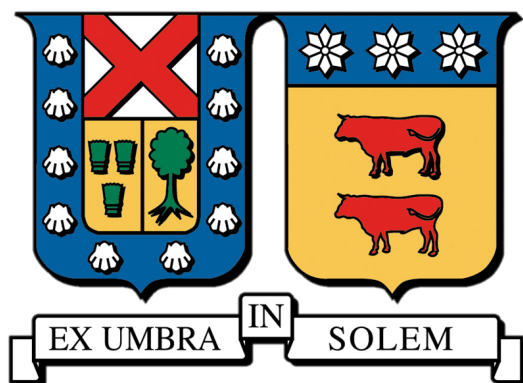


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES



Comparación de dos programas de control avanzado aplicados al
proceso de molienda SAG en la Compañía Minera Centinela.

FELIPE ANDRÉS MUÑOZ PÉREZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL METALÚRGICO

PROFESOR GUÍA: JESÚS CASAS DE PRADA

JULIO-2022

Resumen

El presente trabajo tiene por objetivo la comparación de dos aplicaciones de control avanzado basado en modelos del proceso de molienda semi-autógena. Para llevar a cabo tal comparación, se realizó una prueba piloto de 1 mes de duración, donde durante periodos de 8 horas cada aplicación ejerció control total sobre el proceso de molienda semi-autógena. Los resultados de la prueba piloto indican que ambas aplicaciones de control son capaces de controlar y estabilizar el proceso dentro de los límites impuestos por el operador. Se observan diferencias, tanto en las variables utilizadas por cada controlador como en el objetivo a optimizar. BrainWave busca optimizar la eficiencia energética, mientras que Profit optimiza la alimentación mineral fresca. De esta manera las principales diferencias recaen en la media de alimentación mineral fresca, donde la aplicación BrainWave procesa +27 t/h adicionales con una desviación estándar +11 t/h mayor respecto de los resultados obtenidos por la aplicación Profit. Asimismo, los pebbles generados utilizando BrainWave son -13t/h menores, pero con una mayor desviación estándar de +18,2 t/h, comparado con los resultados obtenidos con la aplicación Profit. Estos resultados evidencian que la aplicación BrainWave logra mayores valores de alimentación mineral fresca a expensas de una mayor variabilidad en el proceso, mientras la aplicación Profit busca mantener la estabilidad del proceso a expensas de una limitación en la alimentación mineral fresca.

Abstract

The objective of this work is to compare two advanced model-based control applications applied to the semi-autogenous grinding process, and to identify the main differences in terms of process control. In order to carry out such comparison, a pilot test of 1 month duration was carried out, where during periods of 8 hours each application exerts total control over the semi-autogenous grinding process. The results of the pilot test indicate that both control applications are capable of controlling and stabilizing the process within the limits imposed by the operator, on the other hand, differences are observed in the variables used by each controller and the objective to optimize, in this way BrainWave seeks to optimize the energy efficiency while Profit optimizes the fresh mineral feed. Thus, the main differences are in the average fresh mineral feed where the BrainWave application processes +27 t/h with a standard deviation of +11 t/h compared to the results obtained by the Profit application. While the control of pebbles generated is -13t/h with a standard deviation of +18.2 t/h compared to the results of the Profit application. These results show that the BrainWave application achieves greater results at the expense of greater variability in the process, while the Profit application seeks to maintain process stability at the expense of a limitation in the fresh mineral feed.

Agradecimientos

A todos aquellos que me ayudaron a terminar esto.

Tabla de Contenidos

1	Introducción	1
2	Antecedentes	6
2.1	Reducción de Tamaño	6
2.1.1	Principios de reducción de tamaño	6
2.1.2	Molienda Semi-Autógena (SAG)	8
2.2	Control de Procesos	9
2.2.1	Control Encendido-Apagado	10
2.2.2	Control Lineal	10
2.2.3	Aplicaciones de Control Avanzado	12
2.3	Control de procesos en molienda semi-autógena	14
2.3.1	Tipo de variables	15
3	Objetivos	17
3.1	Objetivo General	17
3.2	Objetivos Específicos	17
4	Metodología	18
4.1	Filtros:	18
4.2	Pruebas de normalidad	20
4.3	Detección de datos anómalos	21
5	Resultados y Discusión	22
5.1	Filtros:	22
5.2	Prueba de normalidad	23
5.3	Eliminación de datos anómalos	29
5.4	Análisis de variables manipuladas:	33
5.4.1	Velocidad de Giro Molino:	33
5.4.2	Porcentaje de sólidos:	37

5.4.3	Alimentación Fresca de Mineral:	39
5.5	Análisis de variables controladas:	41
5.5.1	Pebbles Generados:	43
5.5.2	Potencia Consumida Molino SAG:	43
5.5.3	Presión de Descansos:	46
5.5.4	Impactos Críticos:	49
5.5.5	Porcentaje de Torque:	52
5.6	Análisis de perturbaciones medidas:	53
5.6.1	Porcentaje de Gruesos (4”) en Alimentación:	54
5.6.2	Pebbles Recirculados:	56
5.7	Análisis Eficiencia Energética:	57
5.8	Análisis de tiempo efectivo de utilización:	58
6	Conclusiones	60
7	Recomendaciones	62

Lista de Tablas

1.1	Principales Características Chancado Primario	2
1.2	Principales Características Chancado Pebbles	3
1.3	Principales Características Chancador Secundario y Terciario	3
1.4	Principales Características Chancador Secundario y Terciario	3
2.1	Variables manipuladas del proceso de molienda SAG	15
2.2	Variables controladas del proceso de molienda SAG	16
2.3	Variables perturbación medida del proceso de molienda SAG	16
4.1	Filtros Temporales	19
4.2	Filtros Operacionales	19
5.1	Estadísticos de Generación de Pebbles para ambas aplicaciones	29
5.2	Estadísticos de Rendimiento SAG para ambas aplicaciones	39
5.3	Estadísticos Modo de Control aplicación Profit	41
5.4	Estadísticos de Rendimiento SAG para ambas aplicaciones	43
5.5	Estadísticos de Potencia Consumida para ambas aplicaciones	44
5.6	Estadísticos de Presión de Descansos ambas aplicaciones	47
5.7	Estadísticos de Porcentaje de Torque ambas aplicaciones	53
5.8	Estadísticos de Porcentaje de Gruesos ambas aplicaciones	55
5.9	Estadísticos de Pebbles Recirculados ambas aplicaciones	57

Lista de Figuras

1.1	Diagrama de flujos molienda SAG Minera Centinela	2
1.2	Serie de Tiempo para Alimentación Fresca SAG 2017 a 2019	4
1.3	Axb DWT	4
1.4	Contribución por fase y rendimiento MSAG	5
2.1	Modos de reducción de tamaño: a- compresión, b-fractura, c-abrasión, d-agrietamiento, e-corte, f-aplastante (adaptado de Drzymala and Swatek (2007))	7
2.2	Liberación de partículas A- regular, B- vena, C-marco, D-oclusión(adaptado de Drzymala and Swatek (2007))	8
2.3	Lazo de control para lazo cerrado (superior) y lazo abierto (inferior)	9
2.4	Esquema para control encendido/apagado	10
4.1	Gráfico de Probabilidad para una distribución empírica normal	20
5.1	Rendimiento MSAG durante Prueba Piloto	22
5.2	Secuencia de turnos sin filtros aplicados	23
5.3	Resultado luego de aplicar los filtros operacionales y temporales a la secuencia de turnos	23
5.4	Gráfico probabilidad para alimentación mineral fresca	24
5.5	Gráfico de probabilidad para variable porcentaje de sólidos	24
5.6	Gráfico de probabilidad para variable velocidad de giro	25
5.7	Gráfico de probabilidad para variable potencia consumida	25
5.8	Gráfico de probabilidad para variable presión de descansos	26
5.9	Gráfico de probabilidad para variable impactos críticos	26
5.10	Gráfico de probabilidad para variable flujo de pebbles generados	27
5.11	Gráfico de probabilidad para variable Porcentaje de gruesos	27
5.12	Gráfico de probabilidad para variable flujo de Pebbles Recirculados a MSAG	28
5.13	Gráfico de probabilidad para variable Porcentaje de gruesos	29

5.14	Serie de Tiempo para variables manipuladas con identificación de datos anómalos en rojo	30
5.15	Serie de Tiempo para variables controladas con identificación de datos anómalos en rojo	31
5.16	Serie de Tiempo para variables perturbación medida con identificación de datos anómalos en rojo	32
5.17	Serie de tiempo para variables manipuladas en PP	33
5.18	Velocidad de giro MSAG	34
5.19	Histograma comparativo velocidad de giro MSAG	34
5.20	Histograma comparativo velocidad de giro MSAG sobre HL	35
5.21	Histograma comparativo velocidad de giro MSAG	36
5.22	Histograma comparativo velocidad de giro dentro de rango MSAG	37
5.23	Porcentaje de solidos en MSAG	38
5.24	Histograma comparativo diferencia de límites porcentaje de solidos	38
5.25	Serie de tiempo para variable manipulada alimentación fresca a MSAG	39
5.26	Diferencia rendimiento instantáneo y HL	40
5.27	Variables controladas para periodo de PP	42
5.28	Serie de tiempo para variable controlada pebbles generados	43
5.29	Potencia Consumida por MSAG	44
5.30	Histograma comparativo potencia consumida MSAG	45
5.31	Histograma comparativo de potencia consumida sobre HL	46
5.32	Presión de descansos MSAG para periodo de PP	47
5.33	Histograma comparativo presión de descansos MSAG	48
5.34	Histograma comparativo presión de descansos MSAG sobre HL	49
5.35	Impactos críticos MSAG	50
5.36	Histograma comparativo impactos críticos	51
5.37	Histograma comparativo impactos críticos sobre HL	52
5.38	Serie de tiempo de variable porcentaje de torque	53
5.39	Serie de tiempo de variables perturbación en PP	54
5.40	Porcentaje de alimentación mayor a 4 pulgadas	54
5.41	Distribución de fracción mineral gruesa para ambas aplicaciones	55
5.42	Histograma comparativo pebbles recirculados	56
5.43	Gráfico de Rango de Potencia Consumida vs Alimentación Mineral Fresca y escala de colores Consumo especifico de energía para aplicación Profit	57
5.44	Gráfico de Rango de Potencia Consumida vs Alimentación Mineral Fresca y escala de colores Consumo especifico de energía para aplicación BrainWave	58

5.45	Gráfico de columnas comparativo cumplimiento de horas de control programadas . .	59
------	--	----

Nomenclatura

Símbolo	Significado, unidades
Axb	A cruz b, -
AG	Autógeno
DCS	Sistema de Control Distribuido(Distributed Control System)
DWT	DropWeight Test
FAG	Completamente Autógeno(Fully Autogenous)
FIR	Respuesta de Impulsos Finitos(Finite Impulse Response)
HL	Limite Alto
LL	Limite Bajo
M	Flujo Másico, t/h
MPC	Control Predictivo basado en modelos(Model Predictive Control)
$MISO$	Multiple Entrada y una Salida(Multiple Input Single Output)
$MSAG$	Molino Semi-Autógeno
OLS	Mínimos Cuadrados Ordinarios(Ordinary Least Squares)
P	Presión, Pa
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PLS	Mínimos Cuadrados Parciales(Partial Least Squares)
PP	Prueba Piloto
PV	Variable de Proceso
RCA	Algoritmo de Control por Rangos(Range Control Algorithm)
$RMPCT$	Tecnología Robusta de Control Predictivo Basado en Modelos (Roboust Model Predictive Control Technology)
rpm	Revoluciones por minuto
$SISO$	Una Entrada y una Salida(Single Input and Single Output)
SP	Punto de Seteo
TOE	Talón de Carga
v	Velocidad, rpm
W	Potencia, kW/h

Capítulo 1

Introducción

Minera Centinela, localizada en la comuna de Sierra Gorda, región de Antofagasta, Chile, a unos 1700 m.s.n.m.. Nace en 2014, a partir de la unión de las operaciones de Tesoro y Esperanza, aprovechando las condiciones geográficas, técnicas y logísticas que hacían posible una planificación y operación integradas.

De esta manera Minera Centinela cuenta con dos grandes líneas productivas, óxidos y sulfuros, a partir de las que produce cátodos y concentrado de cobre, más oro como subproducto principal, a través de cuatro rajos a cielo abierto

Los minerales sulfurados son procesados en la planta concentradora en un circuito que contempla etapas de chancado, molienda SAG, molienda de bolas, flotación rougher, flotación de limpieza, flotación de barrido y espesadores de concentrado y de colas.

La planta concentradora es alimentada en el chancado primario. Chancador de tipo giratorio con una capacidad de diseño de 8000 t/h el cual alimenta al acopio de mineral grueso stock pile. Stock Pile con capacidad de 72 000 t y 8 feeders alimentadores que transfieren el mineral por dos vías disgregadas, siendo la principal a molienda SAG y por la vía secundaria a planta de chancado secundario terciario.

La alimentación a la planta de chancado secundario es clasificada por un harnero, el sobre tamaño es alimentado a chancado secundario en circuito abierto. El chancado terciario es un circuito cerrado con dos chancadores MP1000 y dos harneros banana dobledeck, siendo el bajo tamaño alimentado a molienda de bolas junto con pebbles chancados. El circuito de chancado secundario y terciario tiene una capacidad de diseño de 1 000 t/h. Por la vía principal los feeders del stock pile, alimentan al molino SAG de 40 ft con una capacidad de diseño de 5 100 t/h, el producto del molino es clasificado por un harnero tipo banana siendo el sobre tamaño procesado en el circuito de chancado de pebbles por 3 chancadores de cono con capacidad de diseño total de 1290 t/h, los pebbles chancados son alimentados a molienda de bolas en conjunto con el producto de chancado secundario y terciario.

La molienda secundaria, de capacidad de diseño 10 054 t/h se encuentra en circuito cerrado con cuatro bancos de hidrociclones de capacidad de diseño 6 980 t/h, con un tamaño de partícula overflow de 210 mm, el cual es enviado a flotación Rougher. Los procesos aquí descritos se presentan en la Figura 1.1. A continuación, se presentan los principales equipos del área de conminucion y sus principales características.

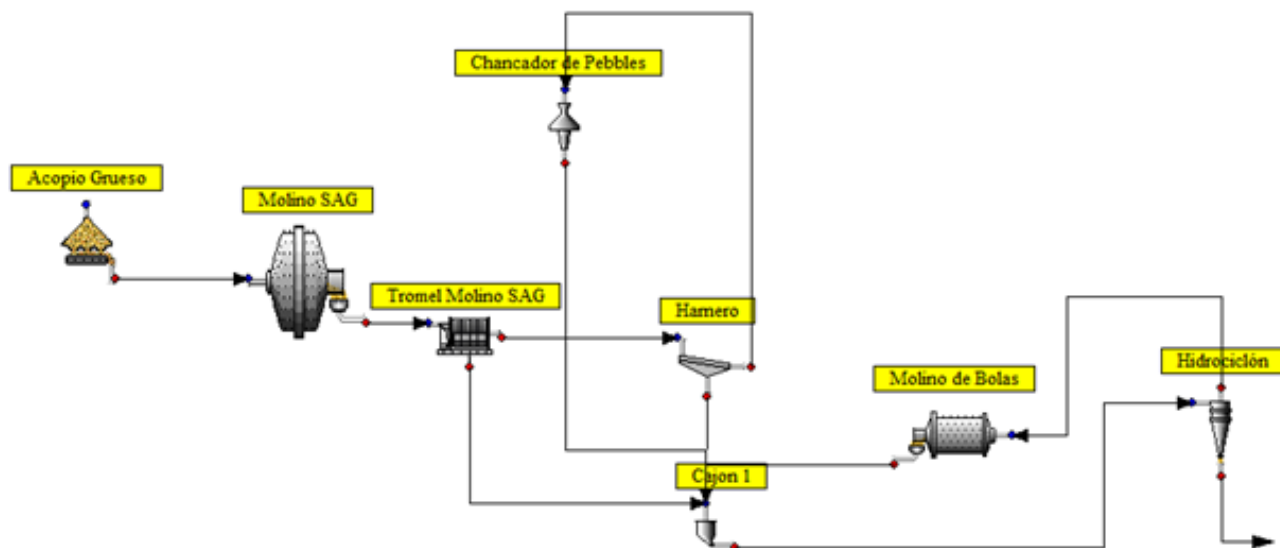


Figura 1.1: Diagrama de flujos molienda SAG Minera Centinela

Tabla 1.1: Principales Características Chancado Primario	
Proceso	Chancado Primario
Equipo	Chancador Giratorio
Instalados/Operativos	1/1
Potencia, MW	750
Capacidad Tolva, t	720
Tamaño máximo de alimentación, mm	1550
Abertura Descarga Nominal, mm	180
Capacidad de Diseño, t/h	8000
Tamaño P80, mm	135
Tamaño Critico a SAG, %	36

Tabla 1.2: Principales Características Chancado Pebbles

Proceso	Chancado Pebbles
Equipo	Chancador de Cono
Instalados/Operativos	3/2
Potencia, MW	750
Capacidad Tolva, t	1875
Tamaño de alimentación, mm	40-50
Tamaño Producto, mm	10-12

Tabla 1.3: Principales Características Chancador Secundario y Terciario

Proceso	Chancado Secundario	Chancado Terciario
Equipo	Chancador de Cono	Chancador de Cono
Instalados/Operativos, #	1/1	2/2
Potencia, MW	750	750
Capacidad Tolva, m^3	100	220
Tamaño máximo de alimentación, mm	-200	-70
Capacidad de Diseño, t/h	1115	650
Tamaño P80, mm	-70	-25

Tabla 1.4: Principales Características Chancador Secundario y Terciario

Proceso	Molienda SAG	Molienda Secundaria
Equipo	Molino Semi-Autógeno	Molino de Bolas
Instalados/Operativos, #	1/1	2/2
Potencia, MW	22,3	18,6
Tamaño, ft	40 x 26	27 x 45
Capacidad de Diseño, t/h	5163	10054
Granulometria Producto, mm	3-4	0,210
Jb, %	10-15	30-32
Jc, %	22-35	34
Tamaño Bolas, pul	5	3-4
Consumo de Bolas, g/t	420	600

En la Figura 1.2 se presenta como serie de tiempo la alimentación fresca promedio por mes del equipo molino SAG (MSAG) para el periodo comprendido entre Marzo de 2017 y Diciembre de 2019, periodo previo al inicio de las pruebas piloto.

Se presenta además en purpura la capacidad de diseño del MSAG, los promedios por año y el promedio del periodo completo en negro.

Se observa que la capacidad de diseño no se alcanza durante este periodo, siendo Noviembre de 2018 el periodo más cercano al máximo, con una alimentación fresca a MSAG de 4425 t/h lo

que genera una diferencia con la capacidad de diseño cercana a 737 t/h, equivalente a un 14% de capacidad ociosa del equipo.

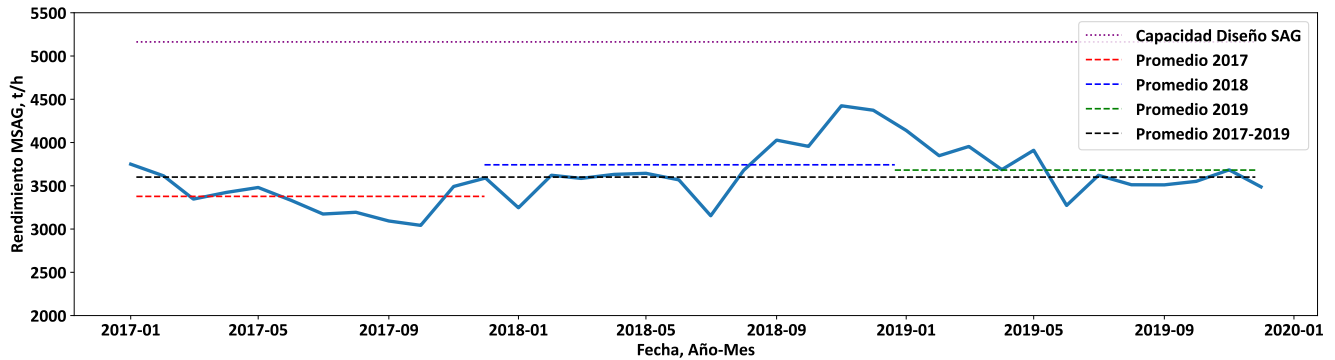


Figura 1.2: Serie de Tiempo para Alimentación Fresca SAG 2017 a 2019

Respecto a las características del mineral frente a la fractura, se conoce el parámetro "JK Drop Weight Test" (DWT), el valor es conocido para volúmenes de material identificados como fases de extracción desde la mina. Altos valores de DWT se relaciona con minerales blandos y fáciles de reducir en tamaño, por el contrario, valores bajos de DWT se relacionan con minerales duros y difíciles de reducir en tamaño SGS MINERALS SERVICES (2013).

En la Figura 1.3 se presentan los valores de Axb para los materiales Stock, Fase 4, Fase 5 y Fase 6. Es posible apreciar de Figura 1.3 que la Fase 6 presenta valores menores con mayor frecuencia que los demás materiales.

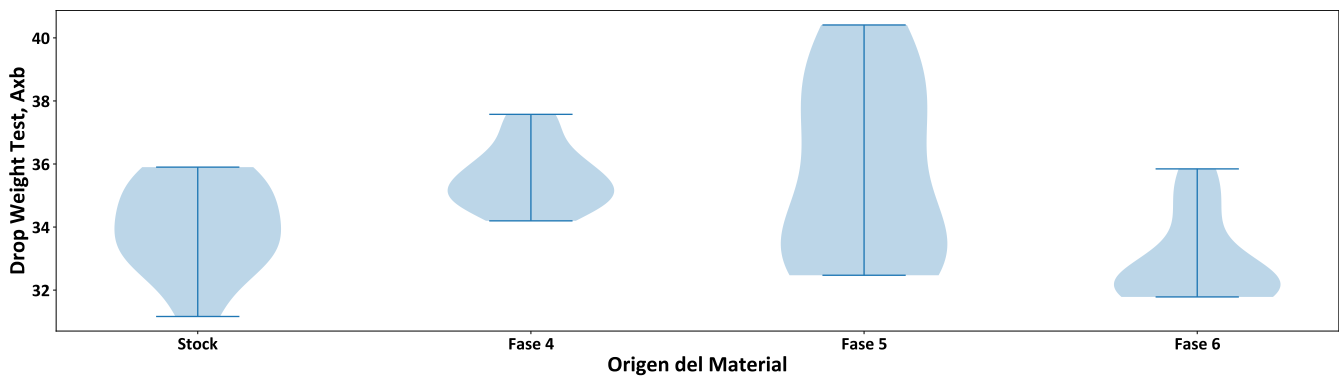


Figura 1.3: Axb DWT

En la Figura 1.4, se presentan los porcentajes de participación por origen de material y el rendimiento del equipo molino SAG como serie de tiempo.

