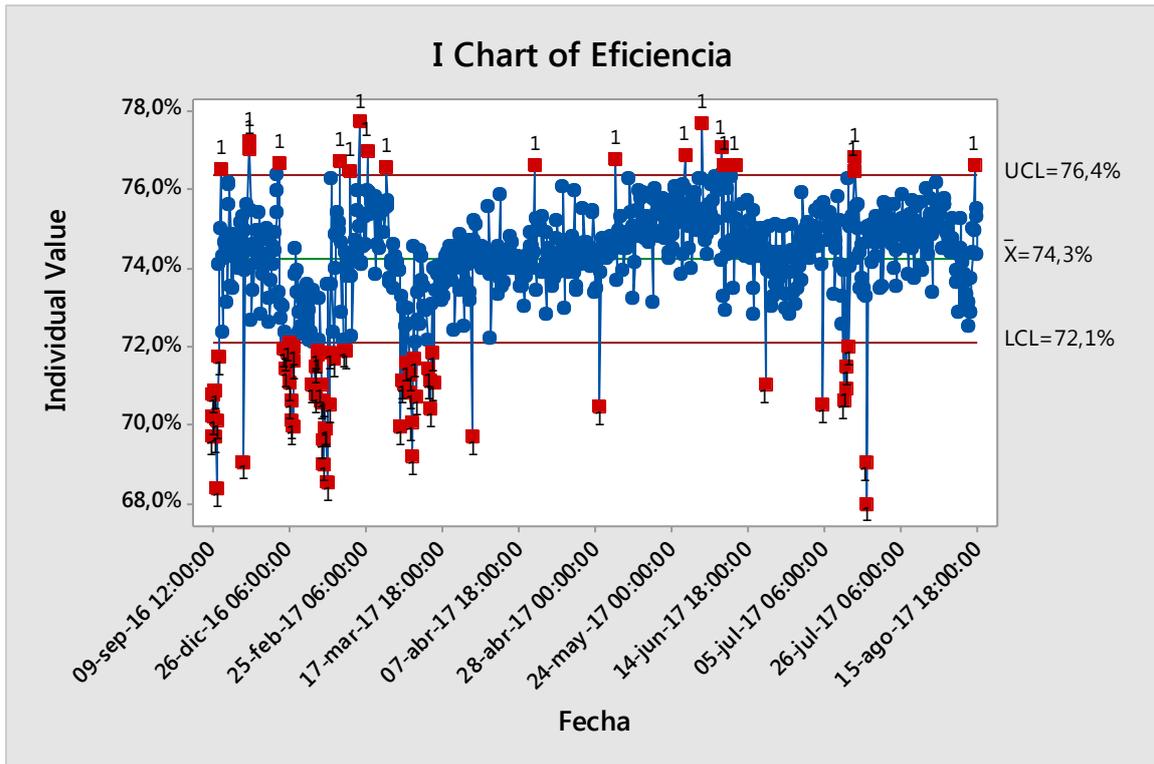


Figura 4.4. Carta de control de Individuales para la variable eficiencia. Parámetros: muestreo=cada 6 horas.

En la figura 4.4 se observan unos patrones interesantes de variación, principalmente a inicios de septiembre del 2016, entre la segunda quincena de diciembre del 2016 y la primera quincena de enero del 2017, la primera quincena de marzo de 2017 y a mediados de julio del 2017; observándose valores de eficiencia por debajo del límite inferior de control (LCL). También se observan ciertos puntos en los que la eficiencia está por encima del límite superior de control (UCL), pero estos valores no se consideran negativos, ya que el objetivo es tener eficiencias sobre el 73% (este valor de especificación es definido por la ingeniería del proyecto).

Luego se realiza una carta tipo EWMA, con un valor de  $\lambda = 1$ . Se utiliza MINITAB 17 y se obtiene la carta de la figura 4.5. Se observa que la figura 4.5 es exactamente igual

a la figura 4.4, esto corrobora la teoría, ya que cuando  $\lambda = 1$  la carta tipo EWMA tiende a ser igual a la carta de Individuales.

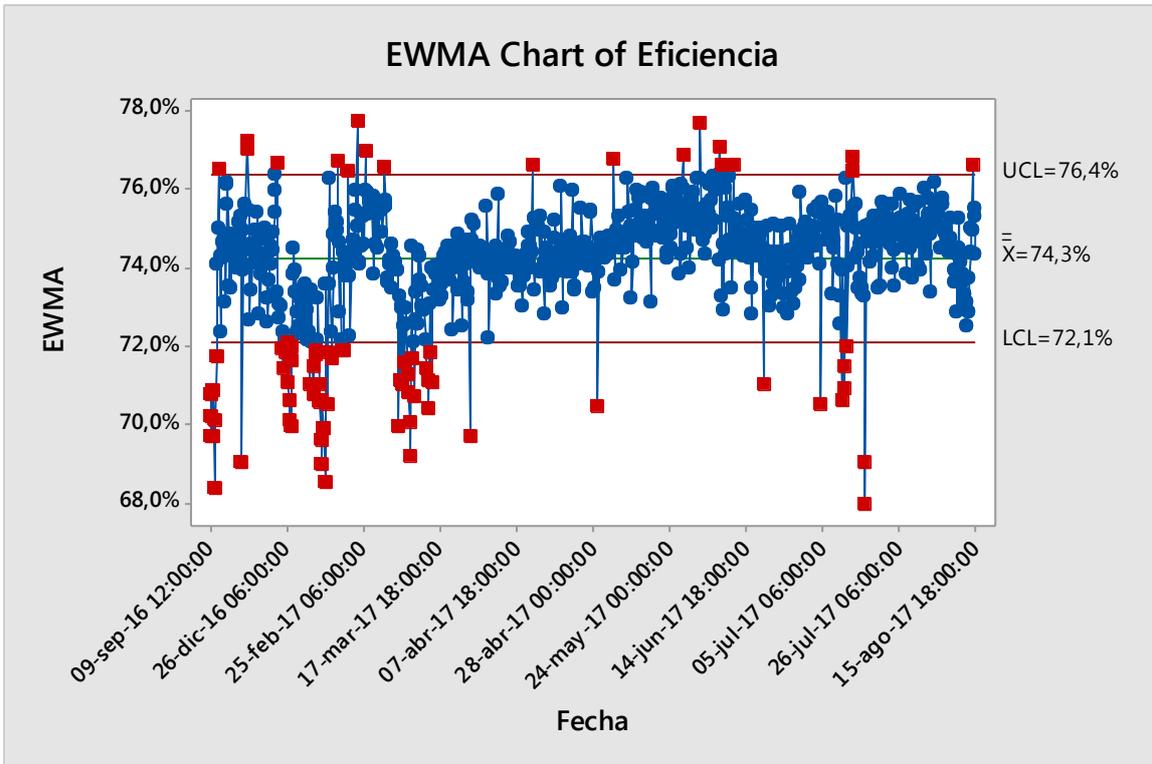


Figura 4.5. Carta de control tipo EWMA para la variable eficiencia. Parámetros: muestreo=cada 6 horas y  $\lambda = 1$ .

Continuando con el análisis, se disminuye el valor de  $\lambda$  a 0,5 para observar el desempeño de la carta EWMA. Con la ayuda de MINITAB 17 se obtiene la carta de la figura 4.6 donde se puede apreciar claramente que esta nueva carta EWMA se vuelve “más exigente” que las cartas anteriores. Esto también corrobora la teoría, en que al disminuir  $\lambda$  la carta EWMA detecta variaciones más pequeñas.

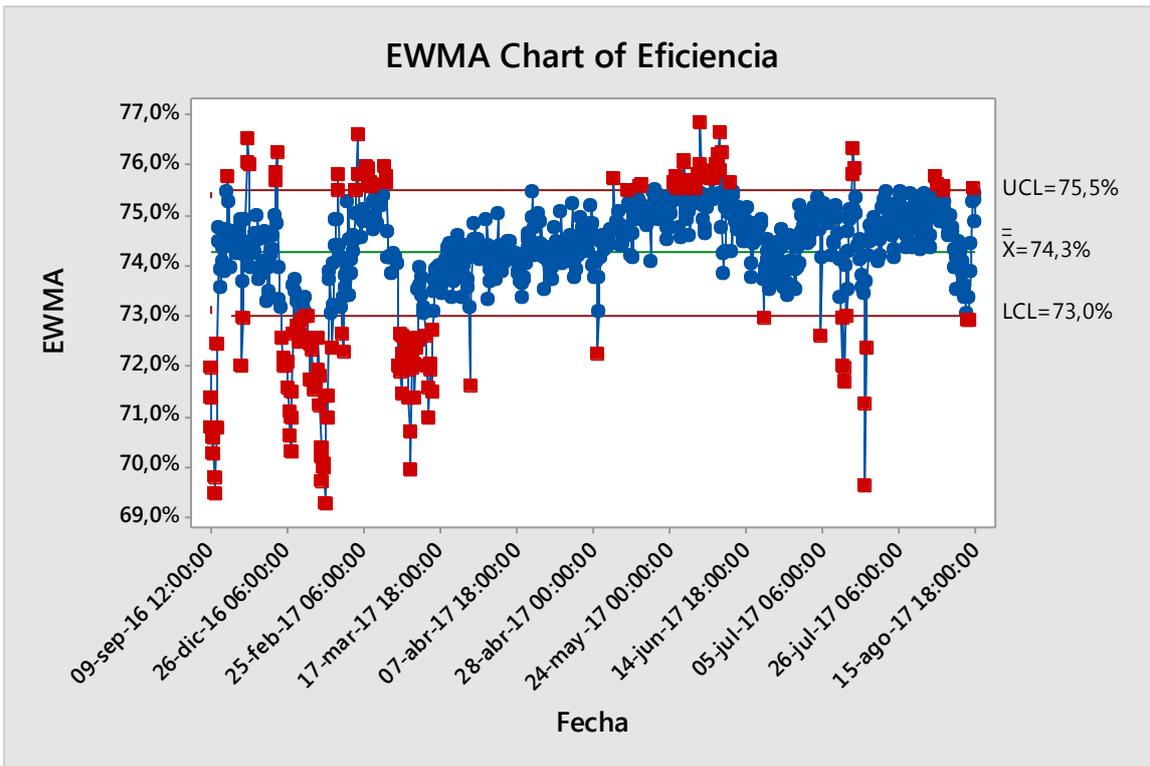


Figura 4.6. Carta de control tipo EWMA para la variable eficiencia. Parámetros: muestreo=cada 6 horas y  $\lambda = 0,5$ .

Las cartas EWMA de las figuras 4.7 y 4.8 se realizaron con valores de  $\lambda$  de 0,2 y 0,05 respectivamente. Nuevamente se observa que al reducir  $\lambda$  la carta de control EWMA se vuelva más exigente y los límites de control se vuelven más pequeños.

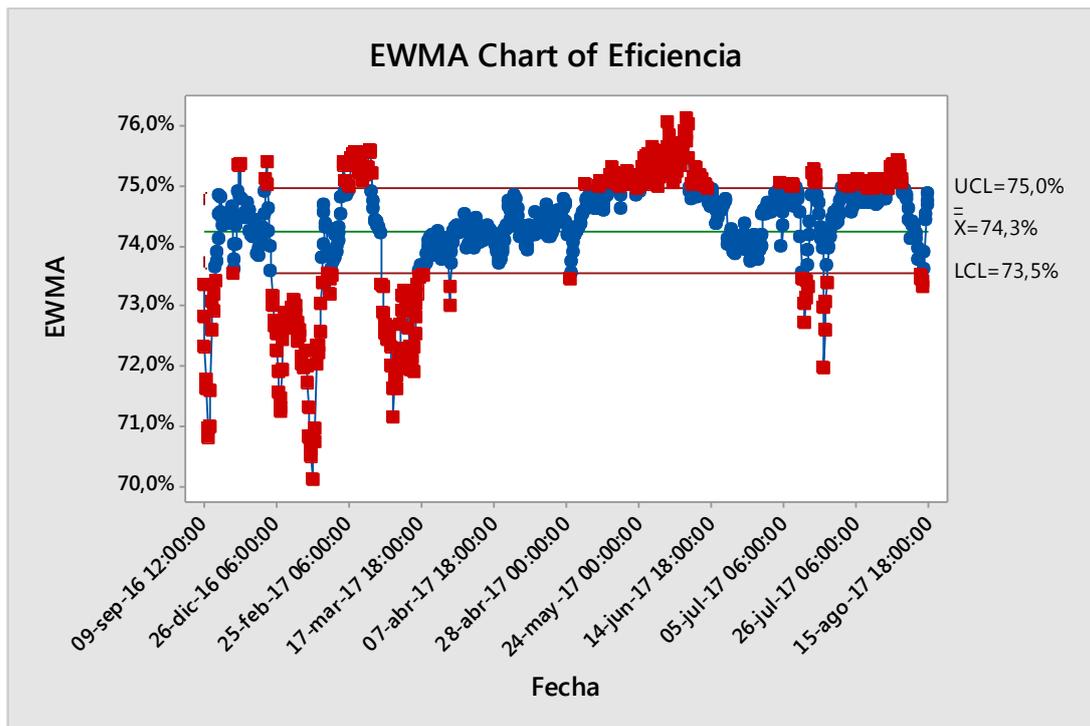


Figura 4.7. Carta de control tipo EWMA para la variable eficiencia. Parámetros: muestreo=cada 6 horas y  $\lambda = 0,2$ .

