



# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Industrial

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL EFICIENTE PARA INCREMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS DE PULPA EN MINERA GOLD FIELDS S.A.”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Industrial

Autor:

Bach. Franklin Antonino Mendoza Abanto

Asesor:

Ing. Luis Roberto Quispe Vásquez

Cajamarca - Perú

2018

## TABLA DE CONTENIDOS

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS .....	II
ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS .....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
TABLA DE CONTENIDOS .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
RESUMEN .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	15
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.3 OBJETIVOS .....	18
1.3.1 <i>Objetivo general</i> .....	18
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	18
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	18
1.5 LIMITACIONES.....	19
1.6 HIPÓTESIS .....	19
1.6.1 <i>Hipótesis general</i> .....	19
1.7 MARCO TEÓRICO .....	20
1.7.1 <i>Antecedentes Internacionales</i> .....	20
1.7.2 <i>Antecedentes Nacionales</i> .....	22
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA .....</b>	<b>23</b>
2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	23
2.2 POBLACIÓN Y MUESTRA .....	23
2.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS .....	23
2.3.1 <i>Entrevista</i> .....	23
2.3.2 <i>Observación directa</i> .....	24
2.3.3 <i>Análisis documental</i> .....	25
2.4 PROCEDIMIENTO .....	25

2.5	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	26
-----	---------------------------------------	----

**CAPÍTULO III. RESULTADOS .....** **27**

3.1	DESCRIPCIÓN BREVE DE LA EMPRESA.....	27
3.1.1	<i>Misión</i> .....	27
3.1.2	<i>Visión</i> .....	27
3.1.3	<i>Valores</i> .....	28
3.1.3.1	Seguridad .....	28
3.1.3.2	Cumplimiento.....	28
3.1.3.3	Responsabilidad .....	28
3.1.3.4	Integridad .....	28
3.1.3.5	Respeto .....	28
3.1.3.6	Innovación.....	28
3.2	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL .....	28
3.2.1	<i>Funcionamiento del sistema de control</i> .....	28
3.2.2	<i>Incidencia de fallas en el sistema de control</i> .....	31
3.2.3	<i>Disponibilidad actual del sistema de control</i> .....	34
3.2.3.1	MTBF – Sistema de control.....	34
3.2.3.2	MTTR – Sistema de control .....	35
3.2.3.3	Disponibilidad - Sistema de control.....	35
3.2.4	<i>Disponibilidad actual del sistema de bombeo</i> .....	36
3.2.4.1	Fallas en el sistema de control y la disponibilidad del sistema de bombeo .....	37
3.3	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL EFICIENTE.....	38
3.3.1	<i>Instrumentos y accesorios requeridos</i> .....	39
3.3.2	<i>Plano eléctrico del sistema de control</i> .....	41
3.3.3	<i>Diagrama P&amp;ID del sistema de control</i> .....	42
3.3.4	<i>Diseño del tablero de control y sus componentes en Solid Works</i> .....	42
3.4	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA PROPUESTA DE MEJORA.....	44
3.4.1	<i>Disponibilidad de los sistemas de control post implementación de mejora</i> .....	45
3.5	TABLA RESUMEN CON INDICADORES ACTUALES Y DESPUÉS DE LA POSIBLE IMPLEMENTACIÓN DE LA MEJORA .....	46
3.6	EVALUACIÓN ECONÓMICA FINANCIERA DE LA PROPUESTA DE MEJORA .....	47
3.6.1	<i>Inversión inicial – Activos tangibles</i> .....	47
3.6.2	<i>Inversión inicial – Mano de obra</i> .....	49
3.6.3	<i>Costos proyectados</i> .....	51
3.6.4	<i>Impacto en la producción</i> .....	54
3.6.5	<i>Impacto en las ventas</i> .....	54
3.6.6	<i>Ingresos proyectados</i> .....	55
3.6.7	<i>Relación beneficio costo</i> .....	55