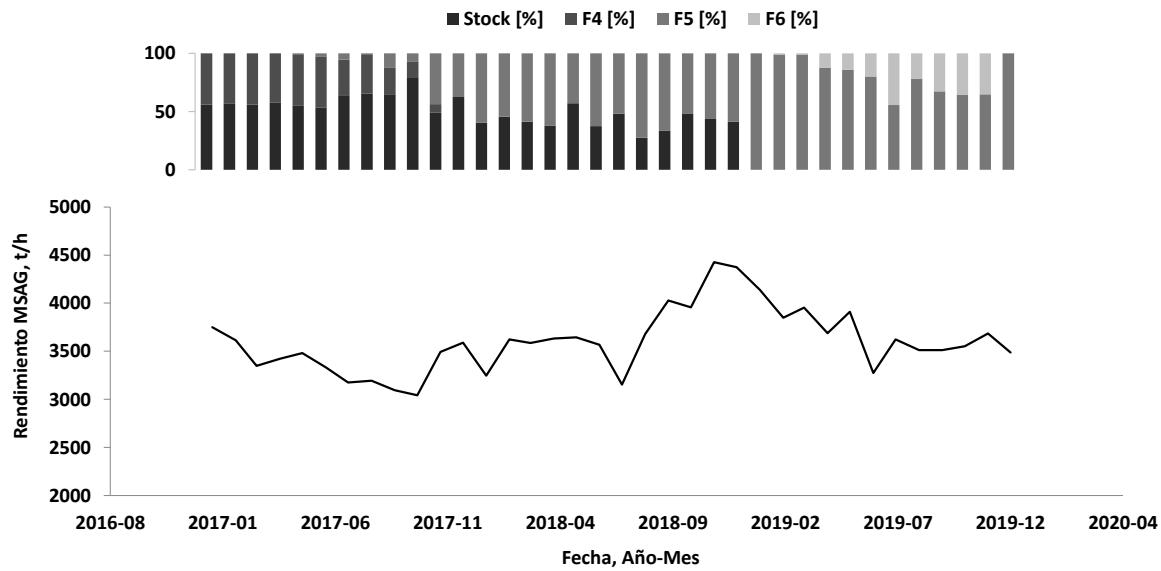


Figura 1.4: Contribución por fase y rendimiento MSAG

A grandes rasgos se puede observar que la fase más difícil de reducir en tamaño es la que fase 6, que ha sido alimentada desde mayo de 2019 de manera incremental y seguirá de esta manera hasta que sea la fase mayoritaria, de esta manera el proceso de reducción de tamaño se encuentra en condiciones mas demandantes, lo que reduce la alimentación fresca al molino SAG.

Frente a este escenario es requerida una toma de acción que permita mantener los niveles de procesamiento y acercarlos a la capacidad de diseño original.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1 Reducción de Tamaño

2.1.1 Principios de reducción de tamaño

La reducción de tamaño es realizada mediante la reducción del tamaño de una partícula, esta es separada en dos o más fragmentos. El proceso requiere la aplicación de fuerzas y con ello de la adición de energía a un sistema particular. La reducción de tamaño se puede realizar tanto por métodos químicos como mecánicos, siendo este ultimo mecanismo el que se utilizará.

Los principales modos de reducción de tamaño mecánicos son:

- compresión
- fractura
- abrasión
- división
- corte o cizalla
- impacto

En un proceso de reducción de tamaño todos los modos de reducción de tamaño pueden estar involucrados simultáneamente en distintas magnitudes. Comúnmente las herramientas o equipos para la reducción de tamaño hacen uso de un modo de reducción de tamaño preferente. En la Figura 2.1 se presentan de manera gráfica algunos de los modos de reducción de tamaño mecánico.

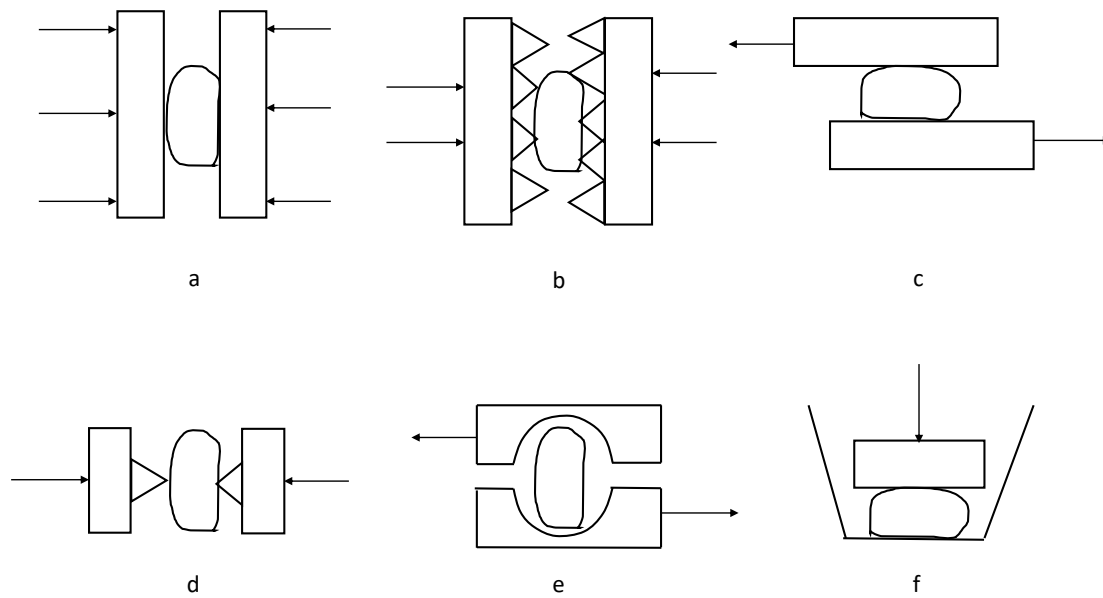


Figura 2.1: Modos de reducción de tamaño: a- compresión, b-fractura, c-abrasión, d-agrietamiento, e-corte, f-aplastante (adaptado de Drzymala and Swatek (2007))

El objeto a reducir en tamaño puede ser un mineral, roca o mena, la que contiene mineral valioso y ganga. El objetivo de la reducción de tamaño de minerales es la liberación del material valioso contenido en la roca. La liberación satisfactoria del mineral permite la utilización de sus propiedades para procesos posteriores de clasificación y concentración. Una representación gráfica de la liberación de una roca es presentada en la Figura 2.2, donde se aprecian variados tipos de liberación con distintos porcentajes.

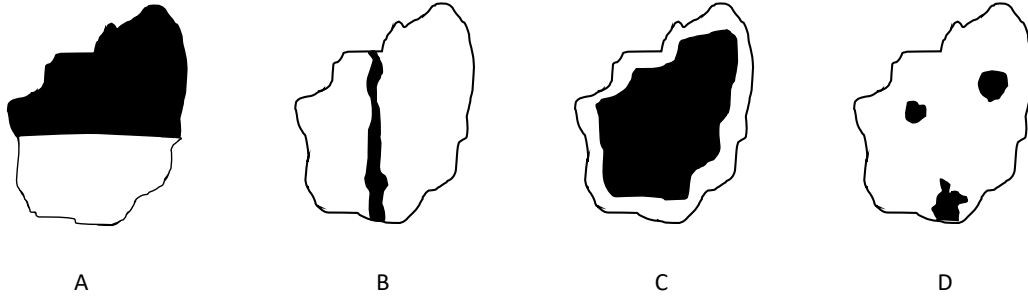


Figura 2.2: Liberación de partículas A- regular, B- vena, C-marco, D-oclusión(adaptado de Drzymala and Swatek (2007))

2.1.2 Molienda Semi-Autógena (SAG)

La reducción de tamaño de algunos minerales es realizada en molinos sin la ayuda de un medio de molienda externo, los molinos en los que la reducción de tamaño se realiza de esta manera son llamados molinos autógenos (AG) o completamente autógenos (FAG). Estos molinos utilizan grandes rocas minerales como medio de molienda.

Los molinos que utilizan tamaños intermedios de rocas o pebbles como medio de molienda también son llamados autógenos, pero son mejor conocidos como molinos de pebbles. Los molinos que muelen minerales de gran dureza con características de fractura que no permiten una molienda completamente autógena, son cargados con pequeñas cantidades de bolas de acero para asistir en el proceso de reducción de tamaño. Estos molinos son conocidos como semi-autógenos (SAG). Este es el tipo de molino que se analizó para este estudio.

La reducción de tamaño de minerales en molinos SAG es lograda por una combinación de mecanismos; impacto, atrición y abrasión las que se originan debido al giro del molino. Las partículas en el TOE del molino reciben las mayores fuerzas de impacto desde las rocas y bolas de acero que caen debido a la rotación del molino. Las partículas en el cuerpo de la carga del molino se deslizan por la coraza del molino, son levantadas por los elevadores y están sometidas a

mecanismos de atrición y abrasión que resultan en la reducción de tamaño de las partículas (Gupta and Yan, 2016).

2.2 Control de Procesos

Existen dos clases comunes de acción de control: lazo abierto y lazo cerrado, en un sistema de lazo abierto, la acción de control desde el controlador es independiente de la variable de proceso (PV). En un sistema de lazo cerrado, la acción de control desde el controlador es dependiente de la variable de control, en su estado actual como futuro. Un controlador de lazo cerrado tiene un lazo de retroalimentación que se asegura que el controlador ejecuta una acción de control para controlar la variable de proceso (PV) al mismo valor que el punto de seteo (SP) (Gutiérrez and Iturralde, 2017).

Diagramas de lazo abierto y lazo cerrado se presentan en la Figura 2.3.

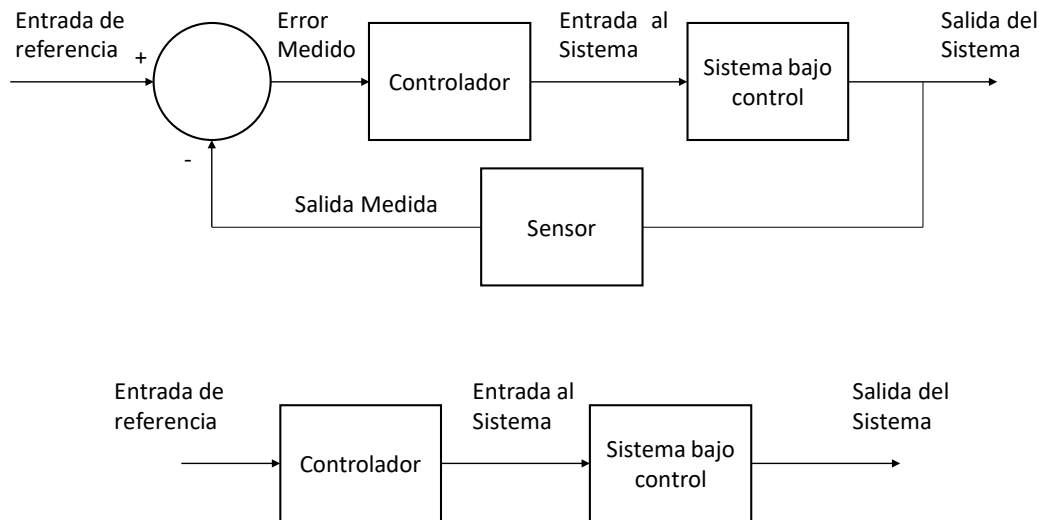


Figura 2.3: Lazo de control para lazo cerrado (superior) y lazo abierto (inferior)

En el caso de control cerrado, el lazo retroalimentado incluye sensores, algoritmos de control y actuadores, con el objetivo de mantener la variable de proceso (PV) en el punto de seteo (SP).

2.2.1 Control Encendido-Apagado

El control Encendido - Apagado utiliza un lazo retroalimentado que cambia abruptamente entre dos estados, de esta manera el valor del error (SP-PV) indica el estado del equipo. Cabe notar que este tipo de control se basa en el signo del error y no en su magnitud para ejercer la acción de control. En la Figura 2.4 se aprecia el cambio en el estado del controlador dependiendo del signo del error entre el valor de la variable y el punto de seteo, se puede apreciar además que el valor de la variable a controlar se mantiene en las cercanías del punto de seteo, siendo una estrategia de control valida para este sistema simple.

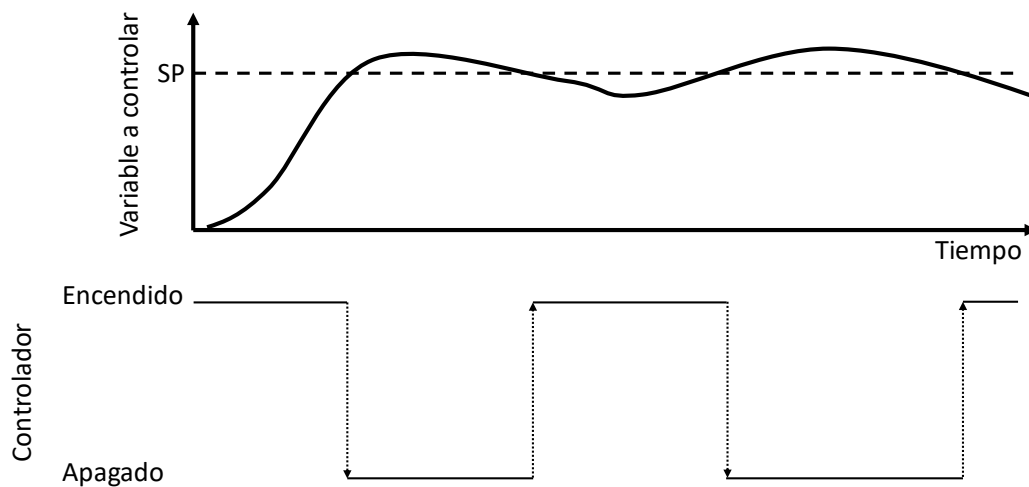


Figura 2.4: Esquema para control encendido/apagado

2.2.2 Control Lineal

Los sistemas de control lineal utilizan la retroalimentación negativa para producir una señal de control que mantiene la variable controlada (PV) en el valor deseado (SP). A continuación, se presenta en breve selección de controladores lineales.

1. Control Proporcional:

El control proporcional es un tipo de sistema de control lineal retroalimentado en el cual el control a ejercer sobre la variable controlada es proporcional a la diferencia entre el valor

deseado (SP) y el valor medido (PV). En este tipo de control, mientras mayor es la diferencia, mayor es la magnitud de la acción de control. Una desventaja del control proporcional es que no logra eliminar el error residual SP-PV, dado que requiere de la existencia de este para generar la salida proporcional. El control proporcional es de mayor complejidad que el control Encendido – Apagado, pero menos complejo que el control PID (Proporcional – Integral – Derivativo) presentado a continuación.

2. Control PID:

Dado que el control puramente proporcional debe operar con el error residual, se introducen los controladores PI (Proporcional - Integrativo) dado que eliminan el error, aunque la respuesta puede ser lenta o causar oscilaciones en esta, los controladores PID (Proporcional – Integrativo – Derivativo) solucionan este ultimo problema introduciendo la acción derivativa que mantiene la estabilidad, a la vez que la responsividad del controlador es mejorada.

El control PID se divide en tres acciones de control, las cuales en conjunto ejecutan la acción de control del controlador PID, de esta manera la acción de control derivativa se relaciona con la razón de cambio del error en el tiempo, si la variable medida se acerca al punto de seteo SP rápidamente, entonces el actuador retrocede de manera temprana para amortiguar la respuesta y llegar al punto de seteo de manera mesurada, al contrario, si el valor medido se aleja rápidamente del SP se aplican una acción en mayor proporción, para de esta manera restaurar el valor de manera rápida. Por su parte la acción integrativa aumenta el efecto a largo plazo del error en estado estacionario, de tal manera que la acción de control se continúa ejecutando hasta que el error es eliminado.

3. Control Predictivo Basado en Modelos:

El control predictivo basado en modelos (MPC) se refiere a una clase de algoritmos de control computacionales que utiliza modelos de procesos explícitos para predecir la respuesta futura de una planta o proceso. En cada intervalo de control el algoritmo MPC intenta optimizar el comportamiento futuro de la planta al calcular una secuencia de ajustes futuros en las variables manipuladas, el primer elemento de la secuencia es enviado a la planta a controlar y el proceso se repite posteriormente.

En muchas ocasiones, el control MPC genera mejor desempeño que los controladores diseñados por otros métodos, así mismo el control MPC provee un medio general y efectivo para el diseño de sistemas de control para una gran cantidad de sistemas de múltiple entrada y múltiple salida, MIMO por sus siglas en ingles. Los avances tecnológicos recientes han disminuido sustancialmente los costos e incrementado la capacidad de los computadores, sensores y comunicaciones, incrementando la razón beneficio/costo para los sistemas de control que utilizan

una alta capacidad de computo. Simultáneamente, avances en el campo de las matemáticas y algoritmos computacionales para optimización han mejorado considerablemente la velocidad y confiabilidad de los cálculos en tiempo real requeridos por los controladores MPC.

2.2.3 Aplicaciones de Control Avanzado

BrainWave:

La solución MPC de la empresa Andritz es BrainWave, solución que actúa como la capa estabilizadora de los procesos, mediante la identificación de modelos del mismo. La solución BrainWave se ubica en la capa inferior de control en la configuración del control avanzado de Andritz ACE, cuyo objetivo es la estabilización del proceso. Este tipo de operaciones mineras presentan varios desafíos para el control debido a variaciones en propiedades del mineral que no son medidas, retardos por el transporte del material y procesos con respuestas no lineales.

La solución BrainWave de Andritz presenta características adaptativas y predictivas, las que entregan mejores resultados que el control PID convencional y es elegido por su buena estabilidad, convergencia y manejo de retardos. Adicionalmente el control BrainWave es fácil de entender en términos de ganancias, constantes de tiempo, interacción de variables y su breve periodo de implementación.

BrainWave por su parte es un controlador predictivo multivariable basado en el polinomio de Laguerre, una técnica desarrollada en la universidad de British Columbia. Este polinomio utiliza un modelo que se adapta en línea y utiliza el horizonte de predicciones para sintonizar los parámetros. La estructura del modelo, construido alrededor de funciones de transferencia en tiempo discreto.

Una vez que el modelo obtiene la ecuación de estado de sistema dinámico, Molino SAG, sus parámetros son identificados mediante un algoritmo recursivo de mínimos cuadrado, menor error cuadrático.

La aplicación BrainWave ha sido utilizada ampliamente en proceso de la industria minera, tales como control de nivel en sumideros, chancado secundario y terciario, control de distribución de tamaños de partículas en descarga de molienda de bolas, control de nivel en celdas de flotación, control de densidad de descarga en espesadores, secado de concentrado de molibdeno y control en cascada de potencia.

BrainWave SAG Mill es un paquete de tecnología de control predictivo basado en modelos que considera cambios en la velocidad de rotación del molino, pebbles recirculados para mantener el peso del molino (presión de los descansos) para maximizar la producción. Mientras que el controlador de peso del molino ajusta el punto de seteo (SP) para la alimentación fresca, un controlador BrainWave se encarga de definir la velocidad de los alimentadores para asegurar que se alimenta la cantidad requerida al molino. Adicionalmente, BrainWave puede ajustar de manera

automática el punto de operación, identificando cambios en la dureza del mineral a través del tiempo, debido a falta de instrumentación y coordinación esta última capacidad del controlador no es utilizada en Minera Centinela (Gough, 2011; Navarrete et al., 2019)

Profit:

La empresa Kairos ofrece una gran familia de productos conocidos como Profit Suite para control avanzado de proceso y optimización. La mayor parte de sus componentes son utilizados en aplicaciones de procesamiento de minerales. Estos productos incluyen, Profit Suit Early Event Detection (EDD) Toolkit, Profit Sensor Pro, Profit Loop, Profit Controller, Profit Optimizer, Profit Bridge, Profit Max y UniSim Design Suite. Profit Suite EDD Toolkit provee un ambiente para el modelamiento estadístico para identificar, localizar y asistir en la reducción de situaciones anormales en el proceso y equipo de la planta. Utiliza análisis de componente principal (PCA) y modelamiento difuso. La interfaz del modelamiento PCA provee controles y opciones intuitivos para usuarios tanto expertos como novatos. El modelamiento de lógica difusa emplea un método analítico posterior al procesamiento PCA.

Profit Sensors Pro es una herramienta de análisis de datos y regresiones utilizada para desarrollar modelos para predicción en línea y aplicaciones de sensores blandos (soft sensors), esta herramienta permite el análisis de datos complejos utilizando una suite de herramientas matemáticas avanzadas, incluyendo mínimos cuadrados ordinario (OLS, por sus iniciales en inglés), mínimos cuadrados con pesos y regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS, por sus iniciales en inglés), así como análisis de componentes principales y ranking estadístico variable. Las capacidades de Profit Sensor Pro incluyen el desarrollo de modelos lineales y no lineales para análisis fuera de línea y despliegues en línea.

Profit Loop es una aplicación del tipo predictiva basada en modelos de una entrada y una salida (SISO) con la simplicidad operativa de un controlador del tipo PID. Esta tecnología es un predictor de Smith y optimizador todo en uno, utilizado para el control de analizadores discretos, niveles de estanque y procesos con un gran tiempo de retardo.

Profit Controller, basado en Roboust Multivarible Predictive Controller Technollogy (RMPTC, Tecnología de Control Robusto Multivariable Predictivo Basado en Modelos, en español), provee las herramientas para el diseño, implementación y mantención de estrategias de control multivariable y optimización para controlar procesos industriales complejos y de alto grado de interacción. Para tal efecto utiliza algoritmos de control por rango (RCA, por sus siglas en inglés, el cual determina el menor movimiento del proceso para lograr simultáneamente los objetivos de control y optimización. RMPCCT utiliza un modelo de respuestas de impulsos finitos (FIR, por sus siglas en ingles), uno para par Variable Manipulada – Variable Controlada. La identificación del modelo es lograda utilizando pruebas de lazo abierto (Pruebas Escalón) en el proceso, la parte robusta de la tecnología RMPTC

utiliza un valor único de umbral y un diseño mínimo – máximo para la diferencia entre el modelo y la planta, de esta manera el controlador determina el esfuerzo de control sobre todas las posibles relaciones con la planta (el caso de peor escenario).

Profit Optimizer resuelve optimizaciones de múltiples procesos y de toda la planta a la vez en una base minuto a minuto, Profit Optimizer se construye por encima de las aplicaciones Profit Controller utilizando las relaciones medidas del proceso y la información dinámica del mismo, considerando las restricciones tanto físicas como económicas de cada proceso como de la planta, sin violar las restricciones globales del sistema. Adicionalmente, coordina dinámicamente la introducción de puntos de seteo (SP) óptimos para transiciones a una operación óptima utilizando programación cuadrática distribuida.

'Profit Bridge' integra modelos de proceso no lineales con las aplicaciones 'Profit Controller' y 'Process Optimizer' mediante una frecuente actualización de los modelos lineales embebidos en estas aplicaciones con información obtenida desde modelos no lineales del proceso, entregando así control y optimización dinámica no lineal a una fracción del costo de un sistema de optimización riguroso de tamaño completo Navarrete et al. (2019)

2.3 Control de procesos en molienda semi-autógena

Los molinos SAG pueden ser optimizados para dos objetivos, máxima producción o máxima eficiencia energética de molienda. en ambos casos, se requiere de un preciso control del nivel de llenado del molino Wills et al. (2006). La mantención del nivel de llenado puede ser alcanzada mediante de peso del molino, variable medida a través de la presión de los descansos, esta es una de las aproximaciones para estabilizar el nivel de llenado del molino.