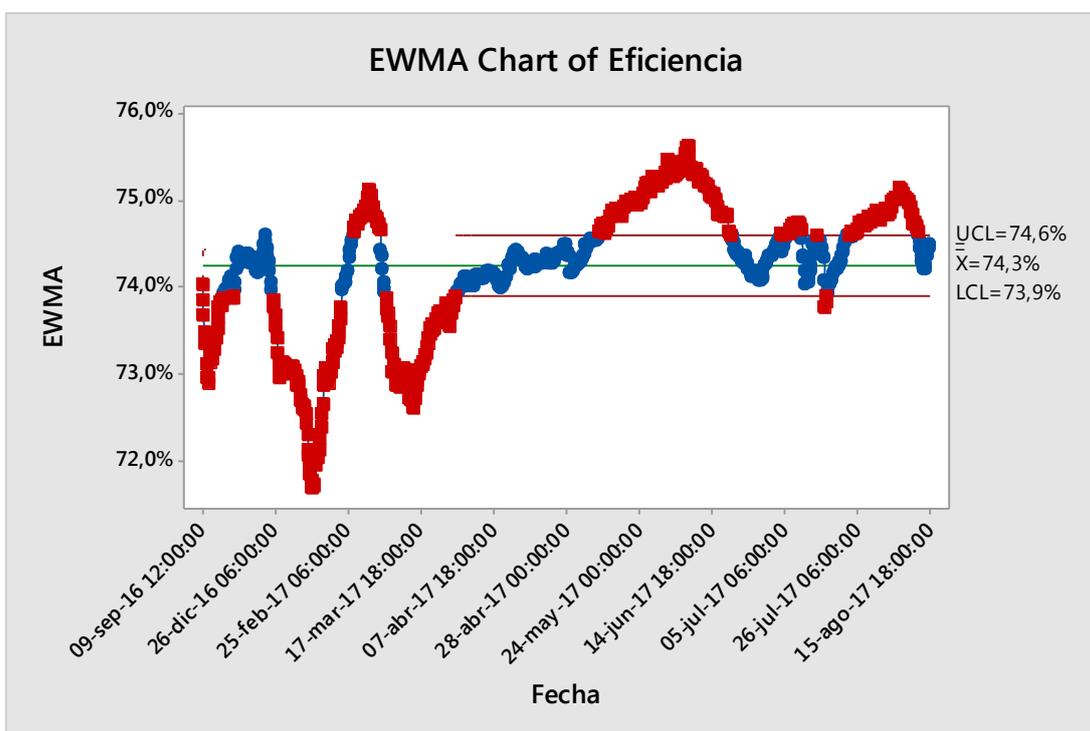


Figura 4.8. Carta de control tipo EWMA para la variable eficiencia. Parámetros: muestreo=cada 6 horas y  $\lambda = 0,05$ .

### 4.2.3. Cartas de control multivariable

Continuando con el análisis de la variabilidad, ahora damos un enfoque multivariable al proceso. Para esto usamos las cartas de control multivariable, con el objetivo de identificar cuáles de las variables de entrada proporcionan mayor variabilidad a la variable eficiencia. Se selecciona la carta tipo  $T^2$  por ser más sencilla que las cartas MCUSUM y MEWMA, además que estas dos últimas son más sensibles a variaciones pequeñas, pero ya se observó en el análisis univariable que no se requiere tanta sensibilidad a variaciones pequeñas. Se desarrollan cartas tipo  $T^2$  mostradas en las figuras 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13. Se selecciona este tipo de carta de control, ya que es más

En la figura 4.9 se ha desarrollado una carta tipo  $T^2$  para las variables eficiencia, presión en cabezal de succión, R.P.M promedio, voltaje promedio y frecuencia de la red eléctrica; con el objetivo de observar la variabilidad conjunta.

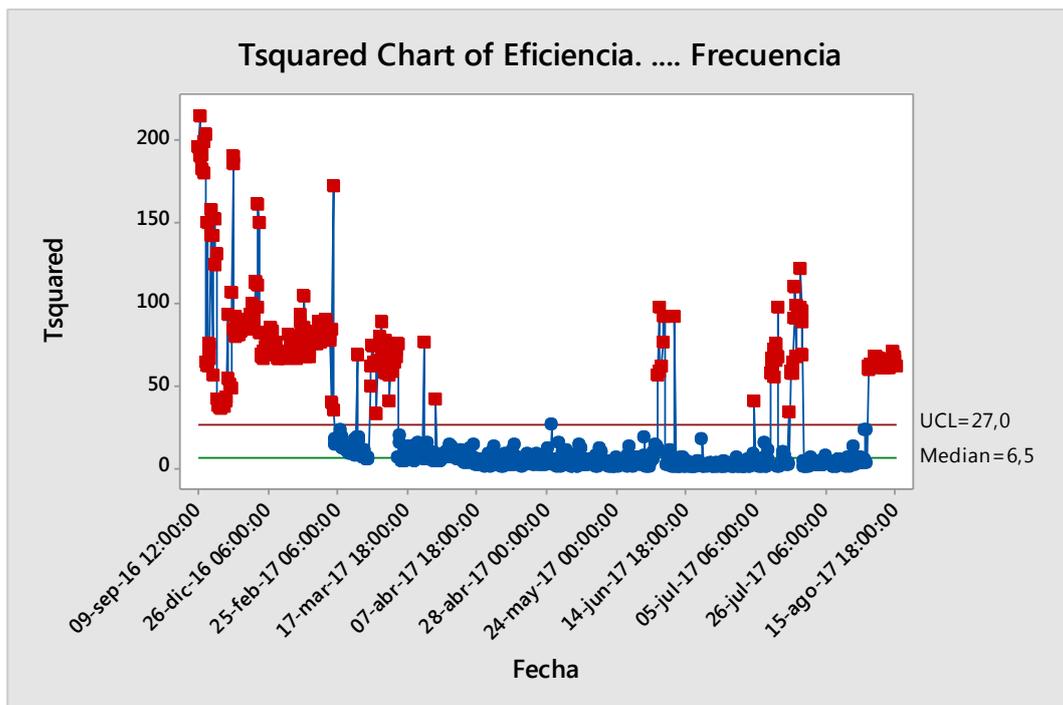


Figura 4.9. Carta de control tipo  $T^2$  para las variables eficiencia, presión en cabezal de succión, R.P.M. promedio en moto-bombas, voltaje y frecuencia de red eléctrica. Parámetros: muestreo=cada 6 horas.

Se debe recordar que la presión en el cabezal de succión depende del nivel de agua en la represa (cuando se opera con el desagüe de fondo), o del nivel de agua del tanque emergente (cuando se opera con el sistema emergente), tal como se mostró en la figura 3.2. Las R.P.M. promedio es la velocidad promedio de cada moto-bomba y es

configurada por el operador (cuando se opera en modo manual) o por el sistema automático de control (cuando se opera en modo automático). Por otro lado, el voltaje y la frecuencia dependen de la calidad de energía suministrada por la red eléctrica. En la carta de Individuales y en la carta EWMA ya se identificaron las señales especiales de variación que se encuentran por debajo del límite de control inferior (LCL), y la carta  $T^2$  de la figura 4.9 ratifica que en estos periodos de tiempo los puntos están más alejados del límite de control (UCL).

En la figura 4.10 se ha desarrollado una carta tipo  $T^2$  únicamente para las variables eficiencia y presión en cabezal de succión, para observar únicamente el efecto de esta última variable en la eficiencia. Se puede observar que la figura 4.10 es muy parecida a la figura 4.9, lo que lleva a pensar que la presión en el cabezal de succión es la variable de entrada que más afecta a la variable eficiencia.

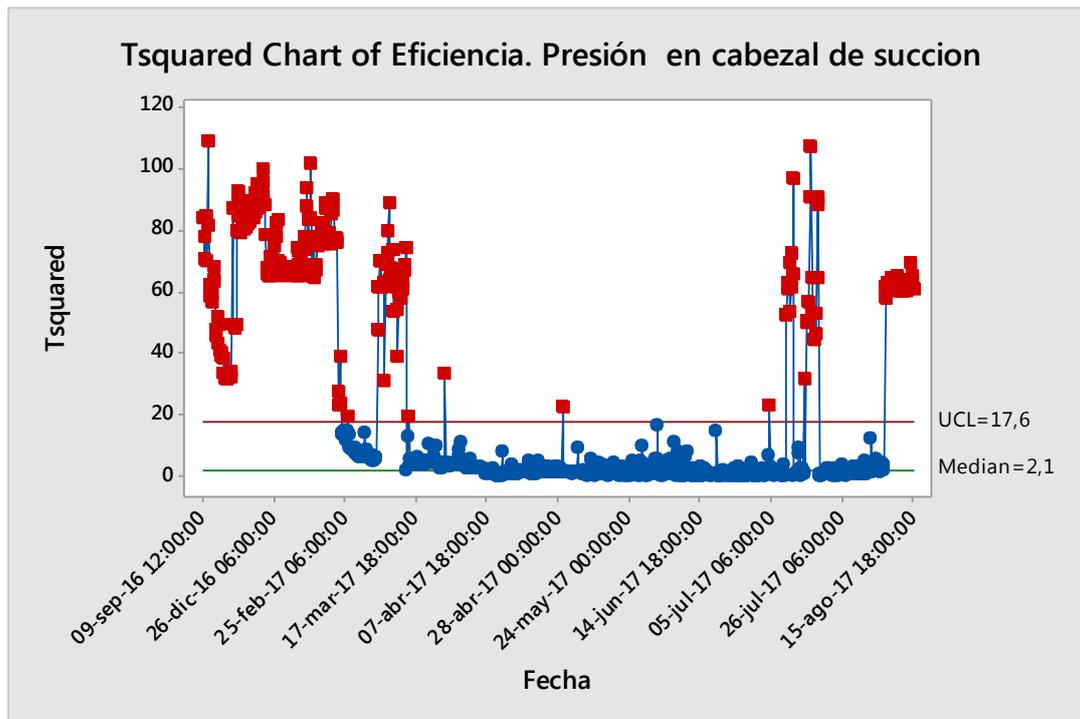


Figura 4.10. Carta de control tipo  $T^2$  para las variables eficiencia y presión en cabezal de succión. Parámetros: muestreo=cada 6 horas.

El efecto de las R.P.M. promedio en moto-bombas (configurada por el operador o por el sistema automático de control) sobre la eficiencia del sistema se puede observar en la carta  $T^2$  de la figura 4.11. Se observa que los patrones formados por los puntos rojos más alejados del límite de control (UCL) de la figura 4.11, coinciden con los patrones fuera del límite de control de la carta  $T^2$  de la figura 4.9, aunque en menor

grado que el de la carta  $T^2$  de la figura 4.10, dando a pensar que esta variable es la segunda más influyente sobre la eficiencia del sistema.