<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>57</b>
4.1 DISCUSIÓN .....	57
4.2 CONCLUSIONES .....	61
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO N° 1. DATOS PI SYSTEM - FALLAS EN LOS SISTEMAS DE CONTROL (MUESTRA).....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO N° 2. HORAS DE OPERACIÓN DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS AGOSTO 2017 – AGOSTO 2018.....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO N° 3. DATASHEET DEL TRANSMISOR DE FLUJO IFM SM8100 .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO N° 4. DATASHEET DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN IFM PN2294 .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO N° 5. MANUAL DE OPERACIÓN DE BOMBAS WARMAN 18*16 SRH .....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO N° 6. MANUAL DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EFICIENTE EN LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS DE PULPA EN MINERA GOLD FIELDS S.A.....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXO N° 7. PRODUCCIÓN Y VENTAS DE CONCENTRADO DESDE AGOSTO 2017 HASTA AGOSTO 2018 EN MINERA GOLD FIELDS S.A .....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXO N° 8. BASES TEÓRICAS.....</b>	<b>129</b>
8.1 BASES TEÓRICAS .....	129
8.1.1 <i>Instrumentación industrial</i> .....	129
8.1.1.1 Terminología básica en instrumentación .....	130
8.1.1.2 Clasificación de los instrumentos de medición .....	132
8.1.1.2.1 En función del instrumento .....	132
8.1.1.2.2 En función del tipo de señal de salida.....	134
8.1.2 <i>Sistemas de control</i> .....	137
8.1.2.1 Los sistemas de control en el tiempo .....	137
8.1.2.2 ¿Qué es un sistema de control? .....	138
8.1.2.3 Conceptos básicos de un sistema de control.....	139
8.1.2.4 Tipos de sistemas de control .....	140
8.1.2.4.1 Sistemas de control a lazo abierto.....	140
8.1.2.4.2 Sistemas de control a lazo cerrado o realimentado .....	141
8.1.2.4.3 Los sistemas de control y el mantenimiento predictivo .....	142
8.1.3 <i>Indicadores clase mundial</i> .....	143
8.1.3.1 Disponibilidad de equipos .....	143
8.1.3.2 MTBF - Tiempo Medio Entre Fallas .....	145
8.1.3.3 MTTF - Tiempo Medio Para la Falla .....	146
8.1.3.4 MTTR - Tiempo Medio Para Reparación.....	146
8.1.4 <i>Equipos de bombeo</i> .....	146

8.1.4.1	Clasificación de equipos de bombeo .....	147
8.1.5	<i>Bomba centrífuga</i> .....	147
8.1.5.1	Partes de una bomba centrífuga .....	148
8.1.5.2	Fenómenos adversos y fallas comunes en bombas centrífugas .....	149
8.1.5.2.1	Golpe de ariete .....	149
8.1.5.2.2	Cavitación .....	150
8.1.5.2.3	Falla en los rodamientos .....	152
8.1.5.2.4	Falla en el sello mecánico .....	152