El peso del molino es difícil de controlar debido a la respuesta dinámica cambia a medida que el molino alcanza su máxima capacidad. Cerca de la máxima capacidad, el peso del molino demuestra un comportamiento integrativo y el molino puede alcanzar fácil y rápidamente una condición de sobrecarga. Esta condición es complejizada debido a las demoras de transporte de materia en la alimentación del sistema, por lo que es importante que el sistema de control logre detectar una sobre carga inminente de manera que ajuste la tasa de alimentación de manera acorde para evitar la sobrecarga del molino. La capacidad máxima del molino cambia con la dureza del mineral, y dado que esta propiedad es difícil de medir en línea, no se utiliza en los sistemas de control y por ello los sistemas de control deben confiar o configurarse para utilizar el peso del molino de manera retroalimentada, no solo para la dureza del mineral, si no que para varias otras propiedades del mineral que cambian durante la operación Silva et al. (2014).

El proceso de molienda SAG es gobernado por variables claves de magnitud física bien identificadas. Las variables involucradas en el control del molino SAG se clasifican entre manipuladas,

controladas y perturbaciones medidas, sumado a estas existen las perturbaciones no medidas, de las cuales no se conoce su magnitud.

2.3.1 Tipo de variables

Variables Manipuladas

Las variables manipuladas son las que permiten ejercer acciones de control sobre el equipo y proceso, de esta manera modificando su valor, aumentando o disminuyendo, se logra alcanzar un nuevo estado en el proceso.

Las variables manipuladas se deben mantener dentro de un rango permitido para mantener la seguridad de la operación, de esta manera se encuentran limitas tanto en las aplicaciones como en enclavamientos en el DCS.

Aunque valores superiores o inferiores a estos limites de seguridad pudiesen llevar el sistema a un estado de mayor procesamiento las restricciones se deben cumplir.

Las variables manipuladas del molino SAG y sus rangos son presentados en Tabla 2.1. La modificaciones de los valores de las variables manipuladas genera consecuencias en el proceso, de manera que afecta las variables controladas, así las variables manipuladas deben ser modificadas de manera tal que las variables controladas permanezcan dentro del rango de control.

Variables Manipuladas	Rango
Alimentación Mineral Fresca, t/h	1500-4500
Velocidad de Giro, rpm	0-10
Porcentaje de Solidos, %	60-72

Tabla 2.1: Variables manipuladas del proceso de molienda SAG

Variables Controladas

Las variables controladas por su parte se refieren a limitaciones físicas u operacionales que deben ser mantenidas dentro de un rango de manera indirecta, dado que no es posible una modificación directa de su magnitud por parte del operador ni por parte del sistema de control.

De igual manera que con las variables manipuladas, las variables controladas deben permanecer dentro de rangos específico debido a consideraciones de seguridad operacional relacionadas con las capacidades del proceso y del equipo.

Las variables controladas de molienda SAG son presentadas en la Tabla 2.2

Variable controlada	Rango
Presión De Descansos, MPA	0 - 9000
Impactos Críticos, #	0 - 100
Potencia Consumida, kWh	0 - 23 000
Pebbles Generados, t/h	0 - 1000
Porcentaje de Torque, %	0 - 105

Tabla 2.2: Variables controladas del proceso de molienda SAG

Variables Perturbación Medida

Las variables de perturbación medida corresponden a variables que afectan al proceso de molienda SAG, son medidas por instrumentos, pero no se puede modificar su valor, para este caso, las perturbaciones medidas se presentan en la Tabla 2.3.

Variable Perturbación	Rango
Porcentaje de Gruesos, %	0-100
Pebbles Recirculado, t/h	0 - 1000

Tabla 2.3: Variables perturbación medida del proceso de molienda SAG

Capítulo 3

Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar en forma técnica la aplicación de dos sistemas de control avanzado en el proceso de molienda SAG en la Compañía Minera Centinela, para una potencial actualización tecnológica.

3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar de manera técnica los programas de control Brainwave y Profit según variable manipulada alimentación mineral fresca.
- Evaluar de manera técnica los programas de control Brainwave y Profit según variable consumo específico de energía.
- Evaluar de manera técnica los programas de control Brainwave y Profit según estabilidad del proceso de molienda semi-autógena.

Capítulo 4

Metodología

La prueba piloto comprendió la realización de un experimento de campo con resultados cuantitativos, se realizó un experimento de encendido/apagado, donde el grupo de control fue la operación con el paquete de software Brainwave y el grupo experimental, la operación con el paquete de software Profit.

Durante el desarrollo del experimento, de 4 semanas de duración, la variable independiente fue el estado de funcionamiento del software experimental y las variables independientes son las variables del proceso, rendimiento, presión de descansos, velocidad de giro, porcentaje de sólidos, impactos críticos, potencia, pebbles generados, pebbles recirculados, torque, granulometría de entrada y salida y amplitud de rangos de control.

Una vez se realizó el experimento se recopiló la información de operación mediante la utilización del software de almacenamiento y visualización de datos PI System con el módulo PI Data Link para MS Excel OSIsoft (2006), para posteriormente los datos fueron procesados.

El procesamiento de datos consistió en primer lugar en la aplicación de filtros sobre los datos recopilados y luego se ejecutó una prueba de normalidad sobre los conjuntos de datos mediante la utilización de la herramienta gráfica "ProbPlot" Fox (2016), de esta manera se determinó la condición de normalidad de los datos extraídos dentro del período de prueba piloto.

Posteriormente se realizó una identificación de eventos anómalos de la variable perturbación porcentaje de gruesos para eliminar eventos anómalos del estudio.

4.1 Filtros:

Los 4 filtros a aplicar son: filtro de control automático, filtro 30 minutos después del cambio de aplicación, filtro período de prueba piloto y filtros operacionales.

1. Filtro control automático: El primer filtro consistió en la eliminación de todos los períodos en los cuales se activó el control manual, sean estos debidos a cambios de aplicación de control,

detención de la planta por mantención o por decisión del operador debido a una condición operacional específica.

2. Filtro cambio de aplicación: El filtro 2 consistió en la eliminación de 30 minutos posteriores al cambio de aplicación, de esta manera la tendencia del proceso generada por la aplicación anterior afecta en menor medida los resultados obtenidos por la aplicación de control actual.
3. Filtro periodo de prueba: El filtro 3 consistió en la eliminación de los siguientes periodos:
 - Periodo 1: 2020-04-5 01:00:00 a 2020-04-6 01:00:00
 - Periodo 2: 2020-04-12 01:00:00 a 2020-04-13 01:00:00
 - Periodo 3: 2020-04-21 17:10:00 a 2020-04-24 17:00:00

Los periodos 1 y 2 correspondieron a días domingo, los cuales no son considerados dentro las pruebas, el periodo 3 correspondió a una detención de la planta concentradora por mantención programada. A modo de resumen se presentan los filtros temporales en la Tabla 4.1

Filtro	Condición
Filtro temporal 1	Modo de control manual
Filtro temporal 2	30 minutos antes del cambio programado de aplicación días domingo y mantención programada
Filtro temporal 3	

Tabla 4.1: Filtros Temporales

4. Filtro operacional: El último filtro aplicado es el filtro operacional, el cual aseguró la disponibilidad de capacidad de la planta para no restringir las acciones de control. Las condiciones operacionales se muestran en la Tabla 4.2:

Variable	Condición	Unidades
Potencia consumida MSAG	≥ 15	MWh
Rendimiento instantáneo MSAG	≥ 1500	t/h
Velocidad de giro MSAG	≥ 7	rpm
Estado molino de bolas 1 y 2	ON	-

Tabla 4.2: Filtros Operacionales

La información recopilada y procesada permitió realizar el análisis estadístico de datos para Profit e identificar los beneficios atribuibles a este y la posterior comparación entre ambos paquetes de software (Brainwave y Profit), lo cual permitió concluir respecto a la capacidad de Profit de evidenciar beneficios frente al sistema de control actual. El análisis estadístico incluye por periodo

y variable, series de tiempo, histograma, gráficos de violín, gráficos de probabilidad acumulada, estadísticos de tendencia central y de dispersión. La evaluación técnica consistió en una tabla resumen de indicadores estadísticos para las variables de interés y para indicadores como tiempo de utilización del sistema y consumo específico de energía.

4.2 Pruebas de normalidad

La prueba de normalidad se realizó mediante la utilización de la herramienta gráfica "Gráfico de Probabilidad", el cual graficó los cuantiles empíricos obtenidos con una distribución normal teórica de iguales parámetros. La herramienta "Gráfico de Probabilidad" permitió concluir de manera visual si un conjunto de datos presentó una distribución normal al evidenciar una correlación lineal positiva.

De esta manera y para facilitar la detección se añade al gráfico una banda de error del 95% sobre la recta que describe la distribución normal teórica, a continuación en la Figura 4.1 se presenta un gráfico de probabilidad para una distribución aleatoria normal

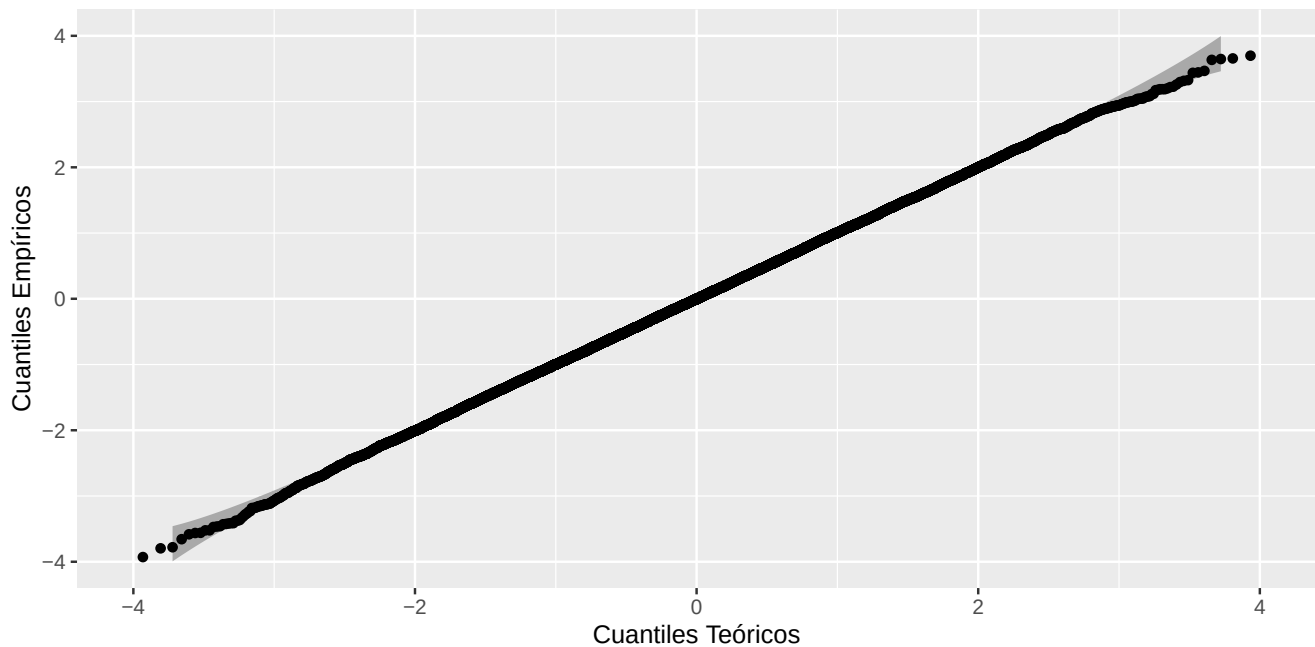


Figura 4.1: Gráfico de Probabilidad para una distribución empírica normal

Como se aprecia en la Figura 4.1, los puntos siguen la tendencia lineal con correlación positiva y se encuentran en su mayoría dentro del rango de 95%, por lo que se comprobó en este caso que la distribución es del conjunto empírico es normal, lo que se esperaba.

4.3 Detección de datos anómalos

La detección de datos anómalos se realizó utilizando la herramienta "Gráfico de Probabilidad" descrita anteriormente, sobre la variable perturbación medida Porcentaje de Gruesos, los datos detectados como anómalos serán los que no pertenezcan al rango común ente los conjuntos de datos de ambas aplicaciones.

Capítulo 5

Resultados y Discusión

Finalizado el periodo de prueba piloto se recopilaron los datos operacionales, de los cuales se presenta la variable Alimentación Mineral Fresca en la Figura 5.1. Es posible observar que la variable rendimiento presenta cambios notorios en la serie temporal e incluso algunas disminuciones abruptas de valores en ciertos periodos. Las variaciones en los valores son de múltiples orígenes, entre los cuales se encuentra la presencia de perturbaciones, cambios en las características de fractura del mineral alimentado al molino SAG, detenciones de planta y en parte debido a la característica encendido/apagado de la prueba piloto (PP). Para eliminar las variaciones ocasionadas por eventos externos a la prueba piloto se aplicaron los filtros temporales y operacionales.

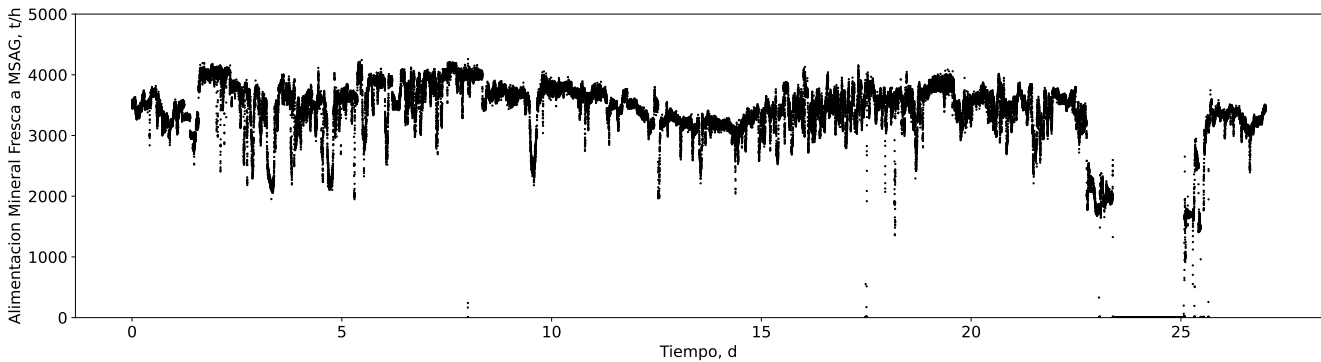


Figura 5.1: Rendimiento MSAG durante Prueba Piloto

5.1 Filtros:

A los datos recopilados se les aplicaron los filtros presentados en la Tabla 4.1 y en la Tabla 4.2. La secuencia de turnos sin aplicar los filtros se presenta en la Figura 5.2.

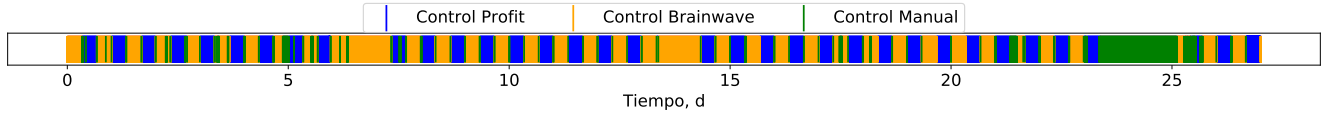


Figura 5.2: Secuencia de turnos sin filtros aplicados

Los filtros operacionales y temporales fueron aplicados sobre la secuencia de turnos antes presentada, resultado 5.3.

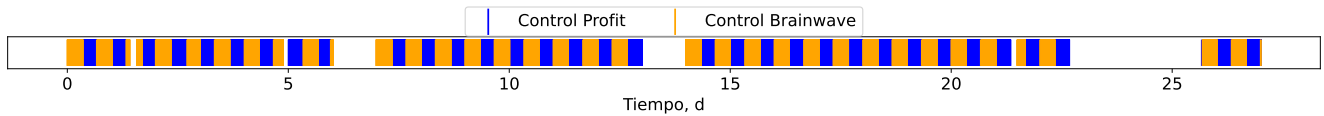


Figura 5.3: Resultado luego de aplicar los filtros operacionales y temporales a la secuencia de turnos

5.2 Prueba de normalidad

En estadística, la prueba de normalidad permite determinar si un conjunto de datos es bien modelado por una distribución normal. Una herramienta gráfica para evaluar la normalidad de un conjunto de datos es el gráfico de probabilidad normal, en este tipo de gráficos la correlación entre los datos empíricos y los cuantiles normales teóricos mide que tan bien los datos son modelados por una distribución normal.

Al graficar un conjunto de datos normales, los puntos deben caer aproximadamente en una línea recta, indicando una correlación positiva. Estos gráficos son fáciles de interpretar y además permiten detectar los datos anómalos Fox (2016).

Se realizaron los gráficos de probabilidad para todas las variables, los que se presentan a continuación.