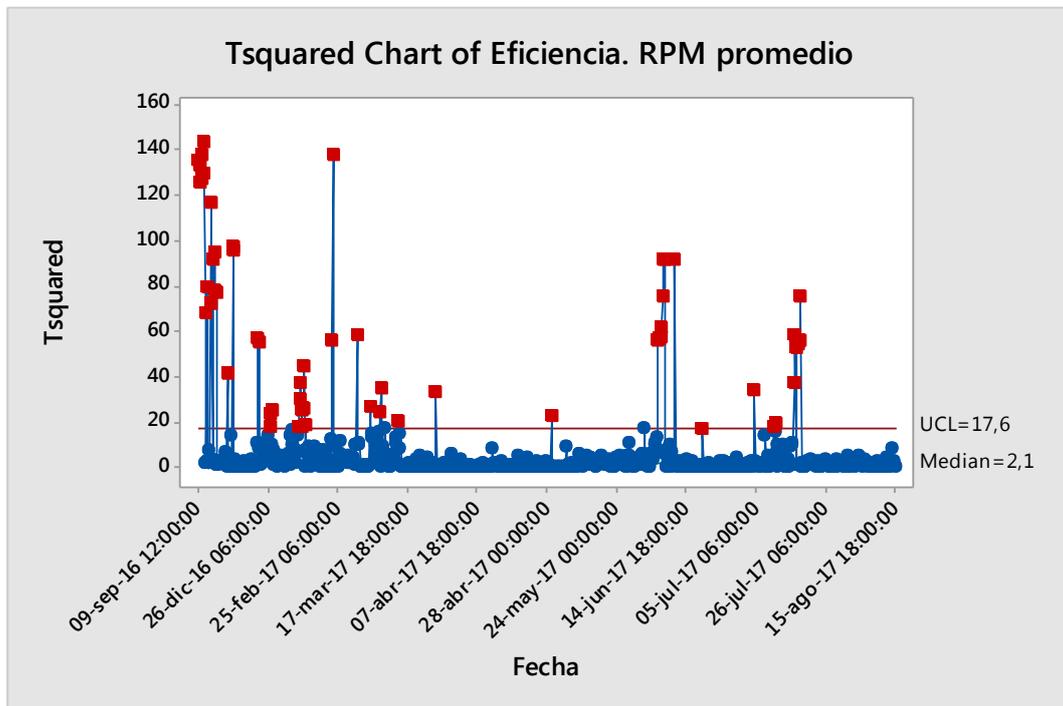


Figura 4.11. Carta de control tipo  $T^2$  para las variables eficiencia y R.P.M. promedio en motores. Parámetros: muestreo=cada 6 horas.

El efecto del voltaje de la red eléctrica sobre la eficiencia se muestra en la figura 4.12, observándose que no se presentan, significativamente, patrones o señales especiales de variabilidad, a más de puntos aislados que pueden ser producto de la variabilidad natural de la red de alimentación eléctrica. Algo similar ocurre en la figura 4.13, donde se ha desarrollado una carta  $T^2$  para la frecuencia de la red eléctrica y la eficiencia del sistema de bombeo. Algo importante de destacar es que la relación entre el punto más alejado y el límite de control (UCL) en las figuras 4.12 y 4.13 es aproximadamente 3 veces menor que en la figura 4.11, lo que también es un indicativo de que estas dos últimas variables eléctricas tienen efectos menores sobre la eficiencia del sistema.

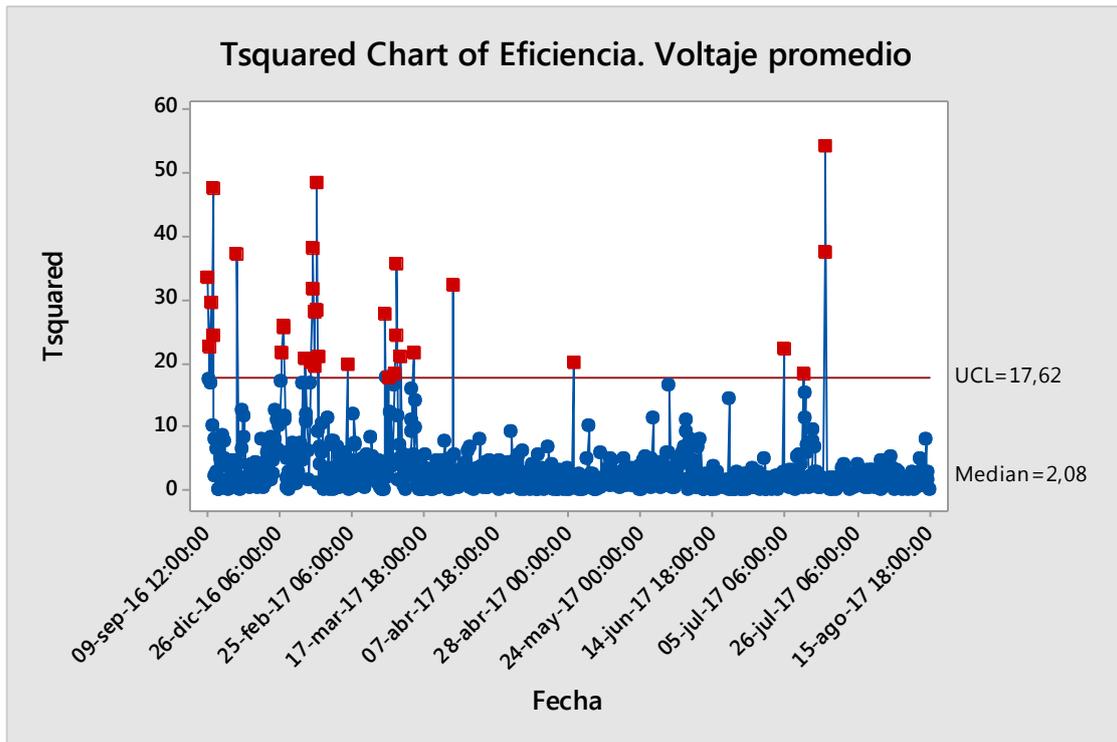


Figura 4.12. Carta de control tipo  $T^2$  para las variables eficiencia y voltaje de la red eléctrica. Parámetros: muestreo=cada 6 horas.

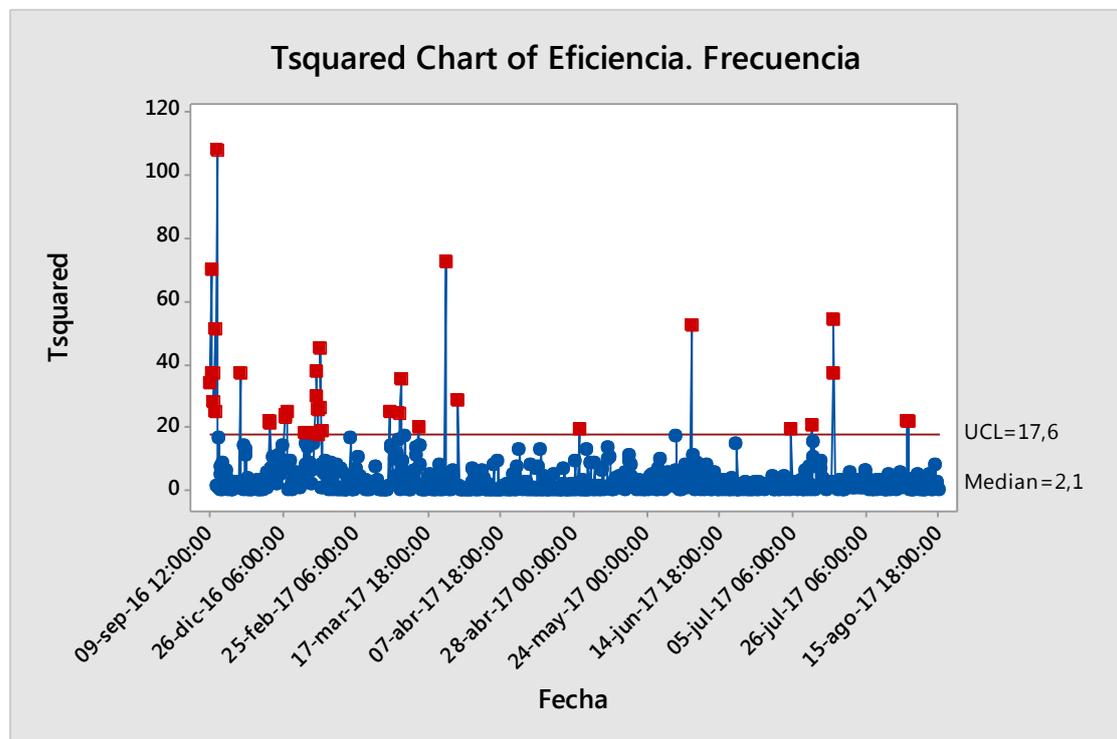


Figura 4.13. Carta de control tipo  $T^2$  para las variables eficiencia y frecuencia de la red eléctrica. Parámetros: muestreo=cada 6 horas.

#### 4.2.4. Causas especiales de variación

Las cartas de control realizadas anteriormente sirven para poder identificar las señales que producen causas especiales de variación en la eficiencia del sistema de bombeo. Ya se mencionó que las causas especiales más significativas ocurrieron a inicios de septiembre del 2016; entre la segunda quincena de diciembre del 2016 y la primera quincena de enero del 2017; la primera quincena de marzo de 2017; y a mediados de julio del 2017. Teniendo señales de eficiencia por debajo del límite de control inferior (LCL).

Investigando más a fondo en la información histórica del sistema de control, se presenta en la tabla 4.3 las cuatro principales causas especiales de variación en la eficiencia del sistema de bombeo principal.

Tabla 4.3

*Causas especiales de variación del sistema de bombeo principal.*

No Causa	Descripción	Periodo de tiempo
1	Operación con captación desde el desagüe de fondo, con R.P.M. menores a las indicadas en la filosofía de operación (tabla 3.6)	Inicios de septiembre 2016
2	Operación con captación desde el sistema emergente	Entre 2da quincena de diciembre 2016 y 1era quincena de enero 2017
3	Operación con captación desde el sistema emergente	1era quincena de marzo 2017
4	Operación con captación desde el sistema emergente	Mediados de julio 2017

#### 4.2.5. Causa raíz

En la tabla 4.3 se determinaron las causas especiales de variación, y sobre éstas se elabora el diagrama de causa – efecto presentado en la figura 4.14 para determinar la(s) causa(s) raíz. Se observa en la columna vertebral principal el efecto, es decir la reducción de la eficiencia. En las “espinas” principales se observan las 6M estudiadas anteriormente, que son: Mediciones, Medio Ambiente, Mano de Obra, Materiales, Maquinaria y Métodos. Las cuatro causas especiales de variación de la tabla 4.3 están dentro de las categorías de Mano de Obra y Medio Ambiente.

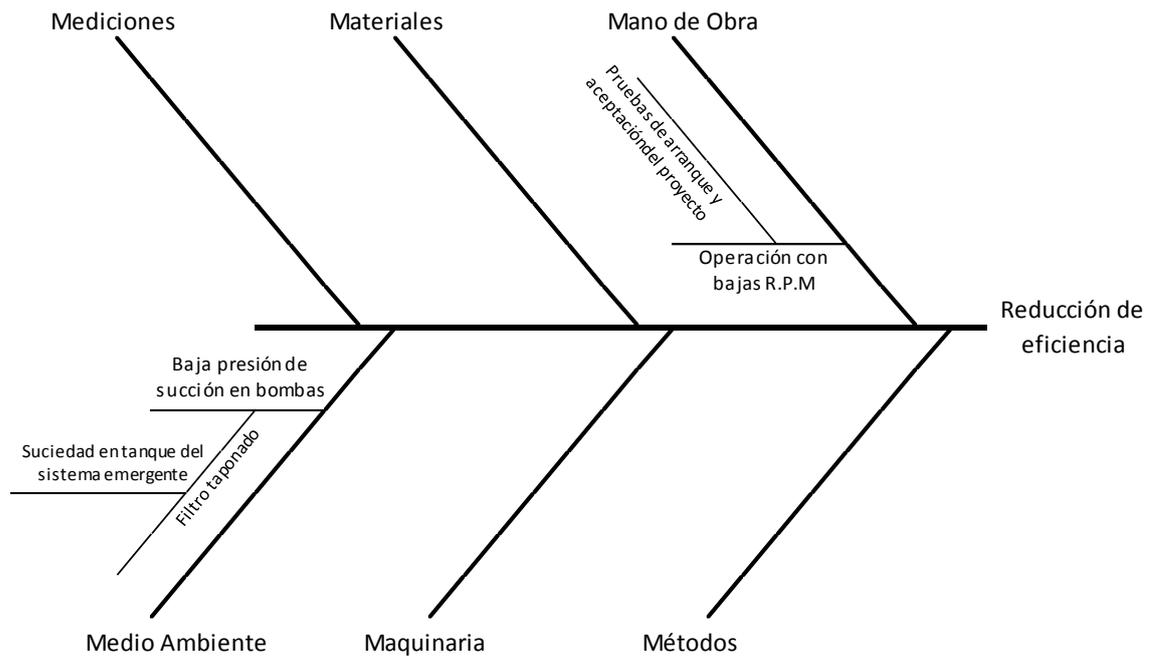


Figura 4.14. Diagrama de causa – efecto para la reducción de la eficiencia del sistema de bombeo principal.