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Operacionalización de variables</i> .....	26
Tabla 2 <i>Fallas del sistema de control en la bomba 330-PP-003</i> .....	32
Tabla 3 <i>Fallas del sistema de control en la bomba 330-PP-004</i> .....	33
Tabla 4 <i>Horas de operación del sistema de bombeo</i> .....	36
Tabla 5. <i>Instrumentos y accesorios necesarios para el proyecto</i> .....	39
Tabla 6. <i>Indicadores actuales y después de la posible implementación de la mejora</i> .....	46
Tabla 7. <i>Inversión inicial en activos tangibles</i> .....	47
Tabla 8. <i>Inversión inicial en mano de obra para la ejecución del proyecto</i> .....	49
Tabla 9. <i>Gasto anual en mano de obra para mantenimiento preventivo – post implementación del proyecto</i> .....	49
Tabla 10. <i>Gasto anual en insumos para mantenimiento preventivo – post implementación del proyecto</i> .....	50
Tabla 11. <i>Costos proyectados</i> .....	51
Tabla 12. <i>Producción de concentrado en Gold Fields agosto 2017 – 2018</i> .....	54
Tabla 13. <i>Ventas anuales de concentrado en Gold Fields S.A</i> .....	54
Tabla 14. <i>Ingresos proyectados en los próximos 5 años</i> .....	55
Tabla 15. <i>Flujo de ingresos y costos previstos post implementación del proyecto</i> .....	55
Tabla 16. <i>Relación beneficio-costos estimada</i> .....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rebalses suscitados en la planta de procesos Gold Fields S.A .....	16
Figura 2. La indisponibilidad de bombas y sus potenciales causas .....	17
Figura 36. Diagrama P&ID del sistema de control .....	29
Figura 37. Representación SCADA de las bombas centrífugas de pulpa .....	29
Figura 38. Switch de flujo de dispersión térmica.....	30
Figura 39. Switch de presión Ashcroft .....	30
Figura 40. Sistema de refrigeración por inyección de agua hacia el sello mecánico .....	31
Figura 41. Disponibilidad actual del sistema de control y las bombas centrífugas.....	34
Figura 42. Fallas en el sistema de control y la disponibilidad del sistema de bombeo .....	38
Figura 43. Secuencia del diseño de la propuesta de mejora .....	39
Figura 44. Plano eléctrico del sistema de control propuesto .....	41
Figura 45. Diagrama P&ID del sistema de control .....	42
Figura 46. Diseño 3D del gabinete eléctrico .....	43
Figura 47. Datos técnicos del flujómetro IFM SM8100 propuesto .....	44
Figura 48. Datos técnicos del transmisor de presión PN2294 propuesto .....	44
Figura 3. Instrumentos industriales .....	129
Figura 4. Manómetro con rango de 0 – 70 PSI.....	130
Figura 5. Comparación entre exactitud y precisión .....	131
Figura 6. Histéresis y su curva característica .....	131
Figura 7. Instrumentos ciegos usados en minera Gold Fields .....	132
Figura 8. Instrumentos indicadores .....	133
Figura 9. Sensores para control de movimiento .....	133
Figura 10. Transmisor de presión diferencial marca Rosemount .....	134
Figura 11. Representación de una señal discreta.....	134
Figura 12. Curva característica de las señales análogas .....	135
Figura 13. Digitalización de una señal análoga .....	136
Figura 14. Modulación de frecuencia en protocolo Hart .....	137
Figura 15. Componentes básicos de un sistema de control .....	138
Figura 16. Elementos de un sistema de control a lazo abierto. ....	140
Figura 17. Ejemplo doméstico de un sistema de lazo abierto. ....	140
Figura 18. Sistema de control lazo cerrado .....	141
Figura 19. Regulación de temperatura en lazo cerrado.....	141
Figura 20. Control de temperatura en un reductor.....	142
Figura 21. Indicadores de clase mundial aplicados al mantenimiento.....	145
Figura 22. Clasificación de los equipos de bombeo según el instituto de hidráulica.....	147
Figura 23. Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga.....	148

Figura 24. Partes de una bomba centrífuga.....	148
Figura 25. Golpe de ariete.....	150
Figura 26. Erosión a consecuencia de la cavitación en un impulsor .....	150
Figura 27. Burbujas de aire reducen el área de paso del fluido. ....	151
Figura 28. Comparativa de una bomba con y sin cavitación. ....	151
Figura 29. Rodamientos dañados .....	152
Figura 30. Sello mecánico.....	153
Figura 31. Empaquetadura para bomba centrífuga .....	153
Figura 32. Estadística de fallas en bombas centrífugas .....	154
Figura 33. El agua es indispensable en bombas de pulpa .....	154
Figura 34. Despiece de una bomba centrífuga.....	155
Figura 35. Distribución interna del sello mecánico.....	155



## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar un sistema de control eficiente que fuese capaz de incrementar la disponibilidad de las bombas centrífugas de pulpa en minera Gold Fields. Para conseguir este propósito, se aplicó las herramientas básicas de la calidad, como son, los diagramas de Pareto e Ishikawa. Se recurrió a fuentes primarias de información como la entrevista y observación directa. Una de nuestras fuentes secundarias de información fue el registro histórico de eventos de las bombas 3 y 4 almacenado en el sistema de control distribuido (DCS). En el mencionado archivo, en el último año se encontró varias detenciones imprevistas de estos equipos. Con el uso de tablas dinámicas y haciendo un cruce de información con el registro de horas de operación de cada bomba, se pudo determinar el número de fallas y la duración de cada una de ellas. El estudio de este registro digital también permitió conocer las causas que originaron las detenciones.

Descomponer esta información permitió determinar una indisponibilidad de 1.5% en el sistema de control de las bombas. Este indicador impide que la disponibilidad del conjunto de bombas sea superior a 94.2%. Posterior al diseño del nuevo sistema de control, y gracias al uso de instrumentación de alta confiabilidad, se estimó que la disponibilidad del sistema de control sería del 100%; es decir, la nueva disponibilidad de las bombas sería de 95.7%.