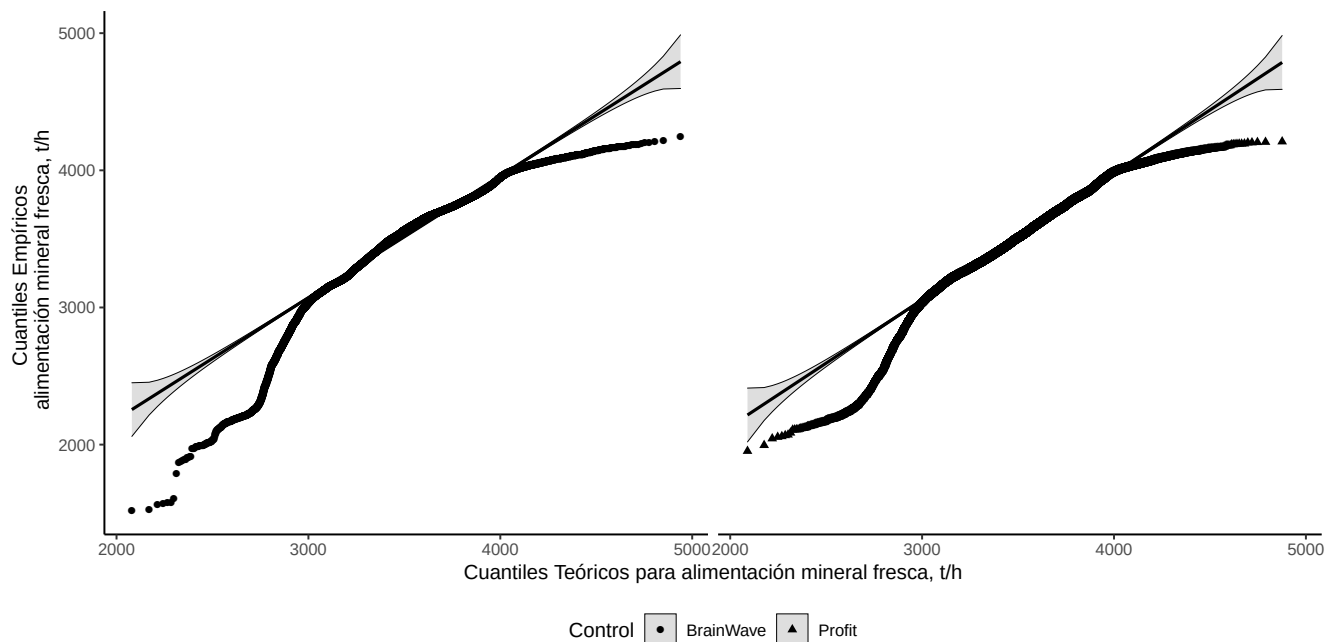


Figura 5.4: Gráfico probabilidad para alimentación mineral fresca

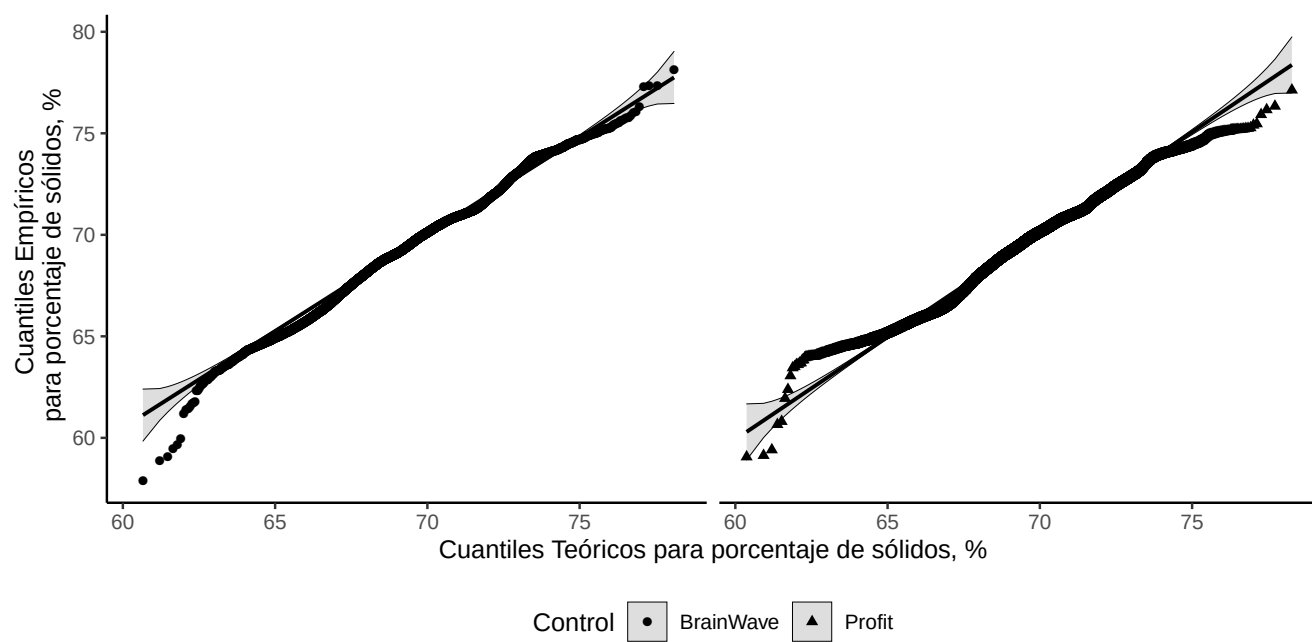


Figura 5.5: Gráfico de probabilidad para variable porcentaje de sólidos

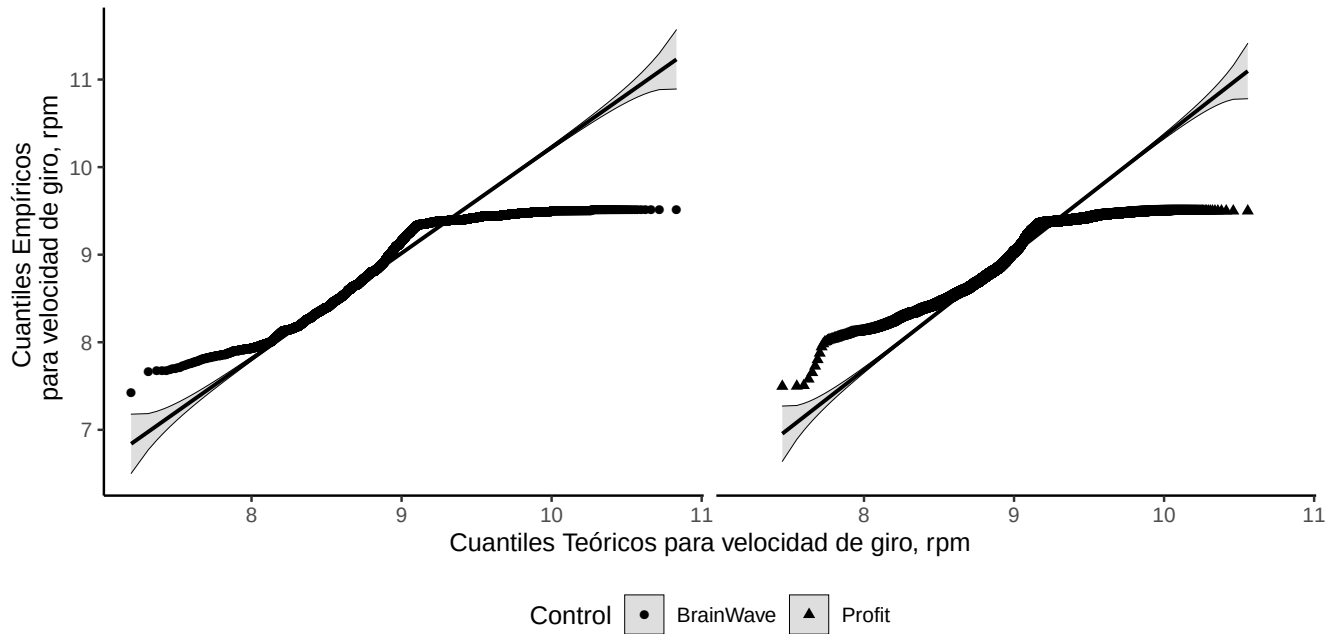


Figura 5.6: Gráfico de probabilidad para variable velocidad de giro

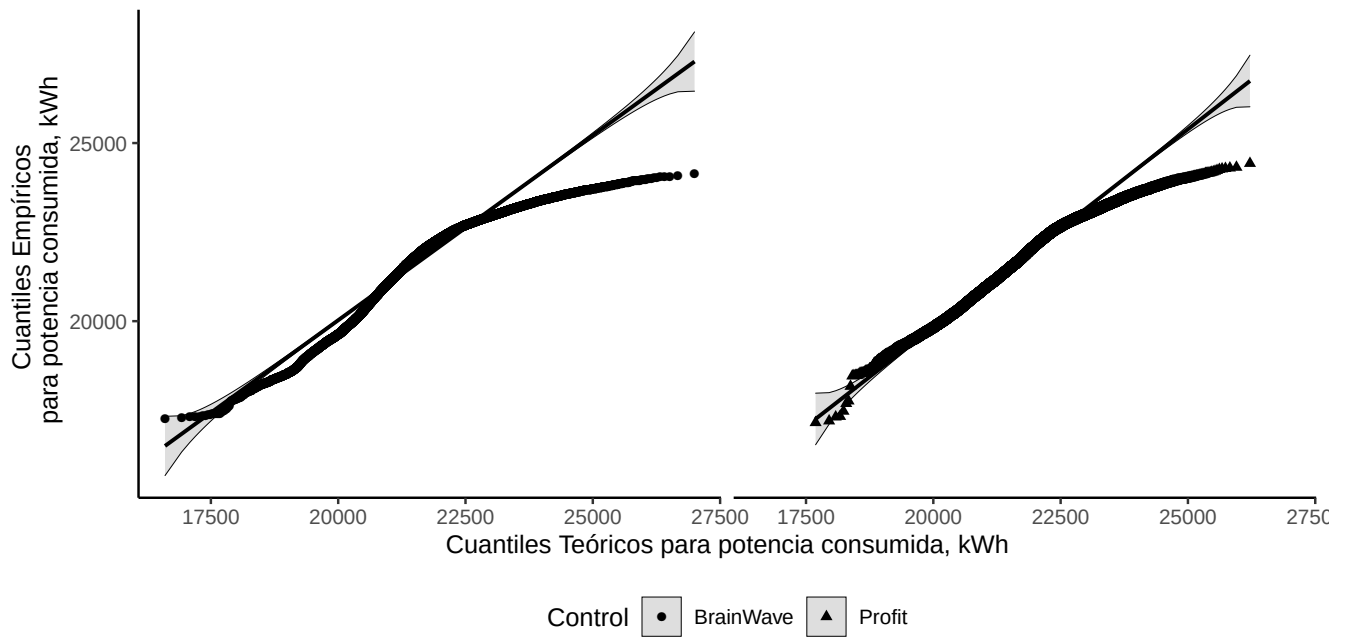


Figura 5.7: Gráfico de probabilidad para variable potencia consumida

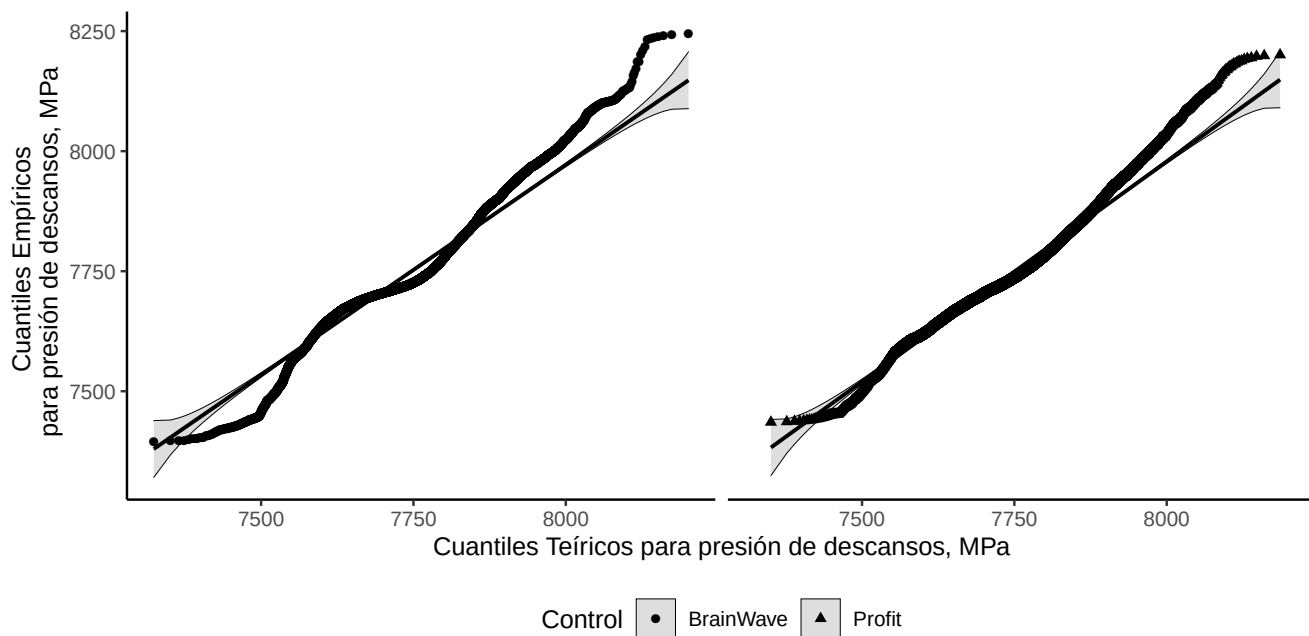


Figura 5.8: Gráfico de probabilidad para variable presión de descansos

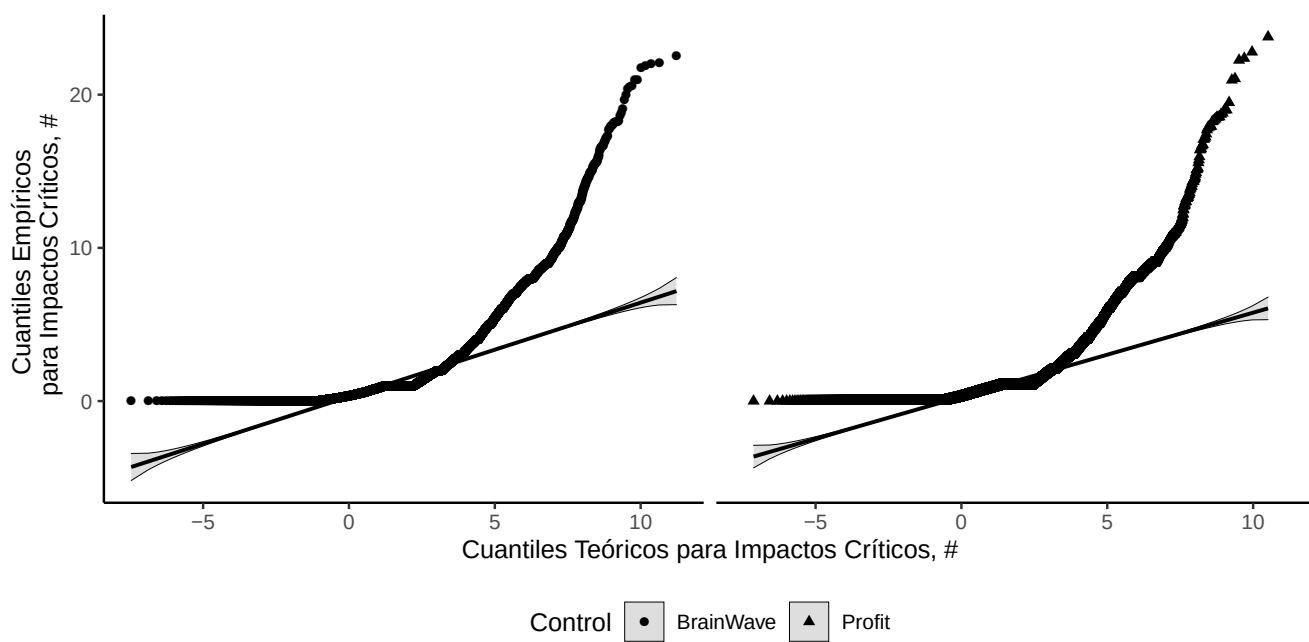


Figura 5.9: Gráfico de probabilidad para variable impactos críticos

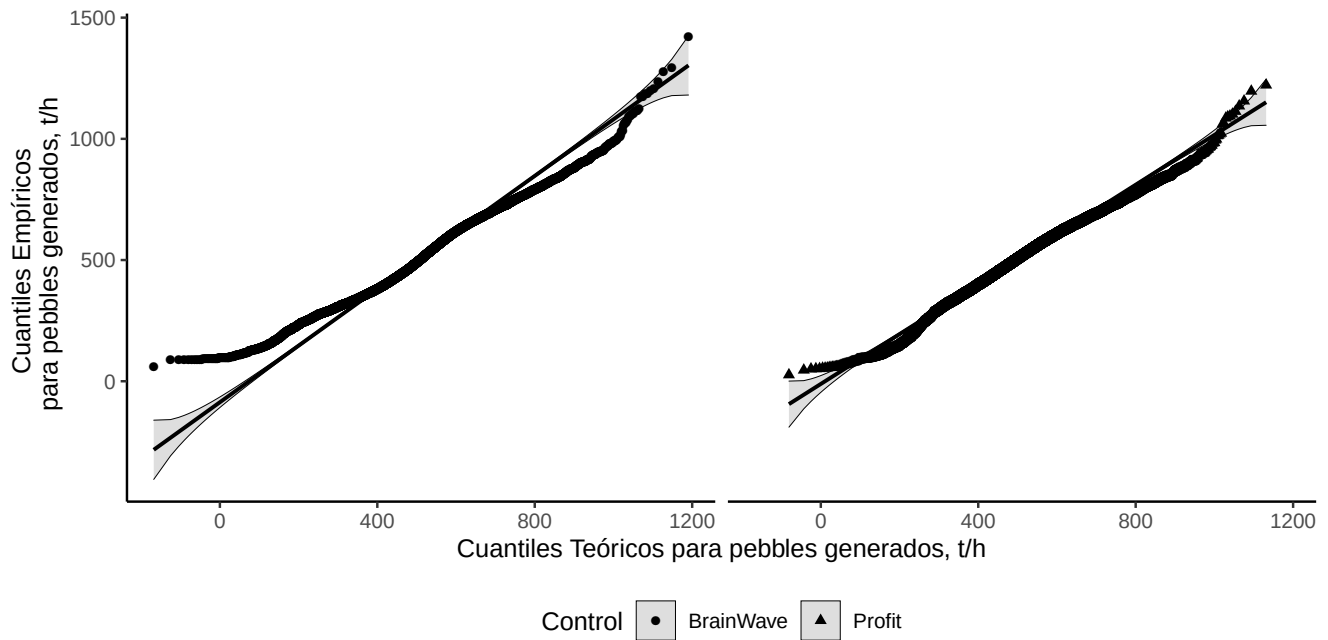


Figura 5.10: Gráfico de probabilidad para variable flujo de pebbles generados

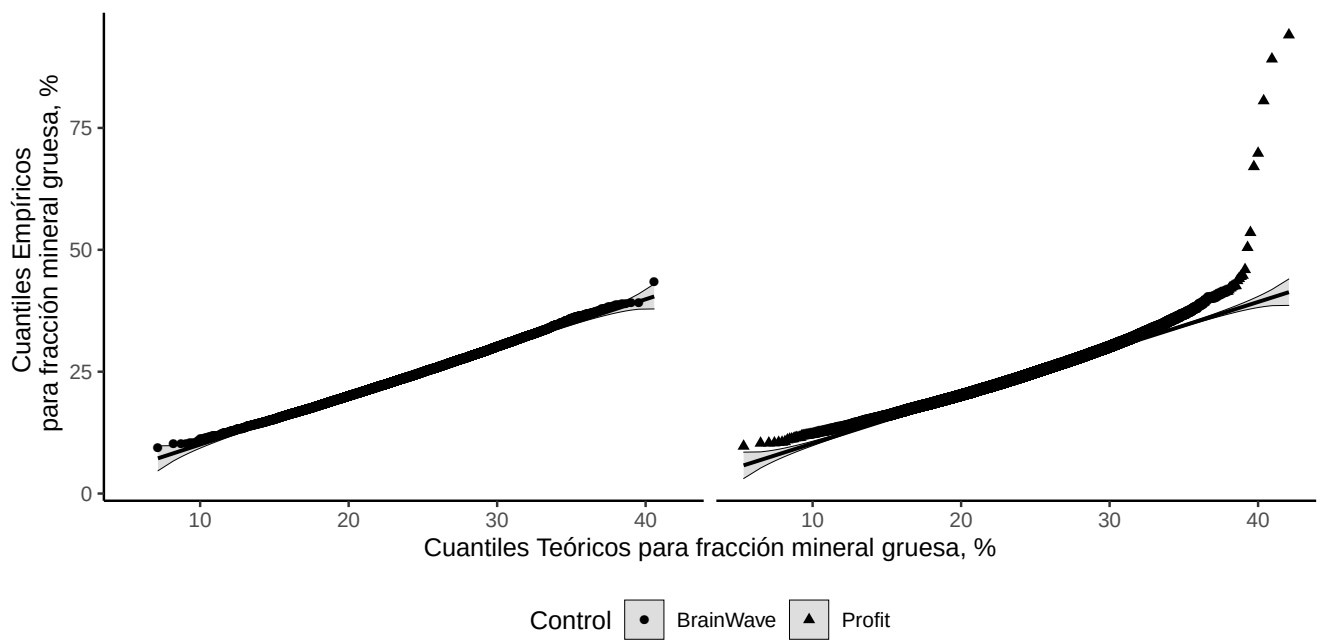


Figura 5.11: Gráfico de probabilidad para variable Porcentaje de gruesos

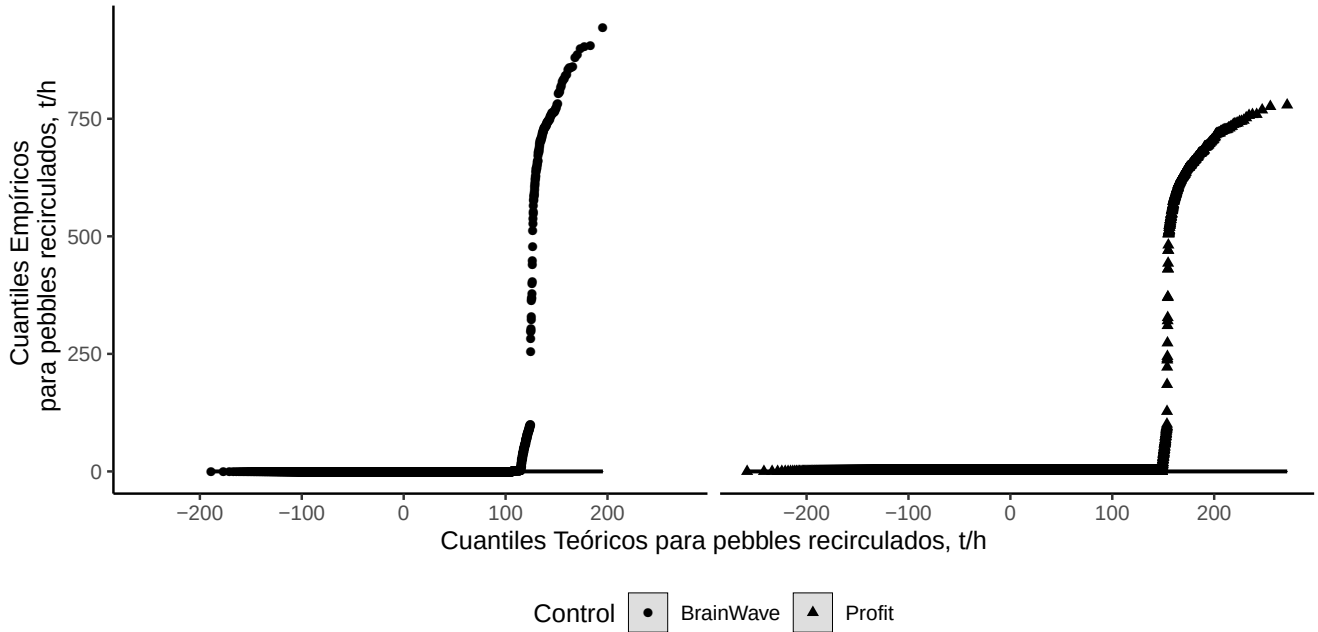


Figura 5.12: Gráfico de probabilidad para variable flujo de Pebbles Recirculados a MSAG

En las Figuras 5.4 a 5.11 se presentan los gráficos de probabilidad, donde se observa que los conjuntos de datos empíricos para ambos programas evidenciaron distribuciones no normales. Este resultado es de esperar debido a que las aplicaciones de control mantienen las variables dentro de rangos definidos para cada variable, excepto las perturbaciones medidas. Los gráficos evidencian que los valores de los límites son los que tienen mayor frecuencia y presentaron valores menos extremos que los valores teóricos de la distribución normal. Debido a esta situación se descartó la utilización de pruebas paramétricas y de aproximaciones normales para el análisis de los datos y se determinó utilizar herramientas gráficas para soportar las conclusiones.

De esta manera, se aprecia en la Figura 5.11 que las distribuciones son diferentes para ambos casos y que los valores del conjunto de datos de la aplicación Profit (triángulos) presentó un rango mucho mayor que el conjunto de datos de Brainwave, sumado a que se trata de un variable de perturbación se determinó que los datos por encima del máximo del conjunto Brainwave exhiben un comportamiento anómalo de operación y por ende son eliminados del conjunto de datos para el análisis posterior.

En los Resultados presentados en la Figura 5.12 se observó que el dato con mayor frecuencia corresponde a cero, esto no es debido a un error de medición, sino que, a pesar de que constantemente los pebbles se generan en el proceso de molienda, esto son recirculados de manera intermitente al MSAG, cuando no son recirculados los pebbles son almacenados en los bins de los chancadores de pebbles y alimentados en avance a molienda secundaria. Basados en este conocimiento se decide no eliminar los datos correspondientes a valor cero en la variable pebbles recirculados.

5.3 Eliminación de datos anómalos

Como se mencionó en la sección anterior, la diferencia de rango de la variable porcentaje de gruesos sera utilizada como criterio para detectar los datos anómalos, de esta manera se presentan los máximos en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Estadísticos de Generación de Pebbles para ambas aplicaciones

Aplicación de control	Máximo
Brainwave	43,4%
Profit	94,1%

La cantidad de datos de Profit que se encuentran por encima de 43,4% son 12 datos, el gráfico de probabilidad para la variable porcentaje de gruesos se presenta en la Figura 5.13.

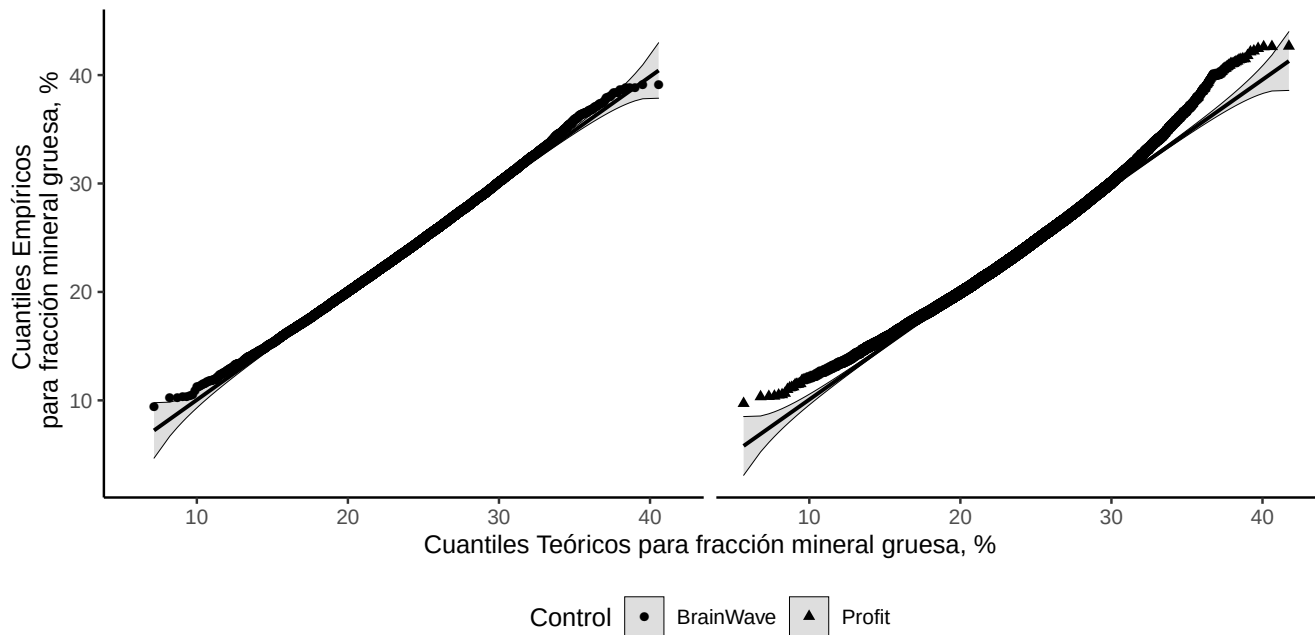


Figura 5.13: Gráfico de probabilidad para variable Porcentaje de gruesos

Los datos eliminados son presentados en rojo en las Figuras 5.14 a 5.16, donde se aprecia que los datos anómalos identificados a partir de la variable porcentaje de gruesos no presentan tendencia con las otras variables, además los datos anómalos son una cantidad baja, menor al 0,5% de los datos.