La primera causa especial de variación indica que el sistema de bombeo operó con captación desde el desagüe de fondo de la represa, y que el operador configuró el sistema con valores fuera de los indicados en la tabla 3.6. Es importante recalcar que en este periodo de tiempo se ejecutaron las tareas de pruebas de arranque y aceptación de este proyecto, por lo que los ingenieros y operadores eran conscientes de esta causa.

La segunda, tercera y cuarta causa especial de variación indican que el sistema de bombeo operó con la captación desde el sistema emergente. Lo que se ha podido notar es que cuando la captación de las bombas principales se realiza desde el sistema emergente existe mayor suciedad, principalmente producto de peces y restos vegetales acumulados en el tanque, lo que provoca que el taponamiento de los filtros de las bombas principales se produzcan con mayor rapidez que cuando se opera con captación desde el desagüe de fondo, y por lo tanto la presión de succión de las bombas principales cae con mayor rapidez. Esto provoca una caída de la eficiencia a valores incluso por abajo del 70%.

### 4.3. Acciones de mejora

Los temas de atención más significativos, los cuales son obtenidos de los dos análisis anteriores, se listan a continuación:

- La baja confiabilidad y calidad del suministro eléctrico provoca la mayor cantidad de puestas a tierra súbitas indeseadas en el sistema de bombeo principal.
- La suciedad proveniente desde el embalse se acumula en el tanque del sistema emergente, y cuando las bombas principales captan agua desde este tanque los filtros se taponan con mayor rapidez en comparación con captación desde el desagüe de fondo.

El suministro eléctrico hacia la estación de bombeo es un servicio que le compete a la empresa pública CNEL Manabí. Para solucionar este problema se pueden desarrollar proyectos que permitan aumentar la confiabilidad y calidad de este servicio. Actualmente la empresa Refinería del Pacífico, operadora del sistema de bombeo, ha firmado un convenio con la empresa CNEL Manabí, para desarrollar un proyecto para mejorar el suministro de energía eléctrica hacia la estación de bombeo.

La suciedad proveniente desde el embalse es un factor ambiental externo que la organización no lo puede mitigar directamente. En este caso las bombas cuentan con filtros en la succión, los cuales impiden que la suciedad afecte la integridad mecánica de las mismas, y cada filtro cuenta con un transmisor de presión diferencial el cual permite estimar el nivel de suciedad presente. Las bombas principales pueden captar agua desde el desagüe de fondo o desde el tanque del sistema emergente, pero en el tanque se acumula suciedad principalmente producto de residuos animales (peces) y vegetales, que ocasionan que los filtros se taponen con mayor rapidez que cuando se opera con el desagüe de fondo. Este problema ocasiona reducciones en la eficiencia llegando a valores incluso por abajo del 70%, y para reducir este riesgo se ha instalado una canastilla con malla en el ingreso de agua al tanque del sistema emergente, tal como se observa en la figura 4.15.



(a)



(b)



(c)



(d)

*Figura 4.15.* Instalación de canastilla y malla en tanque de sistema emergente. (a) Instalación de canastilla en ingreso de agua desde embalse al tanque. (b) Instalación de malla en canastilla. (c) Suciedad en filtro antes de instalación de canastilla y malla. (d) Suciedad en filtro después de instalación de canastilla y malla.

En la figura 4.15 se muestra claramente como la suciedad en filtros se reduce luego de la instalación de la canastilla y malla en el ingreso de agua desde el embalse al tanque del sistema emergente.

## 4.4. Análisis de la capacidad del proceso

### 4.4.1. Carta de control sin causas especiales de variación

Como se estudió en el marco teórico, previo a realizar un estudio de capacidad de un proceso, se debe primero eliminar las causas especiales de variación y tener el proceso bajo control estadístico. Tomando en consideración lo anterior, se vuelve a realizar la carta de control EWMA para la eficiencia del sistema de bombeo luego de la instalación de la canastilla y malla en el ingreso de agua en el tanque del sistema emergente. La instalación se la realizó entre el 15 y 17 de julio, por lo que la nueva carta de control EWMA se la realiza desde el 18 de julio hasta el 15 de agosto del 2017, dicha carta se muestra en la figura 4.16

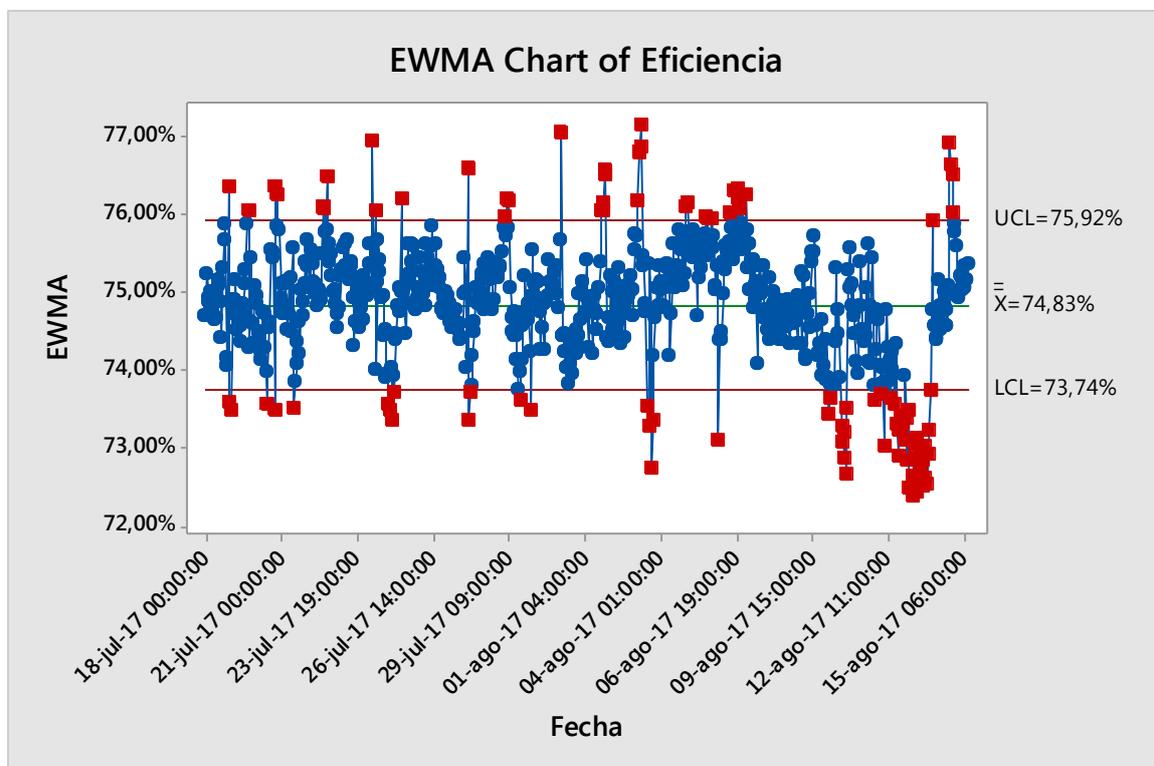


Figura 4.16. Carta de control tipo EWMA para la variable eficiencia, retirando las causas especiales de variación. Parámetros: muestreo=cada 1 hora,  $\lambda = 1$ .

Del 18 de julio al 15 de agosto del 2017 el sistema de bombeo operó de la siguiente manera:

- Del 18 al 19 de julio del 2017 las bombas principales operaron con captación desde tanque del sistema emergente.

- Desde el 20 de julio al 07 de agosto del 2017 las bombas principales operaron con captación desde el desagüe de fondo de la represa.
- Desde el 08 al 15 de agosto del 2017 las bombas principales operaron con captación desde el tanque del sistema emergente.

Aunque en el periodo del 08 al 15 de agosto del 2017 se observan señales cuya tendencia es a la baja, sobrepasando incluso el LCL, estos valores no son menores al 72%, lo cual es una mejora en comparación a la figura 4.5 donde la eficiencia toma valores incluso por debajo del 70%. El comportamiento del sistema de bombeo luego de las acciones de mejora (representado en la figura 4.16) es mucho más estable que su comportamiento inicial (representado en la figura 4.5).

#### 4.4.2. Especificaciones de ingeniería para la eficiencia del sistema

Anteriormente se mencionó que la eficiencia de un sistema de bombeo puede ser calculada mediante el producto de la eficiencia de la bomba, motor y variador de velocidad. La tabla 4.4 muestra las especificaciones de ingeniería para la eficiencia de la bomba, motor y variador de velocidad, cuyos datos son obtenidos de las hojas de datos de estos equipos que fueron desarrolladas durante la fase de ingeniería y diseño del proyecto. También se muestra la eficiencia total del sistema de bombeo, que es calculada mediante la ecuación 2.4.

Tabla 4.4

*Especificaciones de ingeniería para la eficiencia de equipos y del sistema.*

Equipo	Especificación de eficiencia	Fuente
Bomba	79%	Tabla 3.2
Motor	96%	Tabla 3.3
Variador de velocidad	96%	Tabla 3.4
Sistema (bomba-motor-vdv)	73%	Ecuación 2.4

De la tabla 4.4 se tiene un valor de 73% como límite de especificación inferior (LSL) para la eficiencia del sistema de bombeo. Esto quiere decir, que la organización está dispuesta a aceptar eficiencias por encima de este valor.

#### 4.4.3. Estudio de capacidad del proceso

Para realizar el estudio de capacidad en un proceso, se asume que los datos en estudio siguen una distribución de probabilidad normal. Por esta razón, previo a la realización del estudio se debe realizar una prueba de normalidad de la muestra. Para esto se utiliza la herramienta MINITAB 17 teniendo como resultado la figura 4.17.