Se determinó que incrementar en 1.5% la disponibilidad del sistema de control permite que la producción aumente en 82 onzas equivalentes de Oro al año, lo cual representa un ingreso adicional de más de USD 100,000.

Esta investigación termina concluyendo que por más mínimas e insignificantes que parezcan las fallas, debemos considerar analizarlas, ya que si sumamos el tiempo perdido en el largo plazo pueden representar pérdidas económicas considerables.

**Palabras clave:** Bombas centrífugas, sistemas de control, indicadores clase mundial, herramientas básicas la calidad.

## ABSTRACT

The objective of the present investigation was to design an efficient control system that would increase the availability of centrifugal pulp pumps in the Gold Fields mine. To achieve this purpose, the basic tools of quality were applied, such as the Pareto and Ishikawa diagrams. We used primary sources of information such as interview and direct observation. One of our secondary sources of information was the historical record of events of pumps 3 and 4 stored distributed control system (DCS). In the aforementioned file, in the last year several unforeseen arrests of this equipment were found. With the use of dynamic tables and crosschecking the information on the hours of operation of each pump, it was possible to determine the number of faults and the duration of each of them. The study of this digital registry also allowed to know the causes that originated the detentions.

Decomposing this information allowed determining a 1.5% unavailability in the pump control system. This indicator prevents the availability of the pump set is greater than 94.2%. After the design of the new control system, and thanks to the use of highly reliable instrumentation, it was estimated that the availability of the control system would be 100%; that is, the new availability of the pumps would be 95.7%.

It was determined that increasing the availability of the control system by 1.5% allows production to increase by 82 equivalent ounces of gold per year, which represents an additional income of more than USD 100,000.

This investigation concludes that no matter how minimal and insignificant the failures seem, we must consider analyzing them, since if we add up the time lost in the long term they can represent considerable economic losses.

**Keywords:** Centrifugal pumps, control systems, excellent indicators, basic quality tools.

## **NOTA DE ACCESO**

**No se puede acceder al texto completo pues contiene datos confidenciales**

## REFERENCIAS

- Augusto, T. L. (s. f.). *Administración Moderna de Mantenimiento*. Brasil: Novo Polo.
- Averías en bombas centrífugas. (2011, noviembre 17). Recuperado 7 de septiembre de 2018, de <https://areamecanica.wordpress.com/2011/11/17/averias-en-bombas-centrifugas/>
- Barrera, M. P., & Ramos, E. J. (2009). *Diseño de un sistema de control de presión en lazo abierto para una línea de bombeo en una estación de bombeo de crudo*. Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- Carnicer, R. E., & Mainar, H. C. (2004). *Bombas centrífugas*. Madrid: Thomson-Paraninfo.
- Carrillo, P. J. (2011). *Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos del Análisis y Modelado* (Segunda). Venezuela: UNERMB.
- Chávez, R. G. (2013). *La administración energética y la importancia de la instrumentación y control en los procesos productivos*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Collazos, A. M.-H. C.-C. O.-W. J.-J. L. (2011, agosto 9). Historia del Mantenimiento. Recuperado 3 de septiembre de 2018, de <http://automantenible3.blogspot.com/2011/08/historia-del-mantenimiento.html>
- Creus, S. A. (2011). *Instrumentación industrial*. México, D.F.; Barcelona: Alfaomega; Marcombo.
- De Prada, C., & Rodríguez, T. (s. f.). *Instrumentación para Control de Procesos*, 146.
- Eficiencia general de los equipos. (2018). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado de

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Eficiencia\\_general\\_de\\_los\\_equipos&oldid=108507151](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Eficiencia_general_de_los_equipos&oldid=108507151)

Flores, A. M. F. (2008, marzo 21). Bombas Hidráulicas: BOMBAS. Recuperado 5 de septiembre de 2018, de <http://bombas-hidro.blogspot.com/2008/03/bombas.html>

García, M. E. (2001). *Automatización de Procesos Industriales*. México D.F: Alfaomega.

Gland Seal Water Explained. (s. f.). Recuperado 7 de septiembre de 2018, de <http://www.oilsandsmagazine.com/technical/mining/slurry-pump-gland-seal-water>

Gómez de León, F. C. (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial*. Murcia, España: Universidad de Murcia.