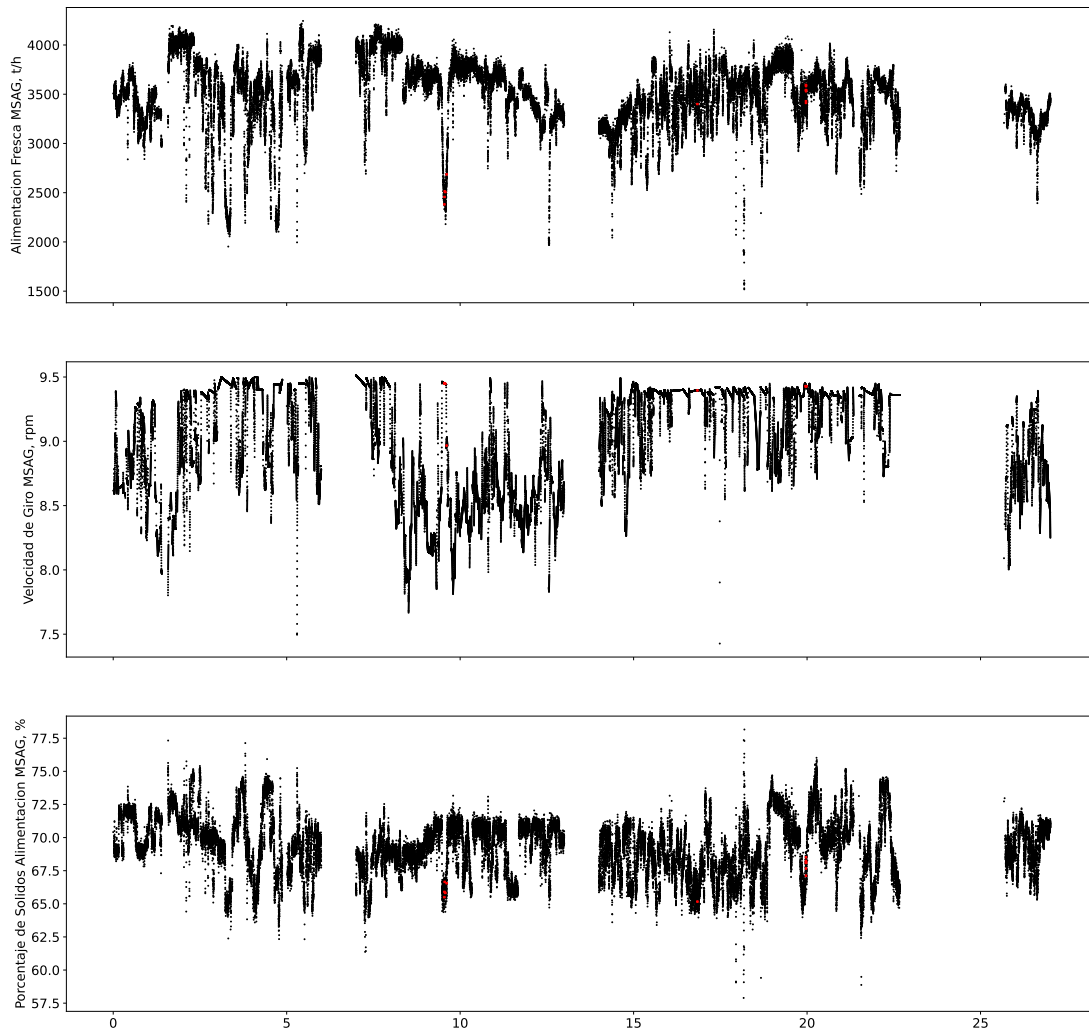


Figura 5.14: Serie de Tiempo para variables manipuladas con identificación de datos anómalos en rojo

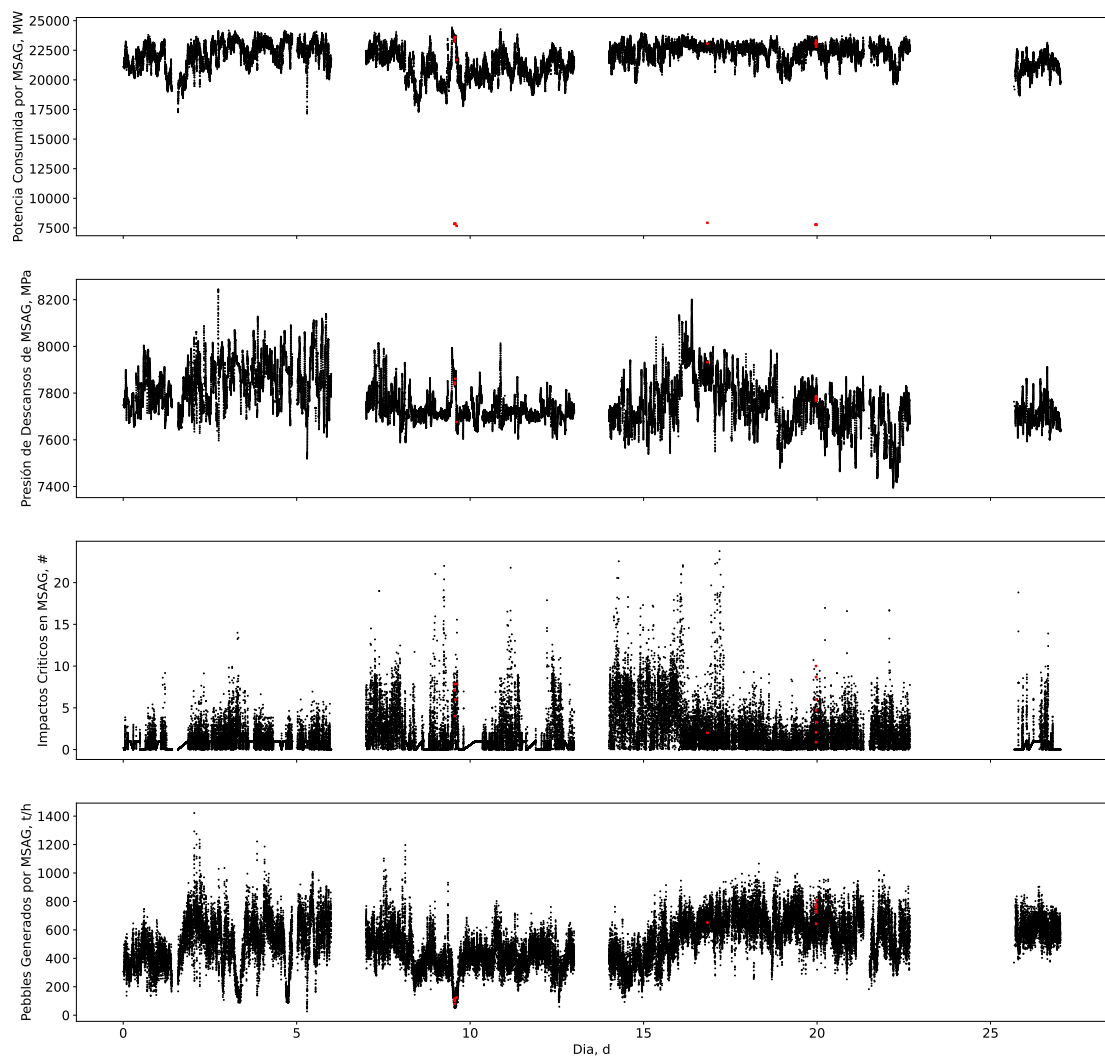


Figura 5.15: Serie de Tiempo para variables controladas con identificación de datos anómalos en rojo

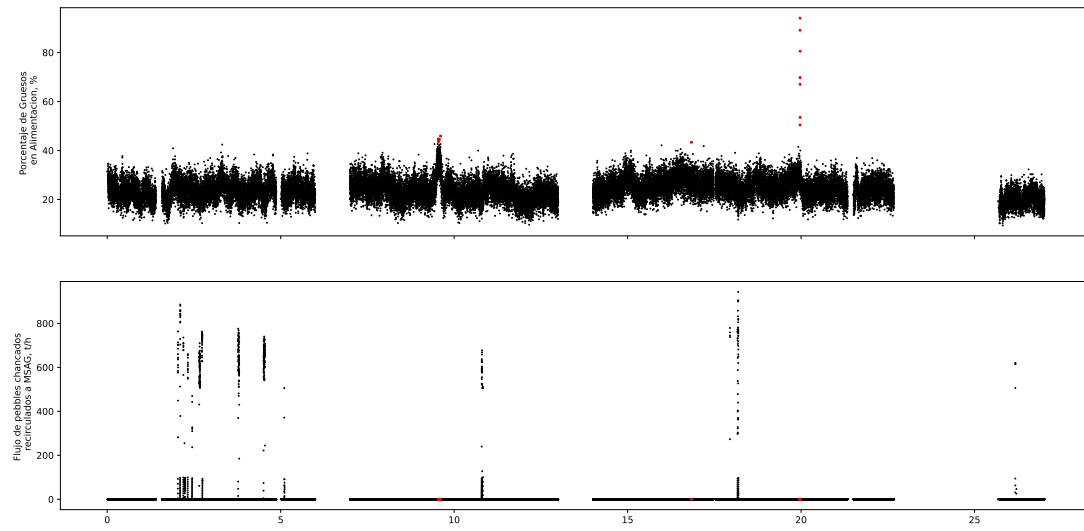


Figura 5.16: Serie de Tiempo para variables perturbación medida con identificación de datos anómalos en rojo

5.4 Análisis de variables manipuladas:

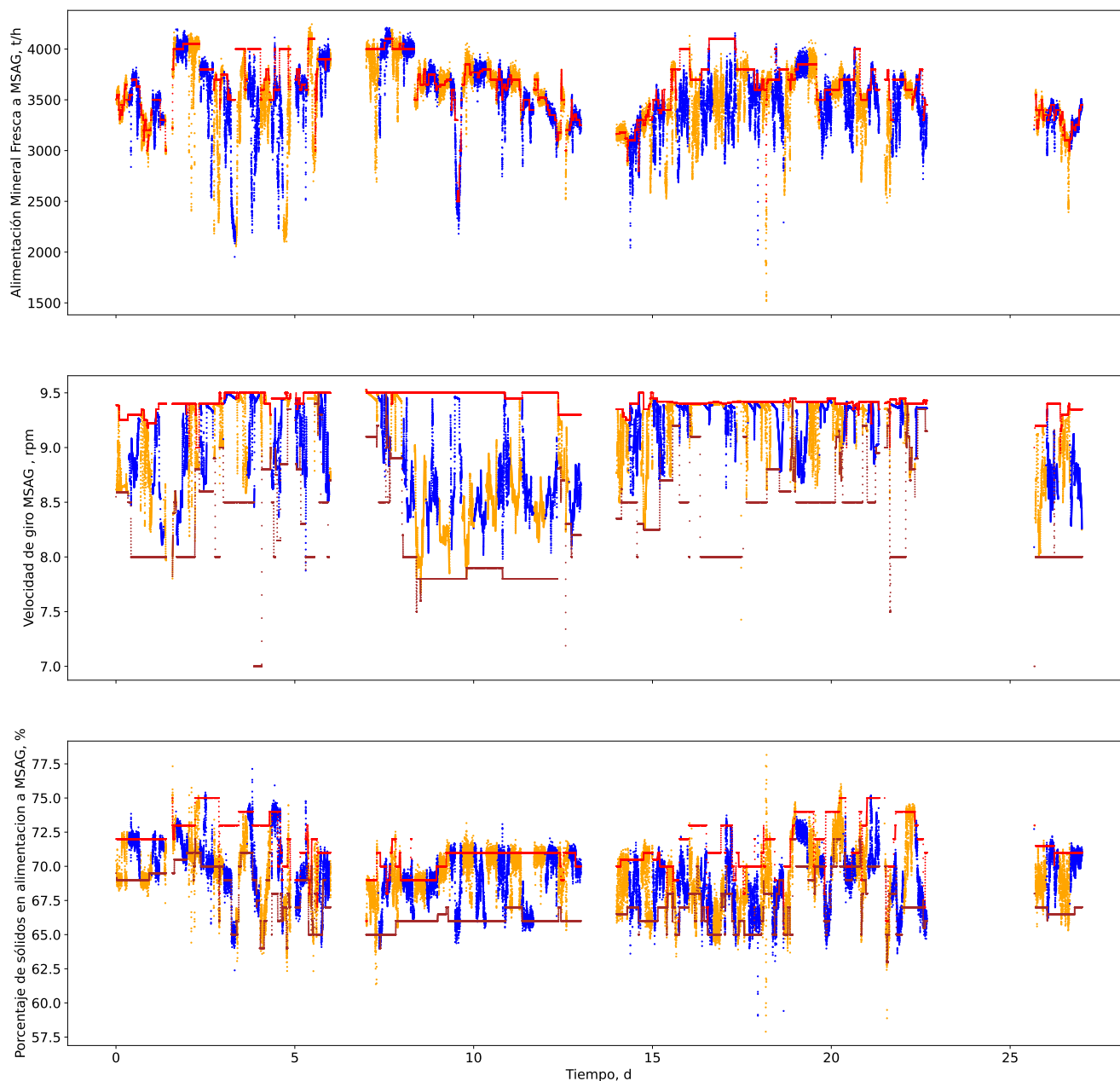


Figura 5.17: Serie de tiempo para variables manipuladas en PP

5.4.1 Velocidad de Giro Molino:

La velocidad de giro del molino es presentada de manera gráfica en la Figura 5.18, es posible apreciar una alta variabilidad del límite bajo de velocidad para ambas aplicaciones, por otra parte, el límite alto de velocidad presenta una menor variación.

Se observa además que la velocidad de giro se mantiene frecuentemente dentro de los límites de control impuestos.

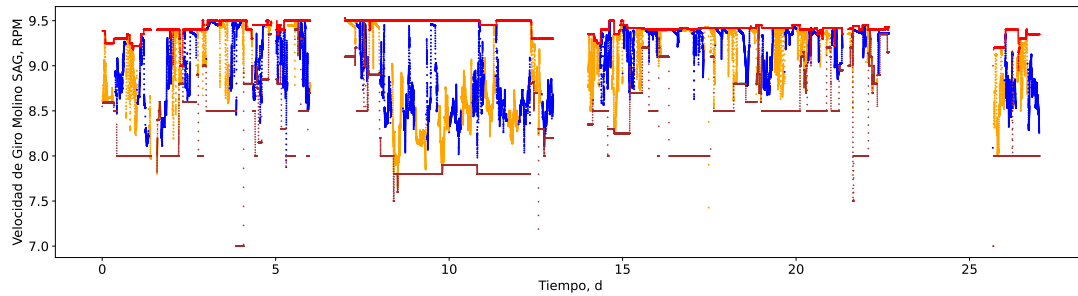


Figura 5.18: Velocidad de giro MSAG

En la Figura 5.19, se presenta un histograma comparativo de la velocidad de giro del molino para ambas aplicaciones.

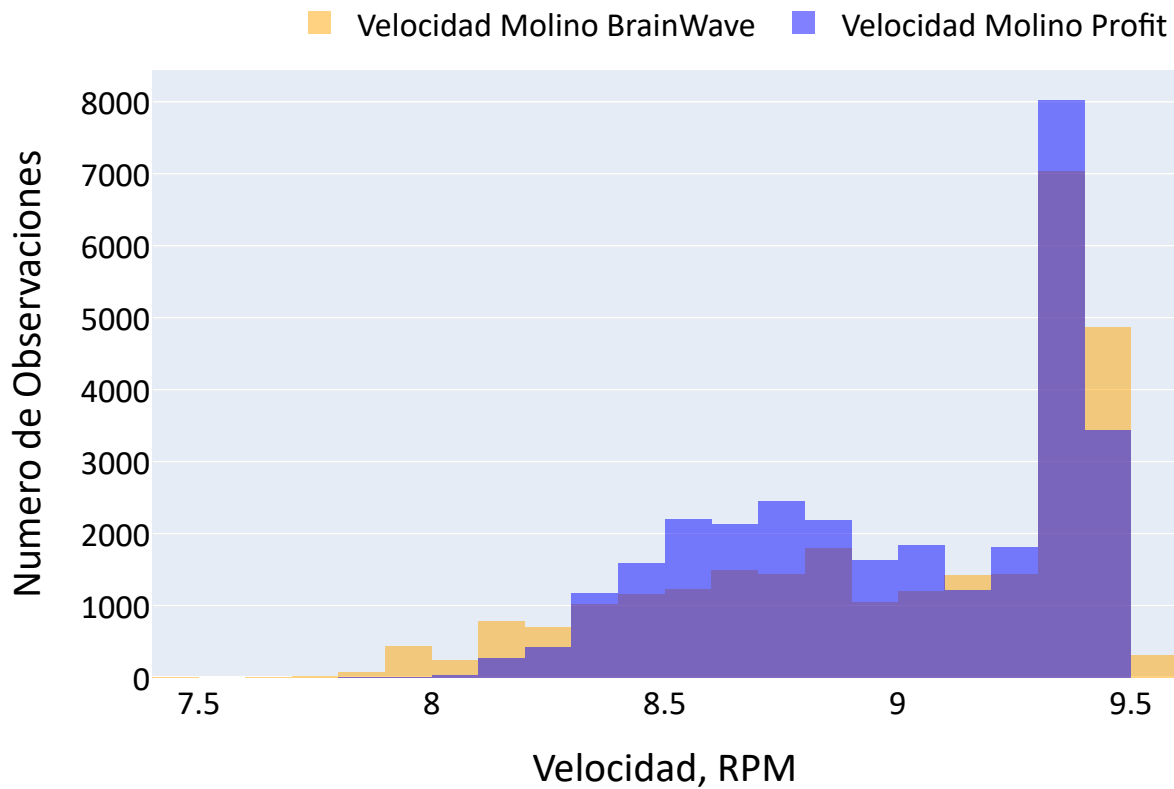


Figura 5.19: Histograma comparativo velocidad de giro MSAG

En la Figura 5.19 es posible notar que la aplicación BrainWave tiene un rango más amplio para el control de la variable velocidad de giro. Para analizar si los extremos de control corresponden a condiciones que superan los límites de control se presentan la Figura 5.20 y en la Figura 5.21, donde se aprecia en ambas figuras que la aplicación BrainWave excede con mayor frecuencia y magnitud los límites de control.

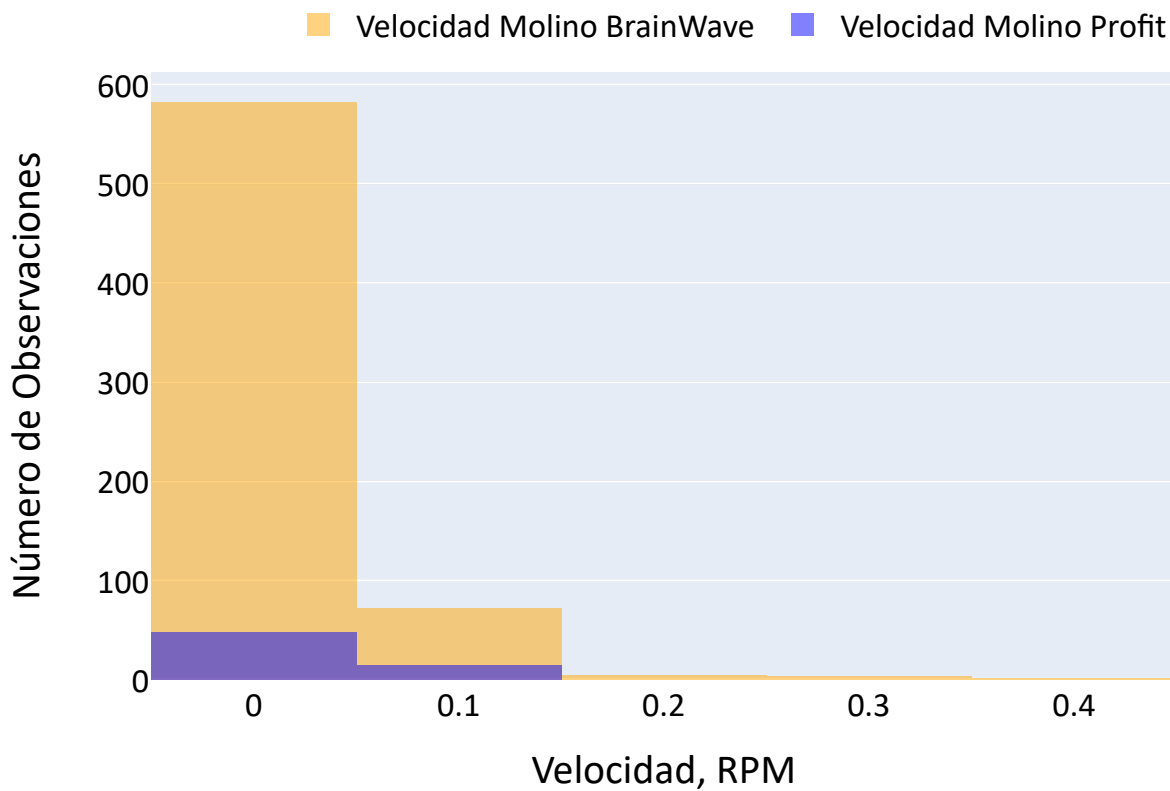


Figura 5.20: Histograma comparativo velocidad de giro MSAG sobre HL

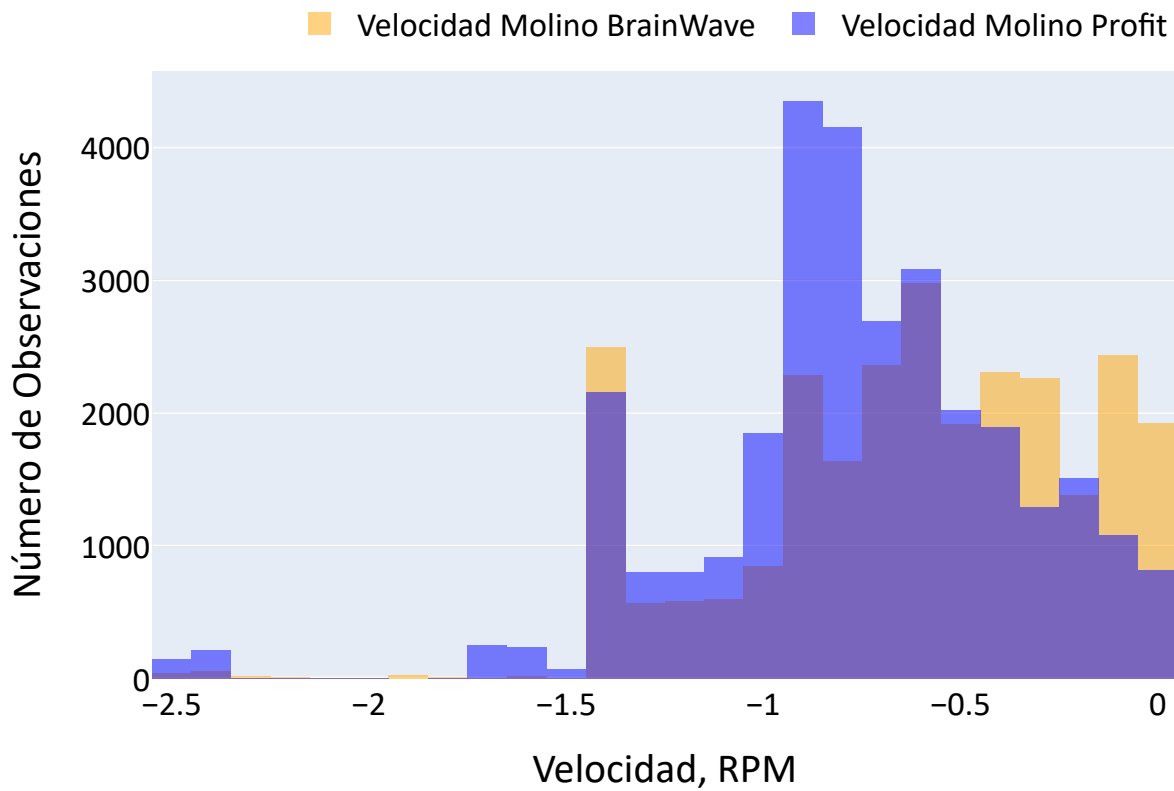


Figura 5.21: Histograma comparativo velocidad de giro MSAG

Adicionalmente la variable velocidad de giro se encuentra dentro del rango de operación, la aplicación BrainWave estuvo en esta condición 91,1% del tiempo, mientras que la aplicación Profit el 99,5% del mismo.