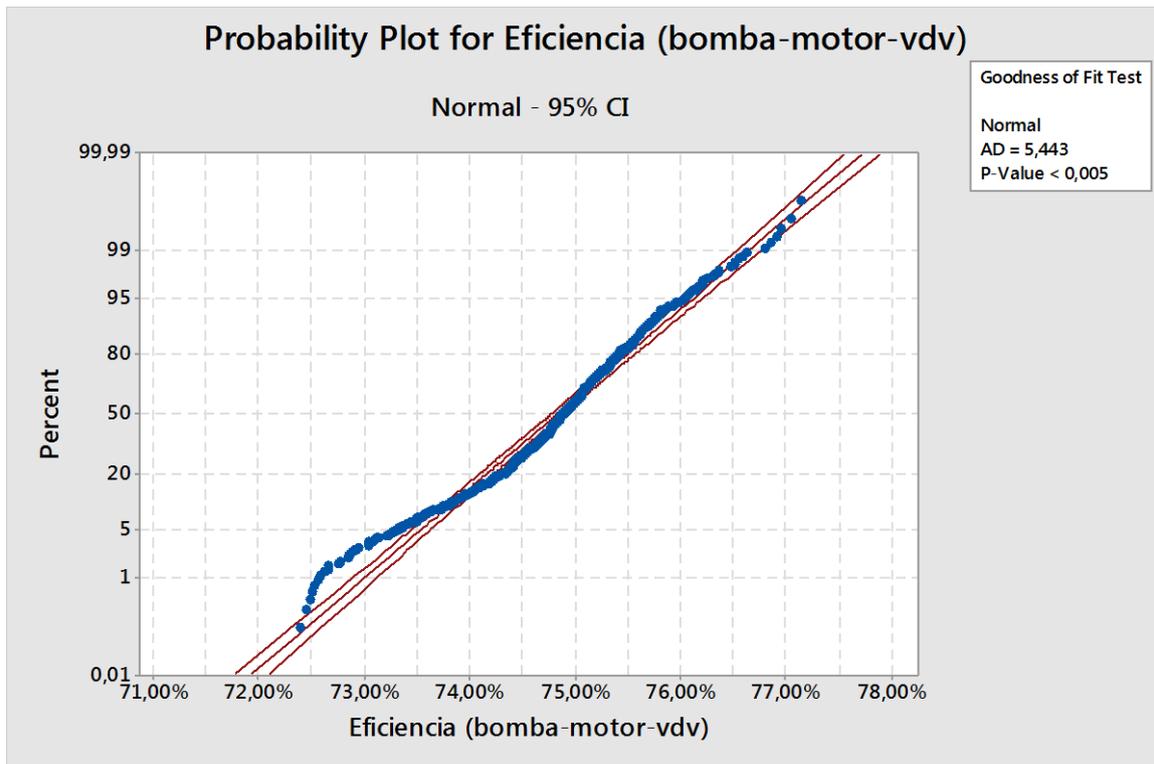
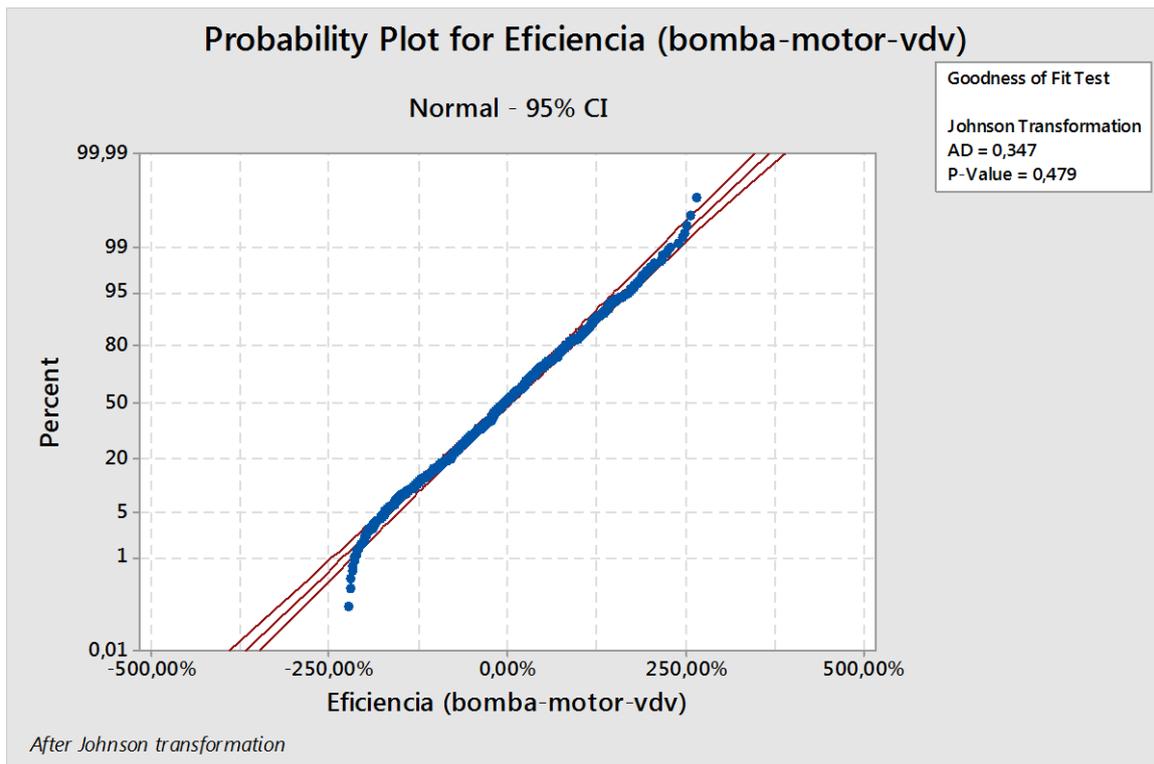


Figura 4.17. Prueba de normalidad de la muestra. Parámetros: muestreo=cada 1 hora.

Para poder concluir que la muestra de la variable de interés (eficiencia del sistema de bombeo sin causas especiales de variación) sigue una distribución normal, el parámetro P-Value debe ser mayor a 0,05. En el caso de la prueba de normalidad de la figura 4.17 se puede concluir que la muestra no sigue una distribución de probabilidad normal. Esta situación puede ser atacada de varias maneras. Una de las formas de “normalizar” una muestra no normal es utilizando la transformada de Johnson.

Con la ayuda de MINITAB 17 se aplica la transformada de Johnson a la muestra, teniendo como resultado la figura 4.18.



*Figura 4.18.* Prueba de normalidad de la muestra luego de aplicar la transformada de Johnson. Parámetros: muestreo=cada 1 hora.

De la figura 4.18 se puede observar que luego de aplicar la transformada de Johnson a la muestra, el parámetro P-Value toma el valor de 0,479 y este valor es mayor que 0,05; por lo que se concluye que la muestra transformada sigue una distribución de probabilidad normal.

Luego de haber normalizado la muestra, y con el límite de especificación inferior (LSL) determinado anteriormente, se elabora el estudio de capacidad del proceso. Con la ayuda de MINITAB 17 se desarrolla el estudio de capacidad del proceso que se muestra en la figura 4.19.

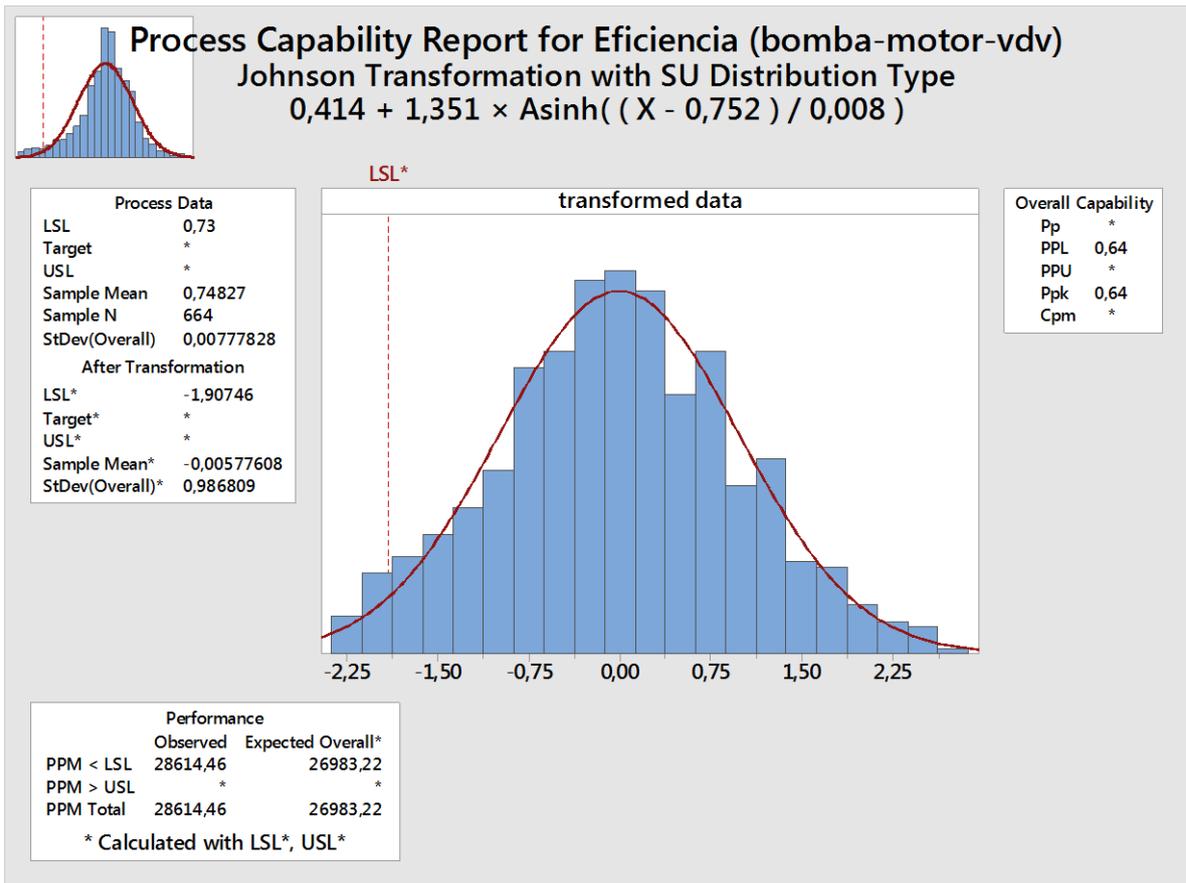


Figura 4.19. Estudio de capacidad del proceso. Parámetros: límite de especificación inferior (LSL) = 73%, muestreo=cada 1 hora.

En el estudio de capacidad del proceso de la figura 4.19 se tiene un índice de capacidad de largo plazo (Ppk) de 0,64. También se observa que las PPM fuera de especificación suman el valor de 26983, lo que da un nivel sigma entre 3 y 4 (determinado con la tabla 2.4).

#### 4.5. Análisis económico

Ya se mencionó anteriormente que el principal propósito del Acueducto La Esperanza – RDP es suministrar agua a la futura Refinería del Pacífico y a los cantones considerados parte de la zona de influencia del proyecto de construcción de la nueva refinería. En la tabla 3.1 se listó los caudales máximos de agua requeridos por cada cliente. Pero la demanda de agua se va incrementando en función de la realización del proyecto de la nueva refinería y de los requerimientos de las plantas de tratamiento de agua de cada municipio. Por este motivo, para el análisis económico se consideran cinco escenarios que son:

- Escenario 1: 1000 m<sup>3</sup>/h hacia Refinería del Pacífico y 1250 m<sup>3</sup>/h hacia Manta; dando un total de 2250 m<sup>3</sup>/h.
- Escenario 2: 1000 m<sup>3</sup>/h hacia Refinería del Pacífico, 1250 m<sup>3</sup>/h hacia Manta y 450 m<sup>3</sup>/h hacia Montecristi; dando un total de 2700 m<sup>3</sup>/h.
- Escenario 3: 1000 m<sup>3</sup>/h hacia Refinería del Pacífico, 1250 m<sup>3</sup>/h hacia Manta, 450 m<sup>3</sup>/h hacia Montecristi, 300 m<sup>3</sup>/h para Jaramijó; dando un total de 3000 m<sup>3</sup>/h.
- Escenario 4: 2000 m<sup>3</sup>/h hacia Refinería del Pacífico, 1250 m<sup>3</sup>/h hacia Manta, 450 m<sup>3</sup>/h hacia Montecristi, 300 m<sup>3</sup>/h para Jaramijó; dando un total de 4000 m<sup>3</sup>/h.
- Escenario 5: 3000 m<sup>3</sup>/h hacia Refinería del Pacífico, 1250 m<sup>3</sup>/h hacia Manta, 450 m<sup>3</sup>/h hacia Montecristi, 300 m<sup>3</sup>/h para Jaramijó; dando un total de 5000 m<sup>3</sup>/h.
- Escenario 6: 4000 m<sup>3</sup>/h hacia Refinería del Pacífico, 1250 m<sup>3</sup>/h hacia Manta, 450 m<sup>3</sup>/h hacia Montecristi, 300 m<sup>3</sup>/h para Jaramijó; dando un total de 6000 m<sup>3</sup>/h.

En el marco teórico se mencionó que el variador de velocidad es la tecnología más adecuada para controlar el caudal de un sistema de bombeo, cuando los requerimientos de flujo son variables; y además, esta tecnología permite mejorar la eficiencia energética del sistema. Este postulado se puede comprobar en la corrida económica mostrada en el anexo 8, donde se observa que el uso de variadores de velocidad permite lograr ahorros de energía entre el 57 y el 69%, lo que en cifras financieras equivale a ahorros entre 1,05 y 2,11 millones de dólares en un año de operación.