Hernández, S. R., Fernández, C. C., & Baptista, L. P. (2014). *Metodología de la investigación*. Recuperado de <http://www.e-libro.com/ayuda>

Infotaller. (2015, diciembre 15). Daños típicos en la bomba de agua y sus causas. Recuperado 7 de septiembre de 2018, de [https://www.infotaller.tv/electromecanica/Danos-tipicos-bomba-agua-causas\\_0\\_953904604.html](https://www.infotaller.tv/electromecanica/Danos-tipicos-bomba-agua-causas_0_953904604.html)

Ingeniería Mecánica: El sellado de ejes en bombas centrífugas. (2011, septiembre 22). Recuperado 7 de septiembre de 2018, de <https://areamecanica.wordpress.com/2011/09/22/ingenieria-mecanica-el-sellado-de-ejes-en-bombas-centrifugas/>

Ingenieros2011. (2008, enero 26). MECANICA DE FLUIDOS: CAVITACION. Recuperado 6 de septiembre de 2018, de <http://ingenieros2011unefa.blogspot.com/2008/01/cavitacion.html>

Instrumentos & Automatas. (2018, enero 14). Recuperado 8 de septiembre de 2018, de <https://www.instrumentosyautomatas.com/conociendo-protocolo-hart/>

- Kuo, B. C. (1997). *Sistemas de control automático* (Séptima). Prentice Hall.
- Llanos, D. J., & Paredes, C. L. (2016). *Diseño para la optimización de un sistema de control, monitoreo y seguridad de la estación intermedia de transporte de combustible «Corazón»*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú.
- Mataix, C. (1997). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo.
- Mecafenix, F. (2017, junio 5). Conceptos básicos de la instrumentación industrial. Recuperado 8 de septiembre de 2018, de <http://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/instrumentacion-conceptos-basicos/>
- Metso, M. (2011). Conceptos básicos en bombas de pulpa.
- Miranda, R. G. M. (2015). *Optimización del proceso de mantenimiento eléctrico preventivo correctivo y su efecto en la disminución de paradas no programadas de la flota de camiones Caterpillar 793C en Minera Yanacocha SRL*. Universidad Privada del Norte, Cajamarca.
- Ogata, K. (2000). *Sistemas de Control En Tiempo Discreto* (Segunda). México D.F: Pearson.
- Ojeda, C. C. (2012). *Diseño de un sistema de automatización industrial para el sistema de bombeo de aguas ácidas*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Pacheco, C. J. (2010). *Medición y control de procesos industriales*. Place of publication not identified: Editorial Trillas Sa De C.
- Plácido, H. M., & Vargas, T. O. (2009). *Propuesta de un Sistema de Control para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas*. Instituto Politécnico Nacional, México D.F.

Rivera, M. J. (2007). *Instrumentación*. México, D.F.: Trillas.

Santiago, G. G. (2006). *Organización y gestión integral de mantenimiento: manual práctico para la implantación de sistemas de gestión avanzados de mantenimiento industrial*. Madrid: Díaz de Santos.

Sello mecánico. (2015). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sello\\_\(mec%C3%A1nica\)&oldid=82061954](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sello_(mec%C3%A1nica)&oldid=82061954)

Señal analógica. (2018). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Se%C3%B1al\\_anal%C3%B3gica&oldid=110454742](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Se%C3%B1al_anal%C3%B3gica&oldid=110454742)

Sistema de control. (2018). En *Wikipedia*. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sistema\\_de\\_control&oldid=110369972](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sistema_de_control&oldid=110369972)

Veloso, C. (2017, mayo 30). Señales analógicas y digitales. Recuperado 8 de septiembre de 2018, de <http://www.electrontools.com/Home/WP/2017/05/30/senales-analogicas-y-digitales/>

Villajulca, J. C. (2012). *Instrumentación, Control y Automatización Industrial*. Recuperado 8 de septiembre de 2018, de <https://instrumentacionycontrol.net/tipos-de-senales-cantidades-binarias-y-operaciones-digitales/>

Weir Minerals. (2006). *Manual de operación y mantenimiento bomba centrífuga horizontal 14x12 SRH*.

Wikipedia. (2018). Bomba centrífuga. En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado de



UNIVERSIDAD  
PRIVADA DEL NORTE

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL EFICIENTE PARA  
INCREMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE LAS BOMBAS  
CENTRÍFUGAS DE PULPA EN MINERA GOLD FIELDS S.A.

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Bomba\\_centric%C3%ADfuga&oldid=](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Bomba_centric%C3%ADfuga&oldid=)

106126757