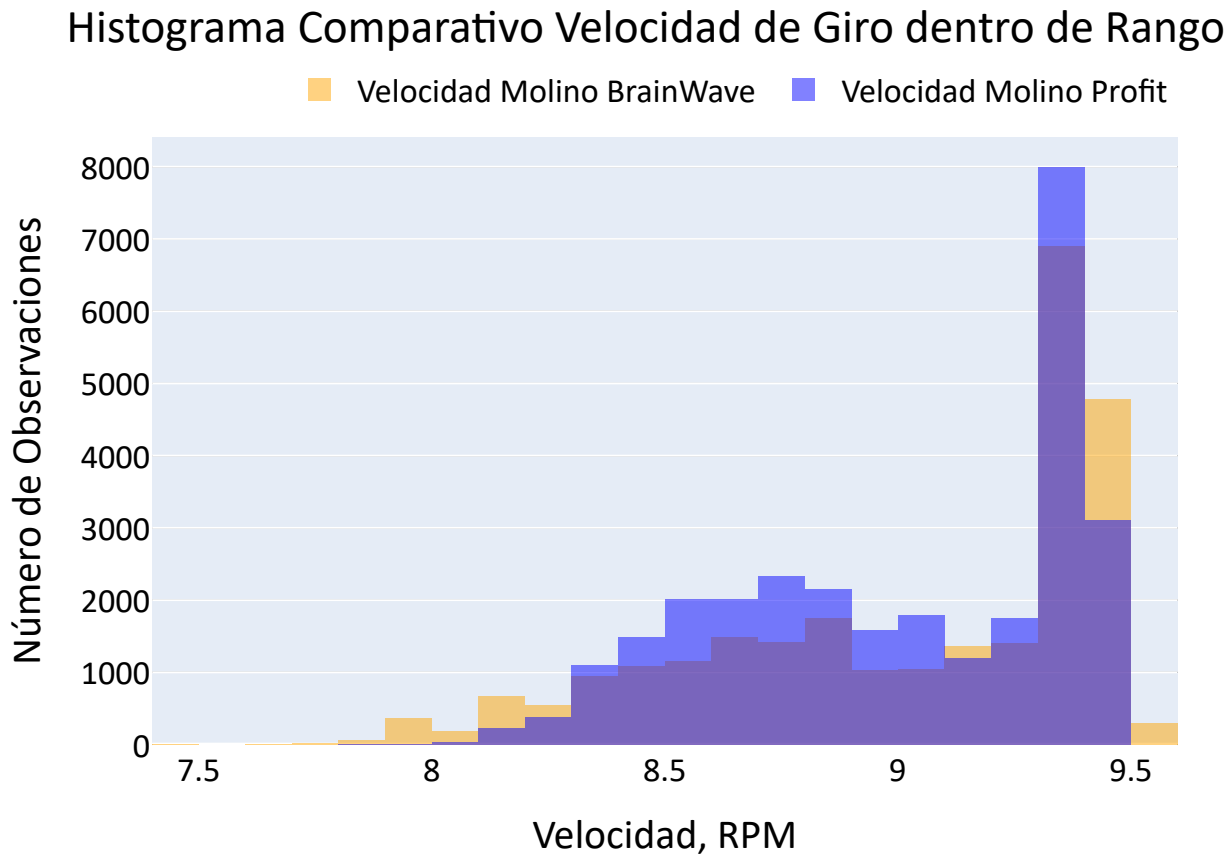


Figura 5.22: Histograma comparativo velocidad de giro dentro de rango MSAG

Al ser la velocidad de giro una variable manipulada, las aplicaciones de control ejercen acciones de control directas que respetan los límites de control, adicionalmente se observó que los eventos en que se exceden límite inferior LL y límite superior HL son en magnitud cercanos al 1% y en frecuencia cercano a 9.9% y 0.5% para BrainWave y Profit respectivamente.

5.4.2 Porcentaje de sólidos:

Se observó una alta variabilidad del porcentaje de sólidos, presentado en la Figura 5.23, se observó una alta variabilidad tanto de los límites como del valor de la variable para ambas aplicaciones.

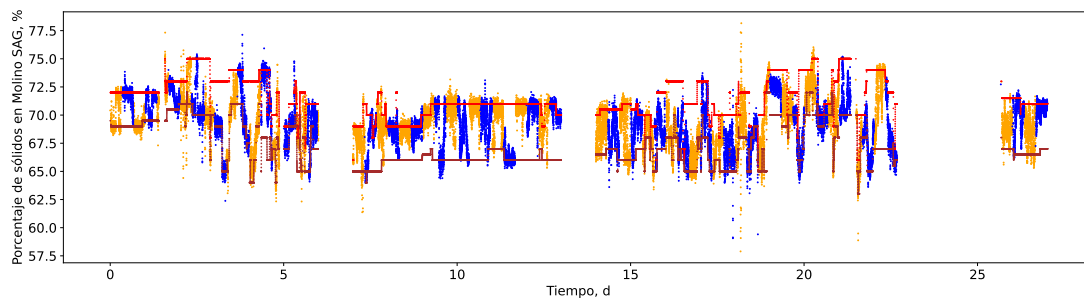


Figura 5.23: Porcentaje de solidos en MSAG

Si bien los límites presentaron una alta variabilidad, incluso el límite bajo llegó a tomar valores cercanos al límite alto, la mayoría del tiempo se mantiene una diferencia entre estos valores que permitió ejercer acciones de control, en la Figura 5.24 se puede ver que la diferencia entre los límites es por lo general mayor a 4, siendo la diferencia media igual 4.2% para ambas aplicaciones.

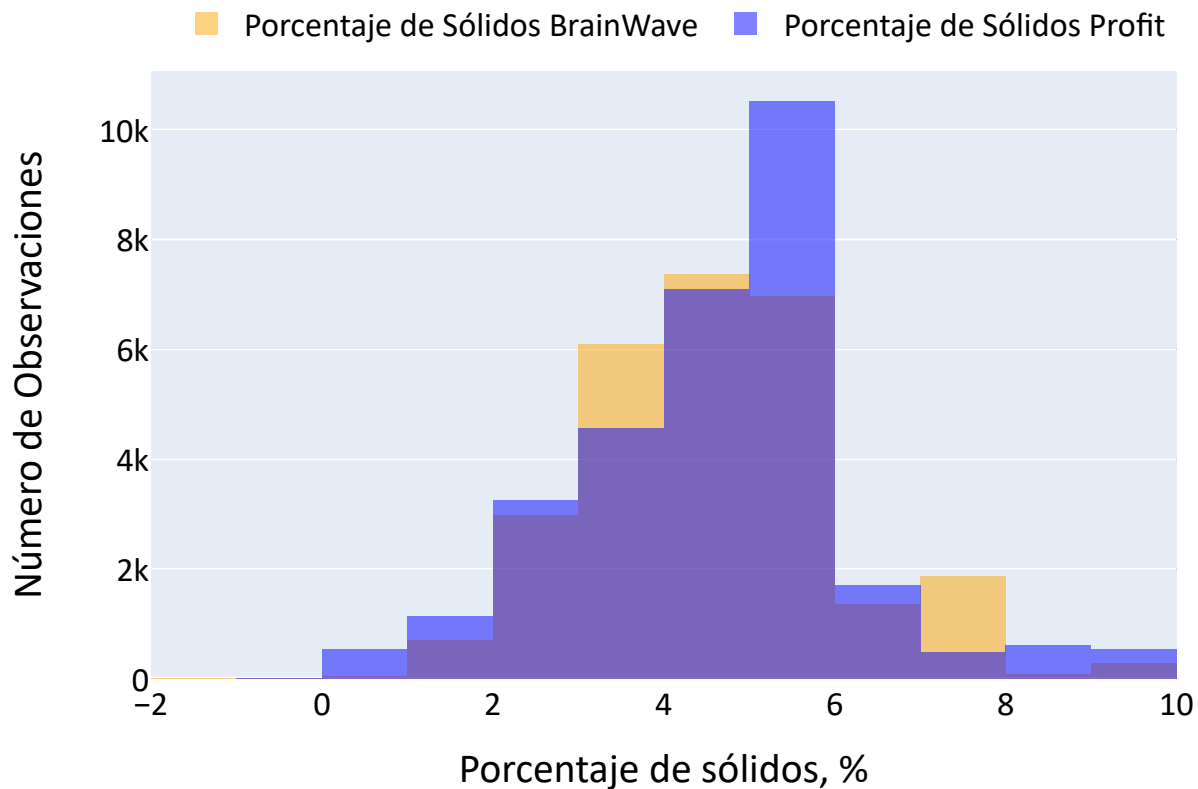


Figura 5.24: Histograma comparativo diferencia de límites porcentaje de solidos

La variable porcentaje de solidos es controlada mediante un controlador retro alimentado para ambos grupos y los tiempos de resta de este controlador y el efecto que puede tener una modificación del valor determinado por alguna de las aplicaciones el mismo, se evaluó la precisión de la aplicación para solicitar tal cambio al controlador retro alimentado y el efecto que este cambio pudo o no tener sobre los criterios finales de evaluación.

5.4.3 Alimentación Fresca de Mineral:

El rendimiento del molino SAG es graficado como serie de tiempo en la Figura 5.25 para ambas aplicaciones. Se puede observar una alta variabilidad del límite superior HL contrario al límite inferior que se mantiene en el valor 1500 t/h la mayor parte del tiempo para solo aumentar en eventos específicos. La variable rendimiento del molino tuvo también una alta variabilidad en ambas aplicaciones, siendo la desviación estándar 346 t/h y 335 t/h para BrainWave y Profit respectivamente, este y otros valores estadísticos son presentados en la Tabla 5.2.

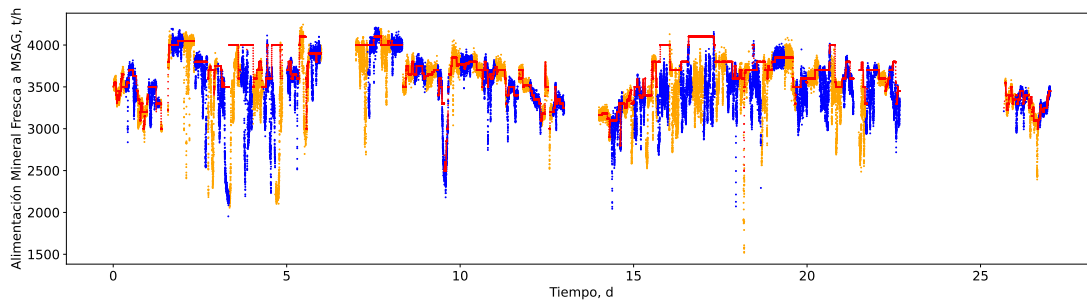


Figura 5.25: Serie de tiempo para variable manipulada alimentación fresca a MSAG

De la Tabla 5.2 se observa que el rendimiento medio para la aplicación Brainwave fue de 3510 t/h, mientras que para Profit fue de 3483 t/h, aunque la aplicación Profit logró mantener la variable en rango un 4% más del tiempo y logró disminuir la desviación estándar del rendimiento en 11 t/h comparado con la aplicación BrainWave.

Tabla 5.2: Estadísticos de Rendimiento SAG para ambas aplicaciones

Rendimiento Molino SAG	Aplicación BrainWave	Control Profit	Diferencia
Promedio,t/h	3510	3483	-27
Desviación Estándar,t/h	346	335	-11
Máximo valor, t/h	4244	4209	-35
Tiempo dentro de rango, %	67	71	+4

El objetivo de control de Profit fue disminuir la variabilidad de las variables controladas y la optimización del rendimiento como resultado de ello. La optimización se realizó cuando todas

las restricciones se cumplieron, es decir todas las variables estuvieron dentro de su rango. Luego el optimizador ejerció acciones de control para llevar el rendimiento al máximo permitido por el límite superior.

En la Figura 5.26 se muestra la diferencia entre el HL y el valor del rendimiento, de esta manera es evidente que para ambos casos existe una diferencia, la cual debe ser llevada a cero para maximizar el rendimiento y respetar las restricciones del proceso. Los valores positivos son excesos por sobre el limite alto, mientras que los valores negativos son cuanto por debajo del HL se encuentra el rendimiento.

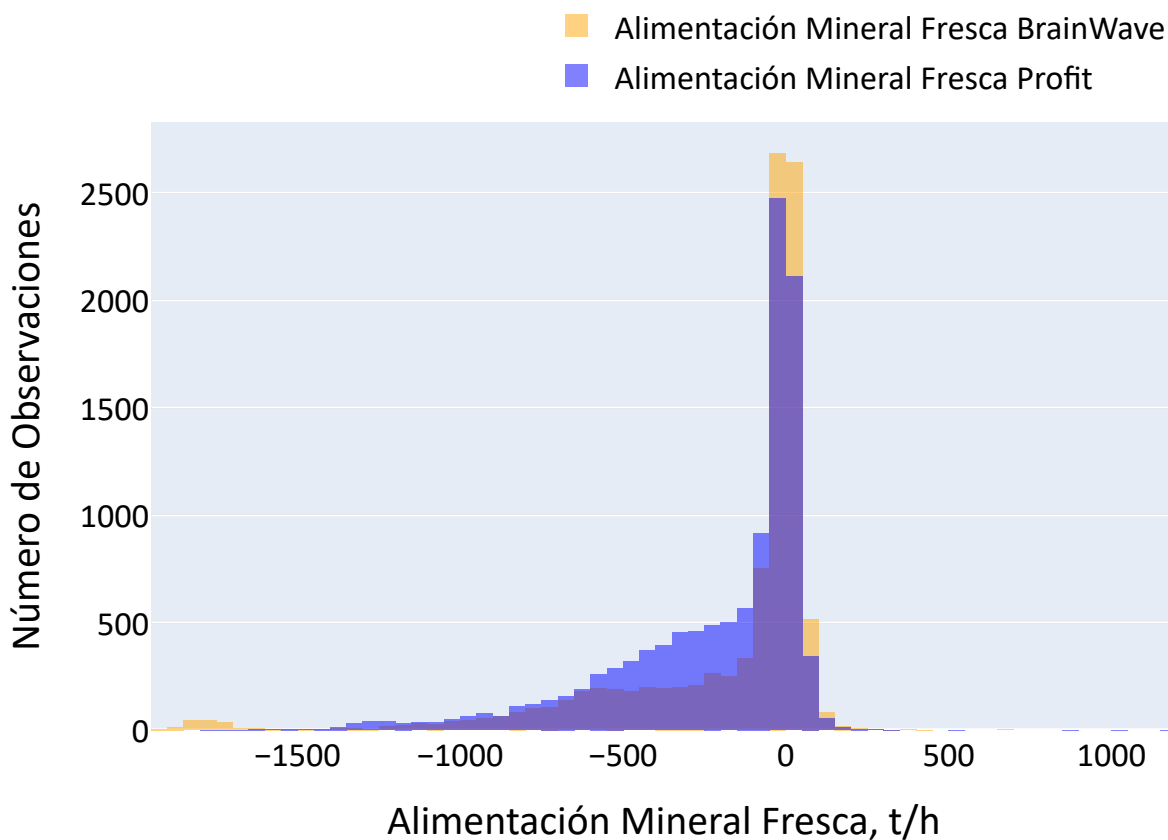


Figura 5.26: Diferencia rendimiento instantáneo y HL

De esta manera la media de la diferencia para BrainWave fue -146 t/h, mientras que para la aplicación Profit fue -173 t/h. Lo que concuerda con que la diferencia de las medias del rendimiento. Así se descartó que la diferencia de las medias sea debido a que los límites altos fueron distintos, sino que fue debido a la capacidad de las aplicaciones de acercarse al mismo.

Como se presenta en la Tabla 5.3, la optimización del rendimiento se realizó durante el 90% del tiempo correspondiente al control Profit, lo que corresponde a 236,3 horas de las 262,5 horas

total en las que Profit controló el proceso.

Tabla 5.3: Estadísticos Modo de Control aplicación Profit

Modo de Control	Tiempo en Modo de Control, %
Optimizando	90
Control OK	8
Manejando Restricciones	2

5.5 Análisis de variables controladas:

Las variables controladas difieren para los casos de ambas aplicaciones, la aplicación BrainWave utilizó la variable velocidad de giro MSAG para evitar que el torque exceda el valor 105% de manera activa, mientras que la aplicación Profit no mantiene la variable torque dentro de rango debido a que no había un instrumento que midiera el torque del MSAG, sino que el torque fue calculado a partir de otras variables operacionales, de hecho como se puede apreciar en la Figura 5.27, el torque se mantuvo dentro de los límites la mayor parte del tiempo y por ende su valor no limitó ni restringió la toma de acción por parte de las aplicaciones.

En la Figura 5.27, se presentan de manera gráfica las variables controladas como serie de tiempo, siguiendo el mismo código de color que en la etapa de filtros, el color azul corresponde a control de aplicación Profit y el color naranja a control de aplicación BrainWave. De manera general es posible apreciar que las variables controladas presentaron una alta dispersión en el tiempo durante el desarrollo de las pruebas piloto, tanto para la aplicación Profit como para la aplicación BrainWave, datos azules y naranjos respectivamente.

Se aprecia que los valores de las variables controladas permanecen en rango gran parte del tiempo, sin embargo, presentan eventos que exceden los límites, ya sean altos (HL) o bajos (LL) para ambas aplicaciones.

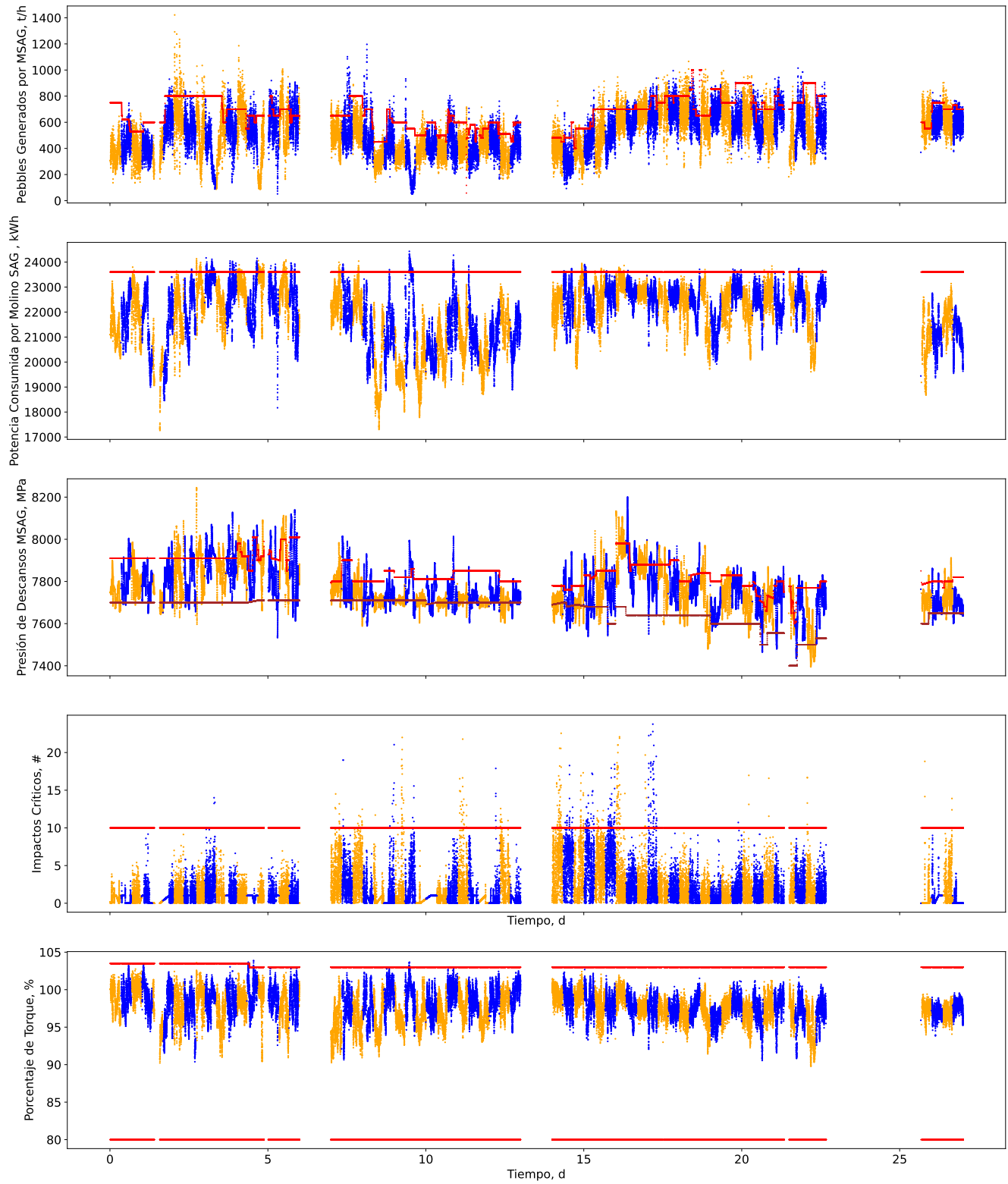


Figura 5.27: Variables controladas para periodo de PP

5.5.1 Pebbles Generados:

En la Figura 5.28 se presenta la serie de tiempo para la variable pebbles generados para ambas aplicaciones, se observa que los limites de control fueron variados y que se presentaron eventos en los que este límite de control fue sobrepasado por ambas aplicaciones.

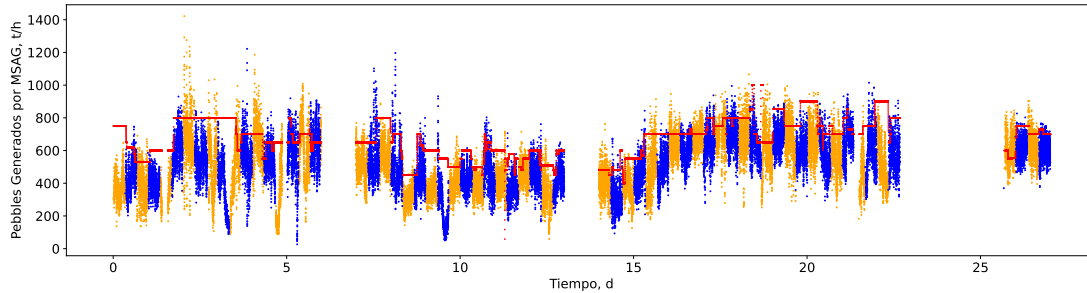


Figura 5.28: Serie de tiempo para variable controlada pebbles generados

La Tabla 5.4 muestra mayor detalle en cuanto a indicadores estadísticos e indica que la variable presenta valores de media mayores para la aplicación Profit, pero menores valores de desviación estándar, además que la variable se encuentra dentro del rango de control durante 6,9 % más del tiempo.