En el análisis de variabilidad realizado anteriormente, se determinó que cuando el sistema de bombeo principal capta agua desde el tanque del sistema emergente, la eficiencia del sistema de bombeo principal cae a valores incluso menores al 70%, aun cuando la especificación de ingeniería del proyecto recomienda valores por arriba del 73%. Este problema ocurre debido a que en el tanque del sistema emergente se concentra una mayor cantidad de residuos que provocan el taponamiento más acelerado de los filtros de las bombas principales. Como acciones de mejora se instaló una canastilla con una malla en el ducto de entrada de agua en el tanque emergente, con el fin de reducir estos residuos. Esta acción provocó que la eficiencia del sistema no caiga por debajo del 72%.

En el anexo 9 se muestra la corrida económica antes y después de la implementación de la acción de mejora, la cual es un producto de la aplicación del control estadístico de procesos (CEP) en esta estación de bombeo. Se observan ahorros adicionales entre el 2,4 y 5,3%, lo que en cifras financieras corresponde a ahorros entre 73 mil y 127 mil dólares por año de operación.

## CONCLUSIONES

- El control estadístico de procesos es un conjunto de herramientas, que resulta ser una estrategia eficaz y de bajo costo para monitorear y controlar una estación de bombeo, permitiendo también gestionar su eficiencia energética.
- El control automático de procesos tiene su base en la teoría de control, que es una rama interdisciplinaria de la ingeniería y la matemática, y se conforma por un conjunto de tecnologías que permiten la medición, control, automatización y optimización de procesos de bombeo, logrando mejoras en su rendimiento.
- Los variadores de velocidad son equipos que permiten controlar la capacidad de una estación de bombeo cuando la demanda de caudal es variable, permitiendo también lograr una mejor eficiencia en el sistema.
- Aun cuando la estación de bombeo del estudio de caso cuenta con un sistema de control automático de procesos y con variadores de velocidad, estos sistemas no permiten localizar causas especiales de variación, lo que el control estadístico de procesos sí permite.
- El sistema de control automático de procesos y los variadores de velocidad son tecnologías que se localizan a nivel operativo. El control estadístico de procesos es una herramienta que se encuentra en un nivel táctico dentro de la organización, y permite monitorear y supervisar el desempeño de las otras dos tecnologías. El uso combinado de estas tres tecnologías permite la mejora continua y el incremento de la eficiencia energética en el sistema de bombeo.
- El uso del diagrama de Pareto y el diagrama de causa-efecto, permiten determinar que el principal problema que ocasiona la parada súbita del bombeo es el corte del suministro eléctrico. La organización ha firmado un convenio con la empresa suministradora del servicio eléctrico para mejorar la confiabilidad y calidad de este servicio.
- Antes del uso del control estadístico de procesos, la eficiencia del sistema de bombeo en operación continua llegaba a valores incluso menores al 70%, aun cuando las especificaciones de ingeniería determinan un valor mínimo de eficiencia del 73%. Con el uso de cartas de control y diagrama causa-efecto, se

determinó que esta caída de la eficiencia ocurre cuando el bombeo principal capta agua desde el tanque del sistema emergente, debido a que en este tanque se acumulan residuos que provocan el taponamiento acelerado de los filtros de las bombas principales. Como acción de mejora se instaló una canastilla con malla en el ingreso de agua al tanque emergente, reduciendo los niveles de residuos. Esto provocó que los niveles de eficiencia se encuentren por arriba del 72%.

- El estudio de capacidad demuestra que luego de las acciones de mejora la planta llega a un nivel sigma entre 3 y 4. Es un nivel bastante aceptable, pero se puede mejorar más.
- En el análisis económico se consideraron varios escenarios en función de la demanda de agua requerida. Se demostró que el uso de variadores de velocidad permite ahorros entre el 57 y 69%, lo que en cifras financieras equivale a ahorros entre 1,05 y 2,11 millones de dólares por año de operación. También se demostró que el uso del CEP permite lograr ahorros adicionales entre el 2,4 y 5,3%, lo que en cifras financieras equivale a ahorros entre 73 mil y 127 mil dólares por año de operación.

## RECOMENDACIONES

- La canastilla con malla colocada en el tanque del sistema emergente mejoró la eficiencia del sistema; sin embargo se puede mejorar más. Se recomienda analizar la factibilidad de instalar un sistema de filtración directamente en la succión de las bombas emergentes y su impacto en la eficiencia energética.
- Otro punto que debe ser investigado con más detalle es la variabilidad del propio sistema de control de la estación de bombeo. Autores citados en este trabajo han demostrado que una adecuada estrategia de control, así como una correcta sintonización de los lazos de control de una planta, pueden mejorar la eficiencia energética. Se pueden utilizar las herramientas del control estadístico de procesos para estudiar y monitorear el desempeño de los controladores automáticos utilizados en esta planta.
- Si alguna de las investigaciones anteriores es factible, y se ejecuta su implementación, se recomienda volver a realizar un estudio de capacidad para determinar el nuevo nivel sigma de la planta.
- Se recomienda realizar investigaciones sobre la integración del control estadístico de procesos (CEP) con los sistemas de control automático de procesos (CAP). Algunos autores citados en este trabajo han trabajado incluso en la realización de algoritmos de integración de estas dos tecnologías para la mejora de la calidad en plantas industriales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ ABB. (2011). *Technical Guide No 4. Guide to variable speed drivers*. Recuperado de [https://library.e.abb.com/public/d3c711ec2acddb18c125788f002cf5da/ABB\\_Technical\\_guide\\_No\\_4\\_REVC.pdf](https://library.e.abb.com/public/d3c711ec2acddb18c125788f002cf5da/ABB_Technical_guide_No_4_REVC.pdf)
- ✓ Agencia Internacional de Energía. (2016). *Key Electricity Trends. Excerpt from: Electricity Information*. Recuperado de: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyElectricityTrends.pdf>
- ✓ Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). (2011). *“Lean, Energy & Climate Toolkit. Achieving Process Excellence Through Energy Efficiency and Greenhouse Gas Reduction”*. Estados Unidos de América. Recuperado de: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-10/documents/lean-energy-climate-toolkit.pdf>
- ✓ Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2015). *Balance Multianual de Energía 2006-2015*. Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/balance-multianual-de-energia/>
- ✓ Andrade, R. y Macas, W. (2010). *Diseño y construcción de un módulo didáctico para medir y controlar caudal y nivel* (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1885>
- ✓ Astrom, J. y Hagglund, T. (2009). *Control PID avanzado*. Primera Edición, Madrid: Pearson Educación S.A.
- ✓ Barnes, M. (2003). *Variable Speed Drives and Power Electronics*. Primera Edición, Oxford: Newnes.
- ✓ Bonavita, N. y ABB. (2013). Can process automation increase energy efficiency?. *Hydrocarbon Processing*. 92(6), 71-75.

- ✓ Capehart, B. L., Turner, W. C., y Kennedy, W. J. (2012). *Guide to Energy Management*. Séptima Edición. Estados Unidos de América: The Fairmont Press, Inc., y Tylor & Francis Group.
- ✓ Chapman, S. (2012). *Máquinas Eléctricas*. Quinta Edición. México: Mc Graw Hill.
- ✓ Departamento de Energía de los Estados Unidos de América (2016). *Improving Pumping Systems Performance. A Source for Industry*. Segunda Edición. Washington, DC. Recuperado de:  
<https://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/pump.pdf>
- ✓ Directiva de Prevención y Control Integrados de la Contaminación de la Unión Europea (IPPC). (2009). *“Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency”*. Unión Europea. Recuperado de:  
[http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ENE\\_Adopted\\_02-2009.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ENE_Adopted_02-2009.pdf)
- ✓ Gomes, F. J., Queiroz, F. P., Lopes, I. F. y Coelho, A. A. R. (2012). Energy Savings in Industrial Processes: A Case Study of Strategies and Tuning Procedures for PI and PID Controllers. *International Federation of Automatic Control Conference on Advances in PID Control*. Brescia, Italia. Recuperado de:  
[https://www.researchgate.net/publication/302483244\\_Energy\\_Savings\\_in\\_Industrial\\_Processes\\_A\\_Case\\_Study\\_of\\_Strategies\\_and\\_Tuning\\_Procedures\\_for\\_PI\\_and\\_PID\\_Controllers](https://www.researchgate.net/publication/302483244_Energy_Savings_in_Industrial_Processes_A_Case_Study_of_Strategies_and_Tuning_Procedures_for_PI_and_PID_Controllers)
- ✓ Gutiérrez Pulido, H. y De la Vara, R. (2013). *Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma*. Tercera Edición. México: Mc Graw Hill.
- ✓ Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2010). *Metodología de la Investigación*. Quina Edición. México: Mc Graw Hill.
- ✓ Juran, J. M. y De Feo, J. A. (2010). *Juran’s Quality Handbook: The Complete Guide to Performance Excellence*. Sexta Edición. New York: McGraw-Hil.

- ✓ Karassik, I., Messina, J., Cooper, P. y Heald, C. (2008). *Pump Handbook*. Cuarta Edición. Estado Unidos de América: Mc Graw Hill.
- ✓ Love, J. (2007). *Process Automation Handbook. A Guide to Theory and Practice*. Primera Edición. Reino Unido: Springer.
- ✓ Montgomery, D. (2013). *Introduction to Statistical Quality Control*. Séptima Edición. Estados Unidos de América: John Wile & Sons, Inc.
- ✓ Oakland, J. (2008). *Statistical Process Control*. Sexta Edición. Oxford, Reino Unido: Butterworth Heinemann.
- ✓ Oagata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Quinta Edición. Madrid: Pearson Educación, S.A.
- ✓ Rahim, A., Siddiqui, Y. y Elshafei, M. (2014). Integration of Multivariable Statistical Process Control and Engineering Process Control. *Proceeding of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Bali, Indonesia. Recuperado de <http://ieomsociety.org/ieom2014/pdfs/104.pdf>
- ✓ Relyea, D. B. (2011). *The Practical Application of the Process Capability Study. Evolving from Product Control to Process Control*. Primera Edición. New York: Tylor & Francis Group
- ✓ Rossiter, A. P. y Jones, B.P. (2015). *Energy Management and Efficiency for the Process Industries*. Primera Edición. New Jersey: John Wiley & Sons
- ✓ Schneider Electric (2015). Control Panel Technical Guide. How to select the appropriate motor control system for your pump. Recuperado de [http://www.schneider-electric.com/en/download/document/CPTG010\\_EN/](http://www.schneider-electric.com/en/download/document/CPTG010_EN/)
- ✓ Shewhart, W.A. (1931). Economic Control of Quality and Manufacturing Product. New York, Princeton: Van Nostrand Company Inc. Recuperado de: <https://ia801900.us.archive.org/27/items/in.ernet.dli.2015.46477/2015.46477.Economic-Control-Of-Quality-Of-Manufactured-Product.pdf>

- ✓ Refinería del Pacífico (2015). *“Filosofía de Operación y Control del acueducto La Esperanza – RDP”*. Manta.
  
- ✓ Refinería del Pacífico (2017). *“Manual de Operación del acueducto La Esperanza – RDP”*. Manta.
  