Tabla 5.4: Estadísticos de Rendimiento SAG para ambas aplicaciones			
Pebbles Generados Molino SAG	Aplicación BrainWave	Control Profit	Diferencia
Promedio,t/h	512,1	525,2	+13,1
Desviación Estándar,t/h	163,7	145,5	- 18
Máximo valor, t/h	1421,7	1196,6	-225,1
Tiempo dentro de rango, %	85,9	92,8	+ 6,9

5.5.2 Potencia Consumida Molino SAG:

En la Figura 5.29 se presenta la potencia consumida por el molino SAG como serie de tiempo, además del límite alto para ambas aplicaciones. El límite de Potencia es siempre 23,6 MW para ambas aplicaciones. Se observó una alta variabilidad para ambas aplicaciones, ambos pasaron límite alto de control de manera ocasional.

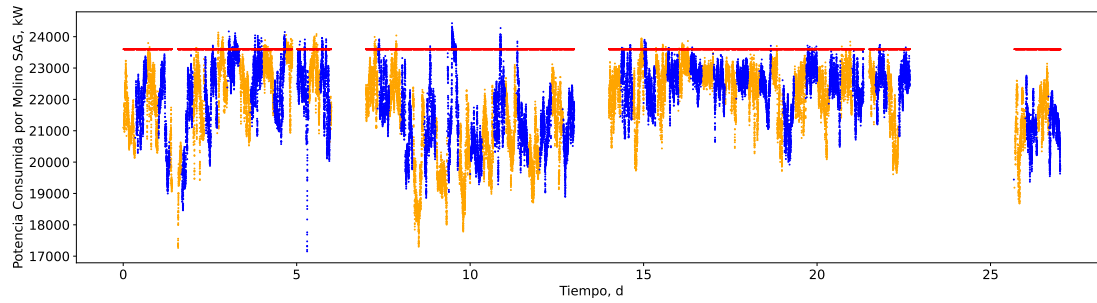


Figura 5.29: Potencia Consumida por MSAG

Los principales estadísticos se presentan en la Tabla 5.5, la aplicación Profit permitió operar más cerca de la restricción del proceso, mientras que el tiempo de cumplimiento disminuyó un 0.9%.

Tabla 5.5: Estadísticos de Potencia Consumida para ambas aplicaciones

Potencia Consumida Molino SAG	Aplicación BrainWave	Control Profit	Diferencia
Promedio, MW	21,80	21,95	+0,15
Desviación Estándar, MW	1,26	1,02	-0,24
Máximo valor, MW	24,13	24,43	+0,3
Tiempo dentro de rango, %	98,7	97,8	-0,9

En la Figura 5.30, se presenta un histograma comparativo del consumo de potencia para ambas aplicaciones, es posible observar una mayor cantidad de eventos para la aplicación BrainWave en el rango de valores menores (18 MW a 20 MW) y una acumulación mayor de valores para ambos casos en el rango superior de valores (22 MW a 23,5 MW).

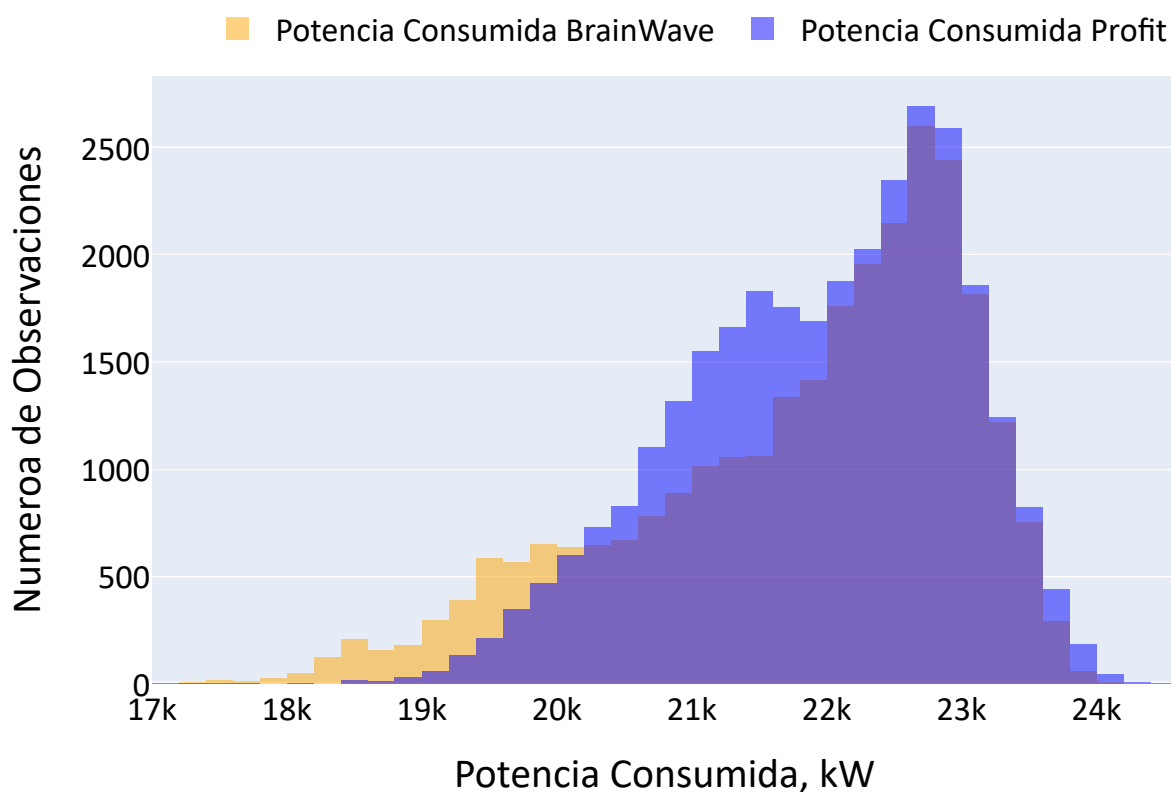


Figura 5.30: Histograma comparativo potencia consumida MSAG

El consumo de potencia estuvo restringido por la potencia instalada, de esta manera sobrepasar el límite alto de potencia consumida pudo provocar caídas de voltaje en la red y comprometer la continuidad operacional del proceso y otros procesos que requirieron del mismo suministro eléctrico. Para tal análisis se presenta en la Figura 5.31, el exceso en el consumo de potencia.

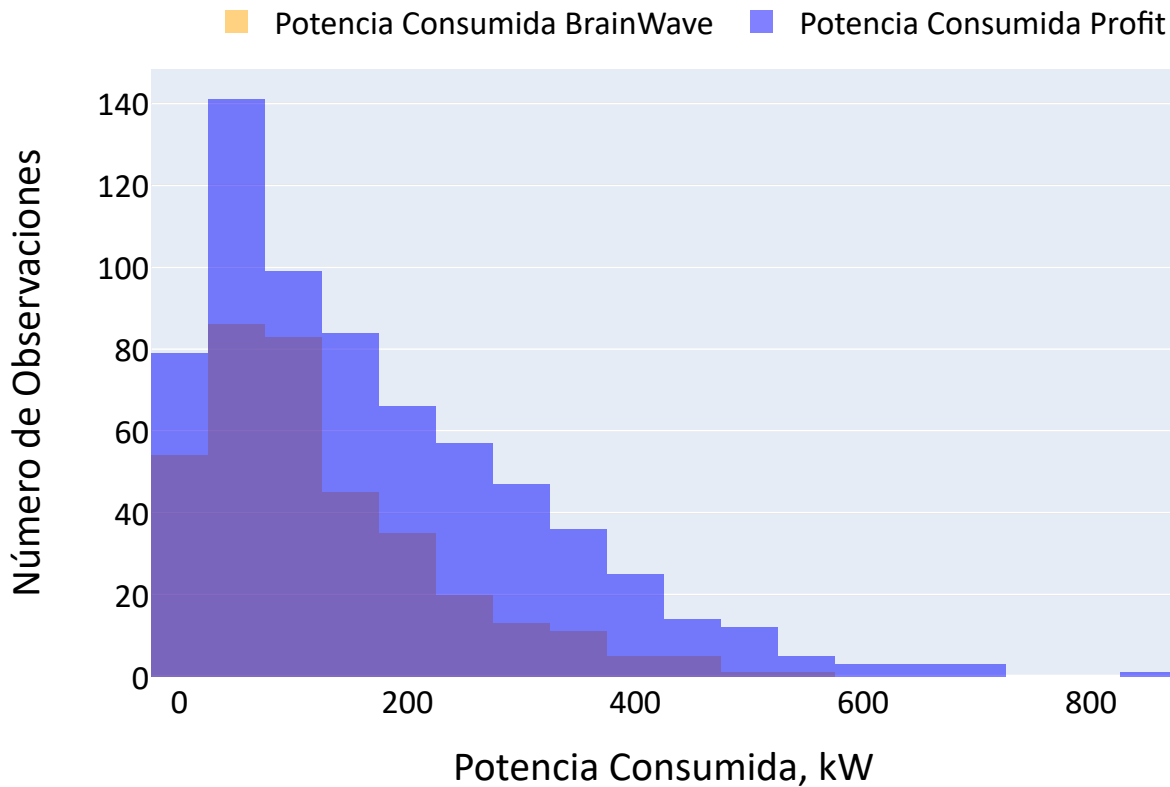


Figura 5.31: Histograma comparativo de potencia consumida sobre HL

En la Figura 5.31 se pudo ver que la aplicación Profit presentó mayor cantidad de eventos en los que el consumo de potencia fue mayor que el límite alto establecido, tanto en magnitud de los eventos como en la cantidad de estos cuando se compara con el control ejercido por BrainWave. La duración de los eventos de exceso de potencia es de 5.6 horas para Profit y de 3 horas para BrainWave. Estos valores equivalen al 2,1% y 1,9% del tiempo de prueba piloto para cada aplicación.

5.5.3 Presión de Descansos:

En la Figura 5.32 se presenta la variable Presión de Descansos como serie de tiempo durante el periodo de prueba piloto.

A partir de los resultados presentados en la Figura 5.32, es posible apreciar que la presión de los descansos presenta una alta variabilidad para ambas aplicaciones y un rango de operación entre 7700 y 8200 MPa.

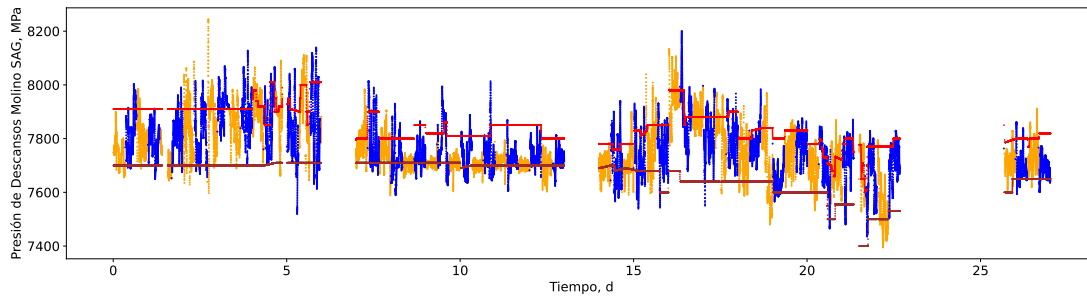


Figura 5.32: Presión de descansos MSAG para periodo de PP

En la Tabla 5.6 se presentan los principales estadísticos para la variable Presión de Descansos de Molino SAG. A partir del gráfico se destaca el aumento en el promedio de la presión de descanso que aun siendo una condición más exigente para el control logra disminuir la variabilidad de esta variable.

Adicionalmente aumento en un 6% el tiempo dentro del rango, permitió utilizar el grado de libertad otorgado por esta condición en la optimización de los procesos.

Tabla 5.6: Estadísticos de Presión de Descansos ambas aplicaciones

Presión de Descansos Molino SAG	Aplicación BrainWave	Aplicación Profit	Diferencia
Promedio,MPa	7763	7768	+5
Desviación Estándar,MPa	106	101	-5
Máximo valor, MPa	8244	8200	-44
Tiempo dentro de rango, %	67	73	+6

La Figura 5.33 permite apreciar que la distribución de los valores entre las opciones de control es bastante similar, sin embargo y debido a la gran variabilidad de los límites de control de esta variable es necesario considerar la diferencia entre el límite alto y el valor de la variable de manera instantánea.

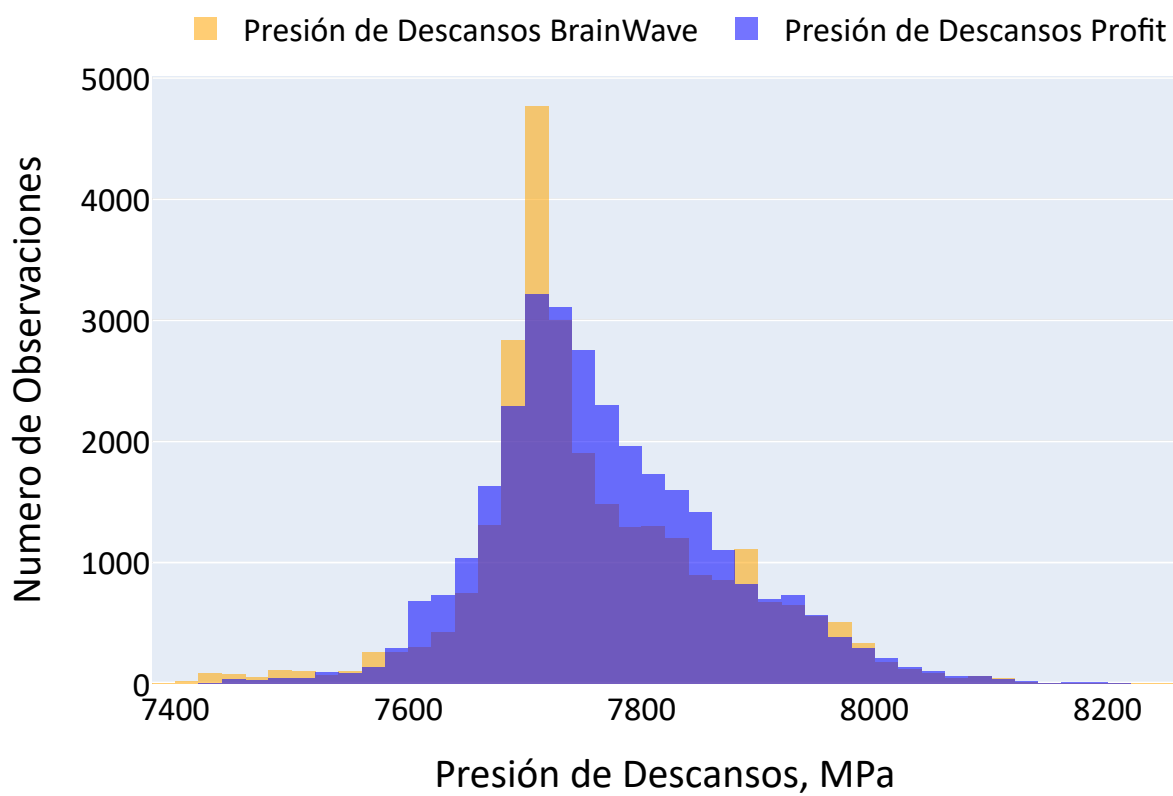


Figura 5.33: Histograma comparativo presión de descansos MSAG

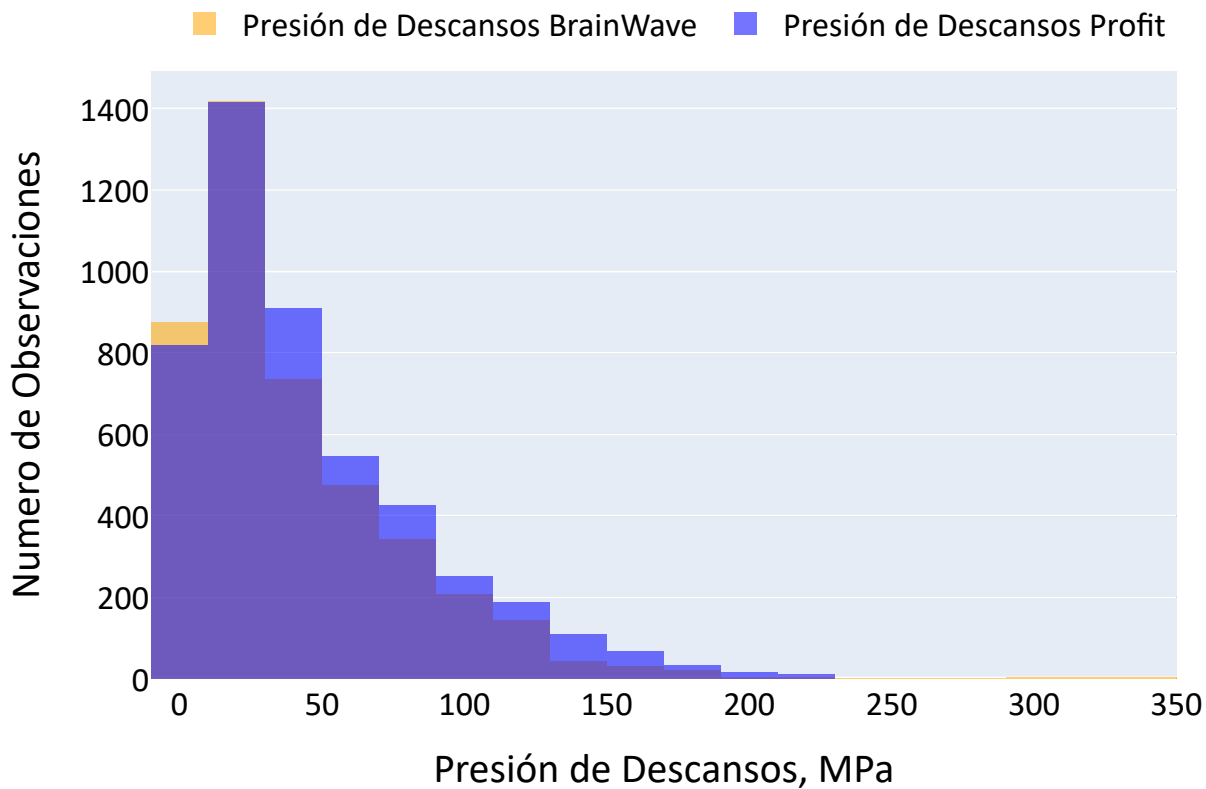


Figura 5.34: Histograma comparativo presión de descansos MSAG sobre HL

En la Figura 5.34, se aprecia que para ambas aplicaciones se produjeron excesos sobre el límite alto de control con similar frecuencia y magnitud, siendo los excesos menores a 50 MPa los valores más frecuente lo que evidencia que ambas aplicaciones fueron capaces de controlar el proceso y mantener esta variables dentro de los rangos de control.

5.5.4 Impactos Críticos:

La serie de tiempo de Impactos Críticos se presenta en la Figura 5.35, se aprecia que ambos turnos tuvieron una tendencia a valores bajos de impactos críticos con alzas ocasionales en los valores, lo que se puede apreciar de manera adicional en la Figura 5.36.

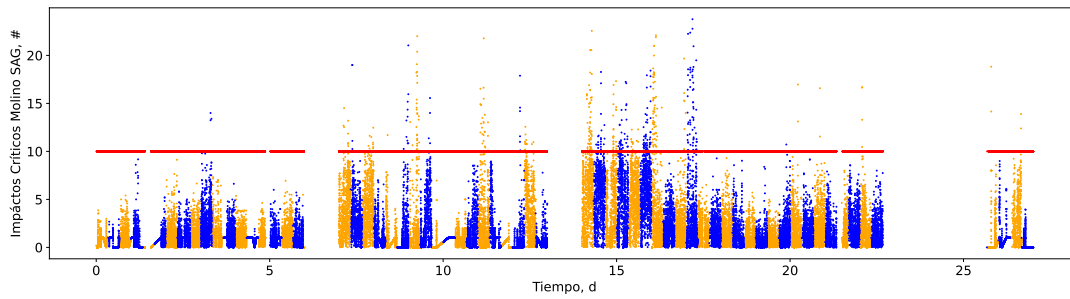


Figura 5.35: Impactos críticos MSAG

El objetivo de control para la variable Impactos Críticos, fue mantener el valor bajo los 10 impactos, esta variable representa el impacto entre una bola de acero con los revestimientos del molino, la presencia de Impactos Críticos disminuye la efectividad de la molienda por impacto, disminuyendo la probabilidad de fractura de las partículas que requieren este tipo de mecanismo de manera que repercute de manera negativa en el proceso de molienda, aumentando la presión de descansos y disminuyendo la alimentación a molino SAG, adicionalmente el impacto critico desgasta los lifters y los lifters desgastados tiene una menor capacidad de levante, lo que repercute de manera negativa en la capacidad de procesamiento del molino SAG.

Por otra parte el impacto crítico produce un desgaste mayor de los revestimientos, requiriendo mantenciones más seguidas, lo que implica detener el equipo por periodos superiores a las 24 hr para realizar el recambio de estos. De manera adicional una cantidad excesiva de impactos críticos puede producir agrietamiento y posterior fractura de estos, de esta manera comprometer la estabilidad operacional del proceso y la planta.

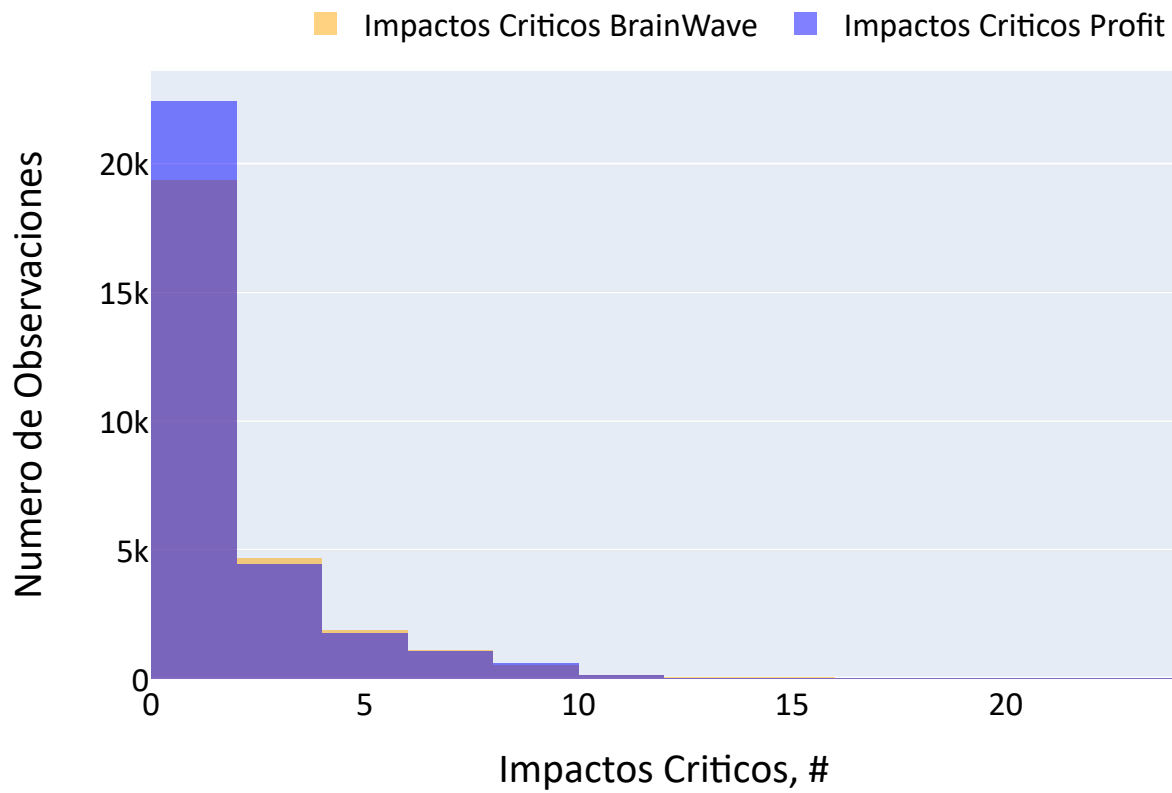


Figura 5.36: Histograma comparativo impactos críticos

Debido a lo antes descrito, es necesario realizar un análisis de los valores que están por sobre el HL, de esta manera en la Figura 5.37 se presenta un histograma comparativo de los eventos en que se superan 10 Impactos Críticos.