- ✓ Rockwell Automation (2015). *“PowerFlex 7000 Medium Voltage AC Drives. Troubleshooting Guide”*. Recuperado de:  
[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/tg/7000-tg002\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/tg/7000-tg002_-en-p.pdf)

## ANEXOS

**Anexo 1: Valores de constantes para desarrollo de cartas de control**

Observations in Sample, <i>n</i>	Chart for averages			Chart for standard deviations						Chart for ranges						
	Factors for control limits			Factors for central line		Factors for control limits				Factors for central line		Factors for control limits				
	<i>A</i>	<i>A</i> <sub>2</sub>	<i>A</i> <sub>3</sub>	<i>c</i> <sub>4</sub>	1/ <i>c</i> <sub>4</sub>	<i>B</i> <sub>3</sub>	<i>B</i> <sub>4</sub>	<i>B</i> <sub>5</sub>	<i>B</i> <sub>6</sub>	<i>d</i> <sub>2</sub>	1/ <i>d</i> <sub>2</sub>	<i>d</i> <sub>3</sub>	<i>D</i> <sub>1</sub>	<i>D</i> <sub>2</sub>	<i>D</i> <sub>3</sub>	<i>D</i> <sub>4</sub>
2	2.121	1.880	2.659	0.7979	1.2533	0	3.267	0	2.606	1.128	0.8865	0.853	0	3.686	0	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.8862	1.1284	0	2.568	0	2.276	1.693	0.5907	0.888	0	4.358	0	2.574
4	1.500	0.729	1.628	0.9213	1.0854	0	2.266	0	2.088	2.059	0.4857	0.880	0	4.698	0	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.9400	1.0638	0	2.089	0	1.964	2.326	0.4299	0.864	0	4.918	0	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.9515	1.0510	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.3946	0.848	0	5.078	0	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.9594	1.0423	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.3698	0.833	0.204	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.9650	1.0363	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.3512	0.820	0.388	5.306	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.9693	1.0317	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.3367	0.808	0.547	5.393	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.9727	1.0281	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.3249	0.797	0.687	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.9754	1.0252	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.3152	0.787	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.9776	1.0229	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.3069	0.778	0.922	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.9794	1.0210	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.2998	0.770	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.9810	1.0194	0.406	1.594	0.399	1.563	3.407	0.2935	0.763	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.9823	1.0180	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.2880	0.756	1.203	5.741	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.9835	1.0168	0.448	1.552	0.440	1.526	3.532	0.2831	0.750	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.9845	1.0157	0.466	1.534	0.458	1.511	3.588	0.2787	0.744	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.9854	1.0148	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.2747	0.739	1.424	5.856	0.391	1.608
19	0.688	0.187	0.698	0.9862	1.0140	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.2711	0.734	1.487	5.891	0.403	1.597
20	0.671	0.180	0.680	0.9869	1.0133	0.510	1.490	0.504	1.470	3.735	0.2677	0.729	1.549	5.921	0.415	1.585
21	0.655	0.173	0.663	0.9876	1.0126	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.2647	0.724	1.605	5.951	0.425	1.575
22	0.640	0.167	0.647	0.9882	1.0119	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.2618	0.720	1.659	5.979	0.434	1.566
23	0.626	0.162	0.633	0.9887	1.0114	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.2592	0.716	1.710	6.006	0.443	1.557
24	0.612	0.157	0.619	0.9892	1.0109	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.2567	0.712	1.759	6.031	0.451	1.548
25	0.600	0.153	0.606	0.9896	1.0105	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.2544	0.708	1.806	6.056	0.459	1.541

\*The above table is a copy of Table 27 in *ASTM Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis*. (1976). ASTM Publication STP15D, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 134–135. Used with permission.

## Anexo 2: Cartas tradicionales de control (univariable)

CARTA	PROPÓSITO	USO	TAMAÑO DE SUBGRUPO, n	CONSIDERACIONES ADICIONALES	ECUACIONES
De medias ( $\bar{X}$ )	Analiza las medias de subgrupos como una forma de detectar cambios en el promedio del proceso. Aunque la carta está inspirada en la distribución normal, funciona bien para otras funciones.	Procesos masivos (de mediano a alto volumen), donde en un corto tiempo se producen varios artículos y/o mediciones.	$n > 3$ A medida que $n$ crece la carta detecta incluso pequeños cambios en el proceso. Por ello, generalmente un tamaño de $n$ menor que 10 es suficiente para detectar cambios moderados y grandes, que son los de mayor interés en la práctica.	Los límites de control indican dónde se espera que varíen las medias de los subgrupos, por lo que no indican dónde varían las mediciones individuales, y no tienen nada que ver con las especificaciones.	$LCS = \bar{\bar{X}} + A_2\bar{R}$ $LC = \bar{\bar{X}}$ $LCI = \bar{\bar{X}} - A_2\bar{R}$
Rangos ( $R$ )	Analiza los rangos de los subgrupos como una estrategia para detectar cambios en la amplitud de la variación del proceso. La falta de normalidad afecta un poco a la carta.	Se usa conjuntamente con la carta $\bar{X}$ cuando $n < 11$ . Por lo tanto, se aplica al mismo tipo de proceso que tal carta.	$3 < n < 11$ A medida que $n$ crece es capaz de detectar cambios más pequeños en la amplitud de la dispersión del proceso.	Es importante utilizarla junto con una carta $\bar{X}$ . De los criterios para cambios de nivel, sólo utilizar el de puntos fuera de los límites.	$LCS = D_4\bar{R}$ $LC = \bar{R}$ $LCI = D_3\bar{R}$
Desviación estándar ( $S$ )	Analiza la desviación estándar que se calcula a cada subgrupo, como una estrategia para detectar cambios en la amplitud de la variación del proceso. La falta de normalidad afecta un poco a la carta.	Se usa conjuntamente con la carta $\bar{X}$ cuando $n > 10$ . Por lo tanto, se aplica al mismo tipo de proceso que tal carta.	$n > 10$ Dado el tamaño de subgrupo recomendado. Usarla sólo cuando se quieran detectar incluso pequeños cambios en la dispersión del proceso y se esté dispuesto a atender estos cambios.	Tanto la carta $\bar{X}$ como ésta, tienen una mayor sensibilidad cuando $n$ crece, usarlas cuando se quiere y se esté dispuesto a tener un control estricto sobre el proceso. De los criterios para cambios de nivel, sólo utilizar el de puntos fuera de los límites.	$LCS = \bar{S} + 3\frac{\bar{S}}{c_4}\sqrt{1-c}$ $LC = \bar{S}$ $LCI = \bar{S} - 3\frac{\bar{S}}{c_4}\sqrt{1-c}$
Individuales ( $X$ )	Analiza cada medición individual del proceso y detecta cambios grandes tanto en la media como en la amplitud de la dispersión. Si la distribución no es normal, la carta puede resultar un poco afectada.	Procesos de bajo volumen, donde se requiere un tiempo considerable (de una a más horas) para obtener un resultado o medición. También cuando mediciones cercanas en el tiempo sólo difieren por error de medición.	Por propósito $n = 1$	Si en estos procesos es importante detectar cambios más pequeños y medianos, se recomienda utilizar otra carta más sensible (la EWMA o CUSUM)	$LCS = \bar{X} + \frac{\bar{R}}{d_2}$ $LC = \bar{X}$ $LCI = \bar{X} - \frac{\bar{R}}{d_2}$

*Nota:* Nomenclaturas: LCS = Límite de control superior, LCI = Límite de control inferior, LC = Línea central,  $n$  = tamaño de la muestra,  $\bar{X}$  promedio de las mediciones,  $\bar{\bar{X}}$  promedio de los promedios,  $R$  rango,  $\bar{R}$  promedio de los rangos,  $S$  desviación estándar,  $\bar{S}$  promedio de las desviaciones estándar. Para los valores de las constantes  $A_2$ ,  $c_4$ ,  $d_2$ ,  $D_3$  y  $D_4$  ver anexo 1. Adaptado de "Elementos para la selección de una carta de control para variables" por H. Gutiérrez y R. de la Vara, 2013, *Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma*, p. 241, Derechos Reservados 2013 por McGraw-Hill.

### Anexo 3: Cartas de control para detección de cambios pequeños (univariable)

CARTA	ECUACIONES	NOTAS ESPECÍFICAS
CUSUM tabular	$C_i^+ = \max[0, x_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+]$ $C_i^- = \max[0, (\mu_0 + K) - x_i + C_{i-1}^-]$ $LCS = H$ $LCI = -H$ $ARL = \frac{\exp(-2\Delta b) + 2\Delta b - 1}{2\Delta^2}$ <p>Si <math>\Delta \neq 0</math> entonces <math>\Delta = \delta^* - k</math> para <math>C_i^+</math>,  <math>\Delta = -\delta^* - k</math> para <math>C_i^-</math> y <math>b = \frac{H}{\sigma}</math> 1.166                      Si <math>\Delta = 0</math> entonces <math>ARL = b^2</math></p>	<p>La carta CUSUM tabular trabaja acumulando las derivaciones de <math>\mu_0</math> que están por encima del objetivo con el estadístico <math>C^+</math>, y acumulando las derivaciones de <math>\mu_0</math> que están por debajo del objetivo con el estadístico <math>C^-</math>. Los estadísticos <math>C^+</math> y <math>C^-</math> son llamados CUSUMs unilaterales superior e inferior respectivamente.</p> <p><math>x_i</math> es el valor de la muestra <math>i</math>  <math>i</math> es el número de muestra.</p> <p><math>K</math> es el valor de referencia (tolerancia u holgura), y se selecciona en un valor intermedio entre el objetivo <math>\mu_0</math> y el valor fuera de control de la media <math>\mu_1</math> del cual existe interés en detectar rápidamente.</p> <p><math>H</math> es el intervalo de decisión.</p> <p><math>ARL</math> es la longitud media de la corrida. Sirve para evaluar las decisiones sobre el tamaño de la muestra y la frecuencia de muestreo y es una medida del desempeño de la carta</p> <p><math>\delta^*</math> representa el desplazamiento de la media, en las unidades de <math>\sigma</math>, con el cual se calcula el ARL.</p>
CUSUM de dos lados (estandarizada)	$C_i^+ = \max[0, y_i - k + C_{i-1}^+]$ $C_i^- = \max[0, -k - y_i + C_{i-1}^-]$	<p>Muchos usuarios prefieren estandarizar la variable <math>x_i</math> antes de desarrollar el cálculo. Teniendo que <math>y_i = (x_i - \mu_0)/\sigma</math></p>
EWMA	$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)z_{i-1}, \quad z_0 = \mu_0$ $LCS = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2 - \lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]}$ $LC = \mu_0$ $LCI = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2 - \lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]}$	<p><math>L</math> es el factor múltiplo de sigma, y determina el ancho entre los límites de control. Normalmente se considera un valor de 3.</p> <p><math>\lambda</math> puede tomar un valor entre 0 y 1, y determina la profundidad de la memoria de la EWMA: mientras más cerca este de cero es mayor el peso de los datos históricos, es decir, recuerda más el pasado. Mientras que si está más cerca de uno, tiene más influencia la última media observada y el pasado tiene menos peso. De tal forma que cuando <math>\lambda = 1</math> sería equivalente a una carta tradicional, que no da ningún peso a la información anterior a un punto dado.</p> <p><math>i</math> es el número de muestras.</p> <p>Cuando se desea aplicar la carta EWMA a subgrupos, se cambia <math>x_i</math> por <math>\bar{x}_i</math> y <math>\sigma</math> con <math>\sigma_{\bar{x}} = \sigma/\sqrt{n}</math></p>

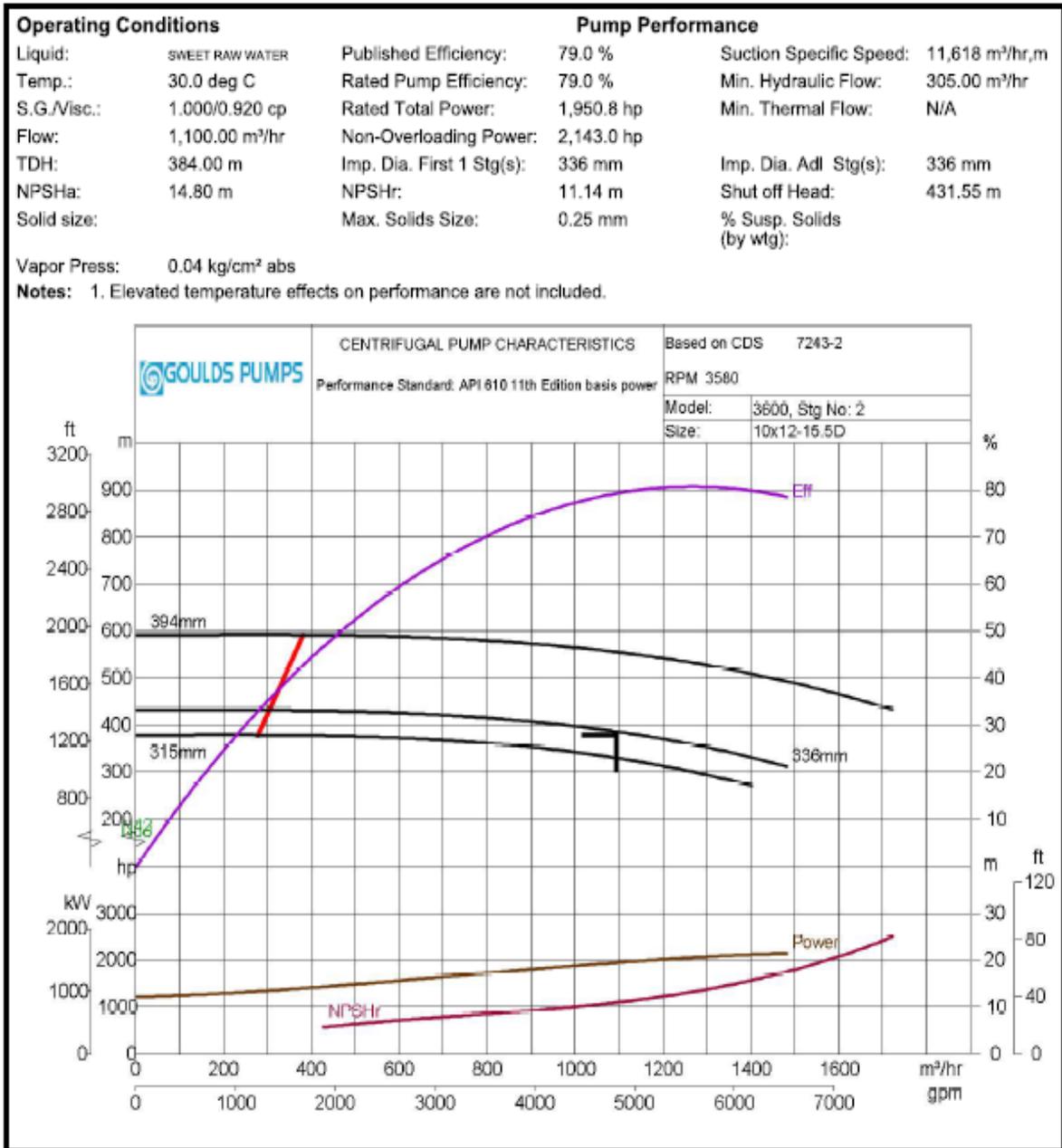
Nota: Nomenclaturas: LCS = Límite de control superior, LCI = Límite de control inferior, LC = Línea central,  $\mu$  = media del proceso,  $\sigma$  = desviación estándar del proceso. Adaptado de "Cumulative Sum and Exponentially Weighted Moving Average Control Charts" por D. Montgomery, 2013, *Introduction to Statistical Quality Control*, p.413 -442, Derechos Reservados 2013 por John Wiley & Sons, Inc.

#### Anexo 4: Cartas de control multivariable

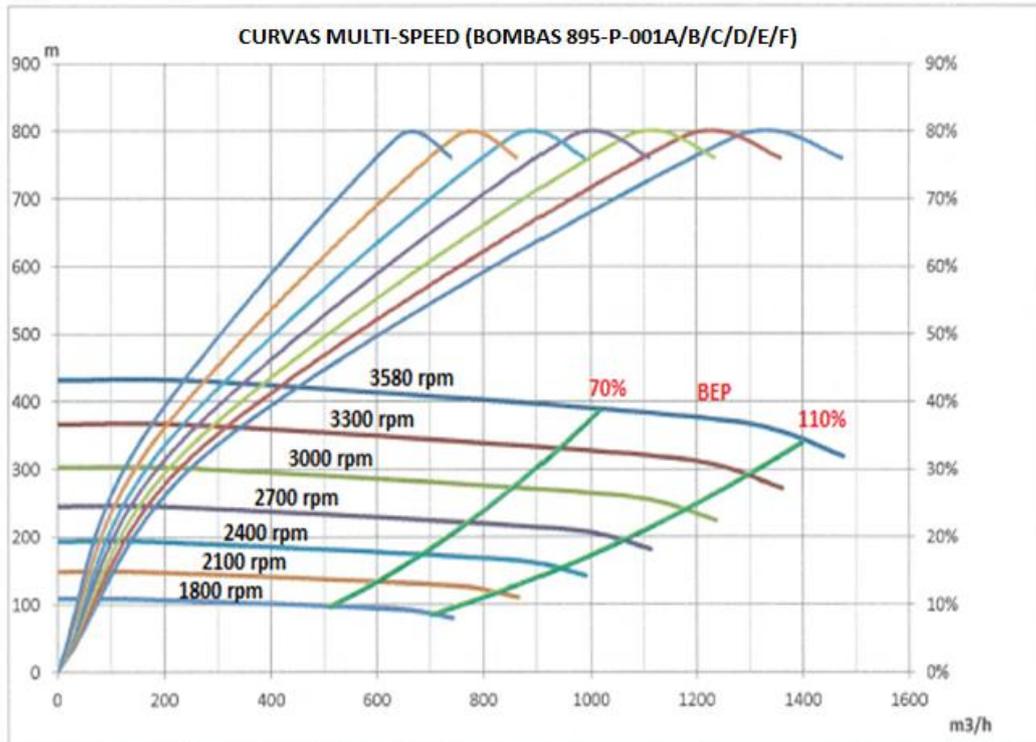
CARTA	ECUACIONES	NOTAS ESPECÍFICAS
The Hotelling $T^2$ (subgrupos)	$T^2 = n(\bar{x} - \bar{\bar{x}})'S^{-1}(\bar{x} - \bar{\bar{x}})$ $LCS = \chi_{\alpha,p}^2$ $LCI = 0$	$\bar{x}$ es el vector de medias muestrales, $\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_p]$ $\bar{\bar{x}}$ es el vector de medias de las medias muestrales, $\bar{\bar{x}} = [\bar{\bar{x}}_1, \bar{\bar{x}}_2, \bar{\bar{x}}_3, \dots, \bar{\bar{x}}_p]$ $S^{-1}$ es el inverso de la matriz de promedios de covarianzas muestrales $(\bar{x} - \bar{\bar{x}})'$ es la transposición de un vector en fila a un vector en columna de $(\bar{x} - \bar{\bar{x}})$ $n$ es el número de muestras por cada medición.
The Hotelling $T^2$ (individuales)	$T^2 = (x - \bar{x})'S^{-1}(x - \bar{x})$ $LCS = \chi_{\alpha,p}^2$ $LCI = 0$	$x$ es el vector de características de calidad, $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_p]$ $\bar{x}$ es el vector de medias, $\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_p]$ $S^{-1}$ es el inverso de la matriz de promedios de covarianzas muestrales $(x - \bar{x})'$ es la transposición de un vector en fila a un vector en columna de $(x - \bar{x})$
MEWMA	$Z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)Z_{i-1}, Z_0 = \mu_0$ $LCS = H$ $LCI = 0$	$\lambda$ puede tomar un valor entre 0 y 1, y determina la profundidad de la memoria de la MEWMA $H$ es el intervalo de decisión. $ARL$ es la longitud media de la corrida. Sirve para evaluar las decisiones sobre el tamaño de la muestra y la frecuencia de muestreo y es una medida del desempeño de la carta

Nota: Nomenclaturas: LCS = Límite de control superior, LCI = Límite de control inferior. Adaptado de "Multivariate Process Monitoring and Control" por D. Montgomery, 2013, *Introduction to Statistical Quality Control*, p.509 -528, Derechos Reservados 2013 por John Wiley & Sons, Inc.

## Anexo 5: Curva característica de las bombas principales



## Anexo 6: Curvas multi-velocidades de las bombas principales



	Speed (rpm)	BEP Flow (m <sup>3</sup> /h)	BEP Head (m)	BEP Power	BEP Efficiency %	Runout Power	Shut Off Head (m)	Min. Hydraulic Flow (m <sup>3</sup> /h)
A	3580	1,270	371.0	1950.8	79%	2143	431.6	305.0
B	3300	1,171	315.2	1527.9	79%	1678	366.7	281.2
C	3000	1,064	260.5	1148.0	79%	1261	303.1	255.6
D	2700	958	211.0	836.9	79%	919	245.5	230.0
E	2400	851	166.7	587.8	79%	646	194.0	204.5
F	2100	745	127.7	393.8	79%	433	148.5	178.9
G	1800	639	93.8	248.0	79%	272	109.1	153.4

## Anexo 7: Curvas de desempeño de los motores.



## Anexo 8: Ahorros económicos por uso de variadores de velocidad.

Captación de agua	Escenario	Requerimientos de agua					Sin variador de velocidad (vdv)						Con variador de velocidad (vdv)						Ahorro por uso de vdv				
		Flujo RDP (m3/h)	Flujo Manta (m3/h)	Flujo Montecristi (m3/h)	Flujo Jaramijó (m3/h)	Flujo Total (m3/h)	# de trenes de bombeo	R.P.M. c/tren	Flujo c/tren (m3/h)	Flujo total (m3/h)	Potencia c/tren (kW)	Potencia total (kW)	# de trenes de bombeo	R.P.M. c/tren	Flujo c/tren (m3/h)	Flujo total (m3/h)	Potencia c/tren (kW)	Potencia total (kW)	Ahorro de potencia (kW)	%	Ahorro de energía por año (kWh)	Tarifa de energía (USD/kWh)	Ahorro por año (USD)
Desague de fondo	1	1.000	1.250	0	0	2.250	2	3.600	1.300	2.600	1.670	3.340	2	3.020	1.125	2.250	970	1.940	1.400	58,1%	12.264.000	0,085	1.042.440
	2	1.000	1.250	450	0	2.700	3	3.600	1.300	3.900	1.670	5.010	3	3.010	1.060	3.180	960	2.880	2.130	57,5%	18.658.800	0,085	1.585.998
	3	1.000	1.250	450	300	3.000	3	3.600	1.300	3.900	1.670	5.010	3	3.010	1.060	3.180	960	2.880	2.130	57,5%	18.658.800	0,085	1.585.998
	4	2.000	1.250	450	300	4.000	4	3.600	1.300	5.200	1.670	6.680	4	3.090	1.004	4.015	963	3.850	2.830	57,6%	24.790.800	0,085	2.107.218
	5	3.000	1.250	450	300	5.000	4	3.600	1.300	5.200	1.670	6.680	5	3.340	1.002	5.010	865	4.326	2.354	64,8%	20.621.040	0,085	1.752.788
	6	4.000	1.250	450	300	6.000	5	3.600	1.300	6.500	1.670	8.350	5	3.540	1.201	6.005	1.146	5.730	2.620	68,6%	22.951.200	0,085	1.950.852

## Anexo 9: Ahorros económicos por uso del control estadístico de procesos (CEP)

Captación de agua	Escenario	Requerimientos de agua					Con variador de velocidad (vdv)													Ahorro por uso de CEP				
							Sin CEP						Con CEP (acción de mejora: canastilla y malla en tanque emergente)											
		Flujo RDP (m3/h)	Flujo Manta (m3/h)	Flujo Montecristi (m3/h)	Flujo Jaramijó (m3/h)	Flujo Total (m3/h)	# de trenes de bombeo	R.P.M. c/tren	Flujo c/tren (m3/h)	Flujo total (m3/h)	Potencia c/tren (kW)	Potencia total (kW)	# de trenes de bombeo	R.P.M. c/tren	Flujo c/tren (m3/h)	Flujo total (m3/h)	Potencia c/tren (kW)	Potencia total (kW)	Ahorro de potencia (kW)	%	Ahorro de energía por año (kWh)	Tarifa de energía (USD/kWh)	Ahorro por año (USD)	
Sistema emergente	1	1.000	1.250	0	0	2.250	2	3.015	1.128	2.255	921	1.842	2	3.012	1.131	2.262	873	1.745	97	5,3%	849.720	0,085	72.226	
	2	1.000	1.250	450	0	2.700	3	3.012	1.012	3.037	961	2.883	3	3.013	1.003	3.010	927	2.782	101	3,5%	884.760	0,085	75.205	
	3	1.000	1.250	450	300	3.000	3	3.012	1.012	3.037	961	2.883	3	3.013	1.003	3.010	927	2.782	101	3,5%	884.760	0,085	75.205	
	4	2.000	1.250	450	300	4.000	4	3.098	1.011	4.045	778	3.110	4	3.100	1.005	4.020	748	2.990	120	3,9%	1.051.200	0,085	89.352	
	5	3.000	1.250	450	300	5.000	4	3.343	1.253	5.010	1.025	4.098	4	3.338	1.251	5.005	983	3.932	166	4,1%	1.454.160	0,085	123.604	
	6	4.000	1.250	450	300	6.000	5	3.467	1.201	6.003	1.435	7.175	5	3.440	1.200	6.002	1.401	7.005	170	2,4%	1.489.200	0,085	126.582	