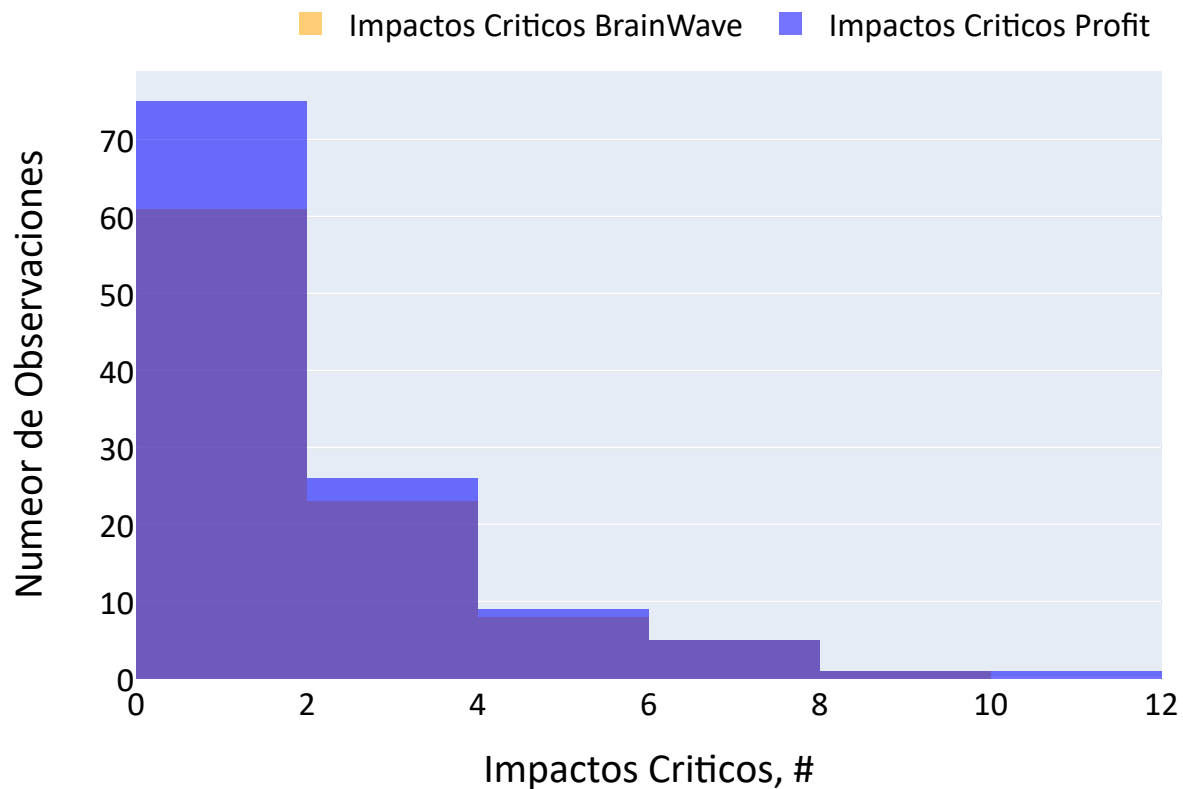


Figura 5.37: Histograma comparativo impactos críticos sobre HL

El exceso de impactos críticos por sobre el límite alto de la variables es presentado en la Figura 5.37 se observa que ambas aplicaciones presentaron una cantidad similar de impactos críticos tanto en magnitud como en frecuencia, la variable se mantiene dentro del rango el 99.3% del tiempo para Profit y 99.0% para BrainWave.

Esto demuestra que ambas aplicaciones mantuvieron un buen control de esta variable controlada y aunque en algunos eventos se excedió el límite alto, fueron eventos poco frecuentes.

5.5.5 Porcentaje de Torque:

En la Figura 5.38 se presenta la serie de tiempo para la variable porcentaje de torque, de la cual se aprecia que la variable torque permaneció dentro de los rangos de control la mayoría del tiempo para ambas aplicaciones y que solo en un evento determinado de exceso de gruesos se llegó a sobre pasar el límite superior.

Como se menciono anteriormente, la variable torque no es una variable medida, ya que es

obtenida con un calculo y es solo incluida en la estrategia de control de la aplicación BrainWave por lo que para la aplicación Profit solo apareció como un enclavamiento desde el DCS y que se activa en circunstancia de exceso de 105% por 30 segundos o más como parte del sistema de seguridad.

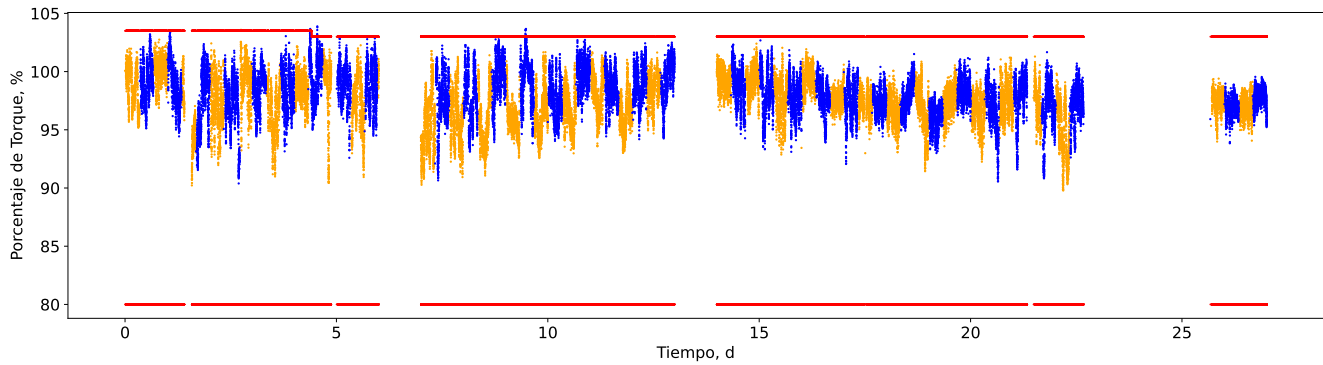


Figura 5.38: Serie de tiempo de variable porcentaje de torque

En la Tabla 5.7 se presentan los valores estadísticos principales para la variable porcentaje de torque para ambas aplicaciones, de la tabla se nota que ambas aplicaciones presentaron valores similares para ambas variables en cuanto a medidas de tendencia central, dispersión y tiempo dentro de rangos.

Tabla 5.7: Estadísticos de Porcentaje de Torque ambas aplicaciones

Porcentaje de Torque Molino SAG	Aplicación BrainWave	Aplicación Profit	Diferencia
Promedio, %	97,3	98,1	+1
Desviación Estándar, %	2,0	1,9	-0,1
Máximo valor, %	103,5	103,8	+0,3
Tiempo dentro de rango, %	99.938	99.996	+0,058

5.6 Análisis de perturbaciones medidas:

En la Figura 5.39, se presentan las variables de perturbación medida como serie de tiempo. Se nota que la variable perturbación tuvo valores desde 10% a 43% durante todo el periodo de la prueba piloto, no así la variable pebbles recirculadas, la cual presenta valores entre 0 y 850 t/h de manera intermitente, donde el valor mas frecuente fue 0.

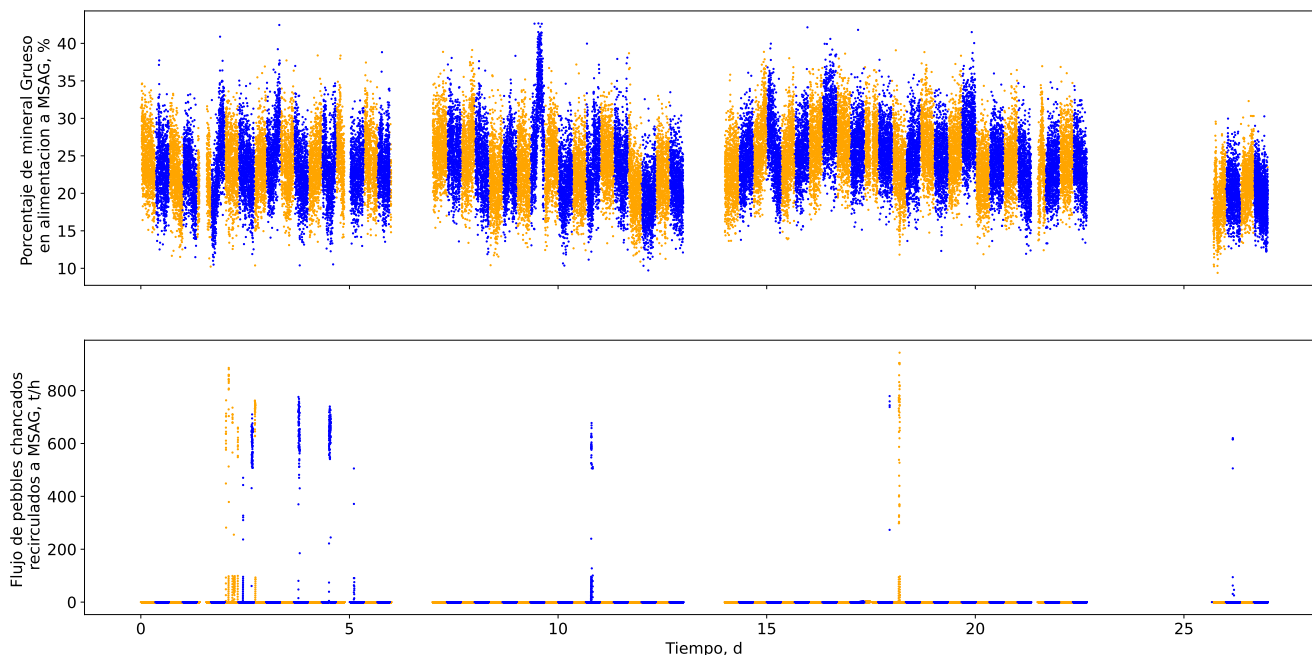


Figura 5.39: Serie de tiempo de variables perturbación en PP

5.6.1 Porcentaje de Gruesos (4”) en Alimentación:

La serie de tiempo para Porcentaje de Gruesos se presenta en la Figura 5.40, donde se aprecia que la variable presentó valores y tendencias similares para ambas aplicaciones de control.

Los resultados presentados en la Figura 5.41, evidencian que los valores y frecuencias para ambas aplicaciones son similares.

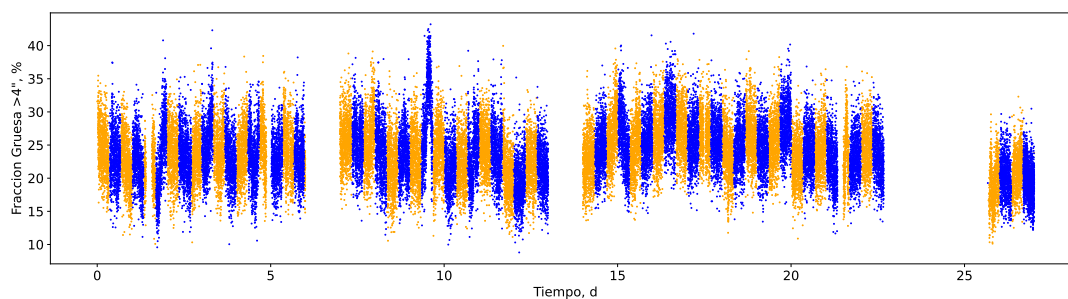


Figura 5.40: Porcentaje de alimentación mayor a 4 pulgadas

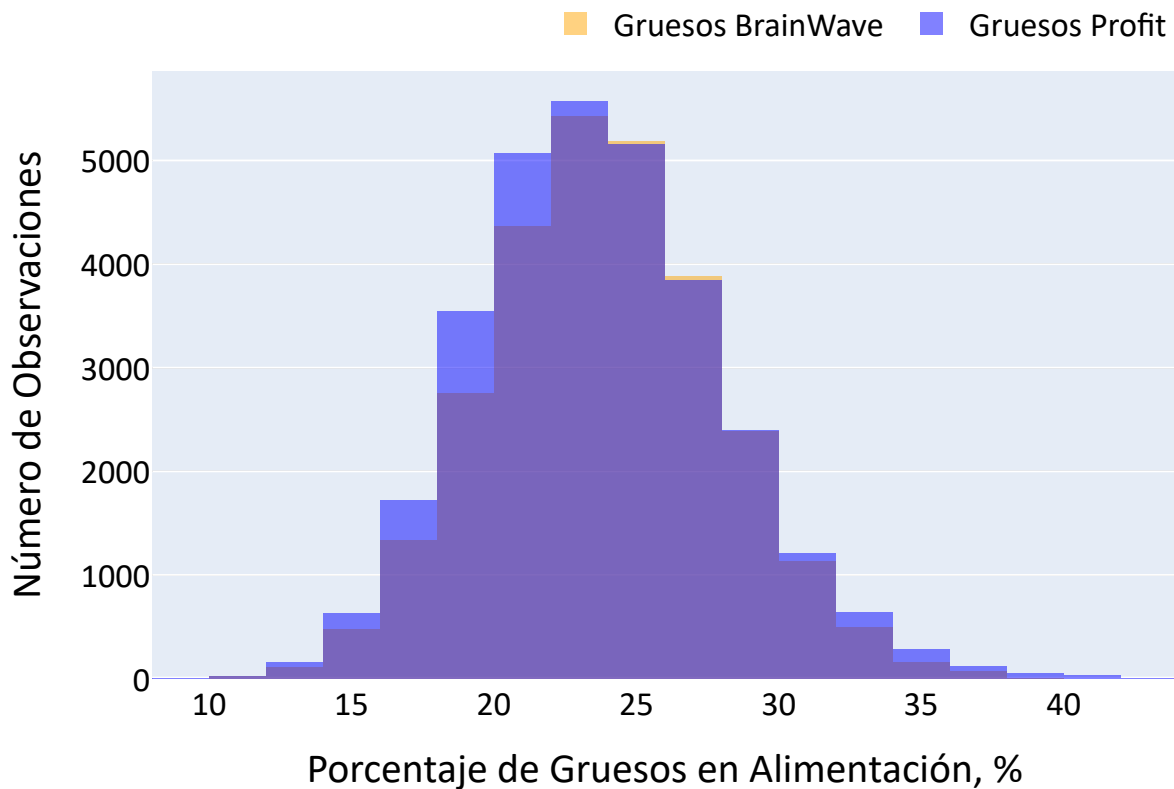


Figura 5.41: Distribución de fracción mineral gruesa para ambas aplicaciones

En la Tabla 5.8 se presentan los principales estadísticos para la variable porcentaje de gruesos para ambas aplicaciones durante el periodo. De esta se puede notar que ambas aplicaciones presentaron valores similares tanto en tendencia central como en dispersión. Cabe recordar que la variable Porcentaje de Gruesos no tiene un rango de control debido a que es una variable de perturbación.

Tabla 5.8: Estadísticos de Porcentaje de Gruesos ambas aplicaciones

Porcentaje de Gruesos Molino SAG	Aplicación BrainWave	Aplicación Profit	Diferencia
Promedio, %	23,7	23,9	+0,2
Desviación Estándar, %	4,0	4,3	+0,3
Máximo valor, %	39,1	42,6	-3,5

5.6.2 Pebbles Recirculados:

De la Figura 5.39 se aprecia que la variable pebbles recirculados presentó un comportamiento frecuentemente cero y en algunos instantes específicos un valor distinto mayor a 0 y hasta 850 t/h. Esto es debido a que la planta operó normalmente con pebbles en avance y en ocasiones específicas fue necesario operar con pebbles recirculados.

En la Figura 5.42, se presenta un histograma comparativo de las distribución de pebbles recirculados mayores a 150 t/h, esto para visualizar de mejor manera los eventos en los que ocurrió recirculación de pebbles. De la Figura 5.42 se observa que los eventos de recirculación ocurrieron con mas frecuencia para la aplicación Profit con frecuencia cercana a 80 observaciones en el rango de 500 a 700 t/h, mientras que BrainWave tuvo un mayor rango de valores de recirculación de pebbles de 600 a 850 t/h, pero con una menor frecuencia. Como se puede ver en la Tabla 5.9, las medias de ambas aplicaciones para esta variable son similares, aunque el tiempo de recirculación de pebbles es cercano al 1% para ambos casos lo que no permite obtener mayores conclusiones.

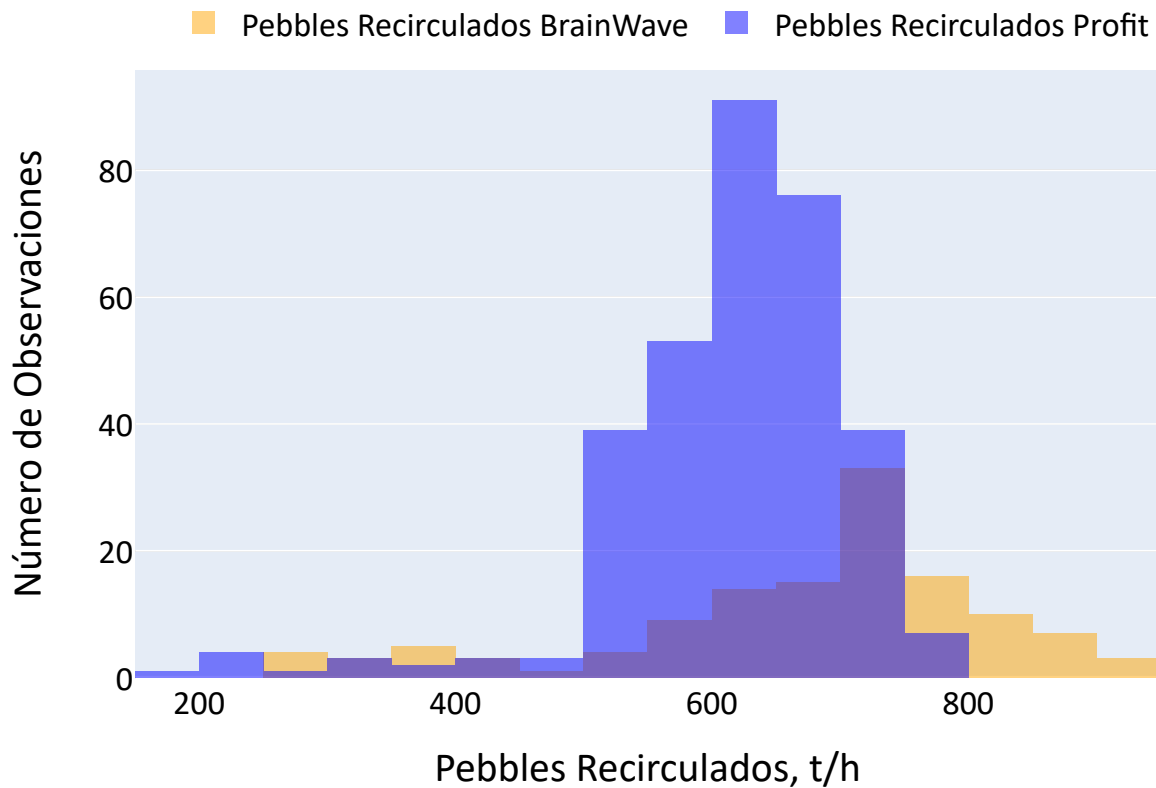


Figura 5.42: Histograma comparativo pebbles recirculados

Tabla 5.9: Estadísticos de Pebbles Recirculados ambas aplicaciones

Pebbles Recirculados Molino SAG	Aplicación BrainWave	Aplicación Profit	Diferencia
Promedio,t/h	672	616	-56
Desviación Estándar,t/h	147	91	-0,1
Máximo valor,t/h	943	779	-164
Tiempo Recirculando Pebbles, %	1,06	0,46	+0,6

5.7 Análisis Eficiencia Energética:

El análisis de eficiencia energética para ambas aplicaciones utilizó los resultados presentados en las Figuras 5.43 y 5.44, donde se identifican dos zonas extremas, alta y baja eficiencia energética, las cuales son destacadas en las figuras.

Para ambos casos las zonas de baja eficiencia energética se ubicaron en valores altos de potencia consumida y valores bajos de alimentación mineral fresca, por otra parte los valores altos de eficiencia energética se ubicaron en los segmentos mas bajos de potencia consumida, cercano a 19 000 KWh y con valores de alimentación mineral fresca mayores a 3 500 t/h.

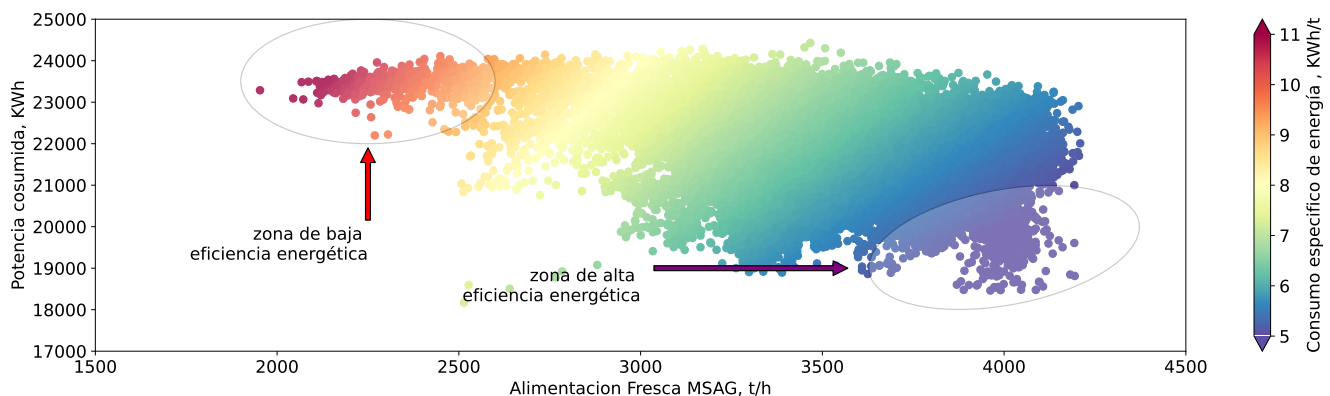


Figura 5.43: Gráfico de Rango de Potencia Consumida vs Alimentación Mineral Fresca y escala de colores Consumo específico de energía para aplicación Profit

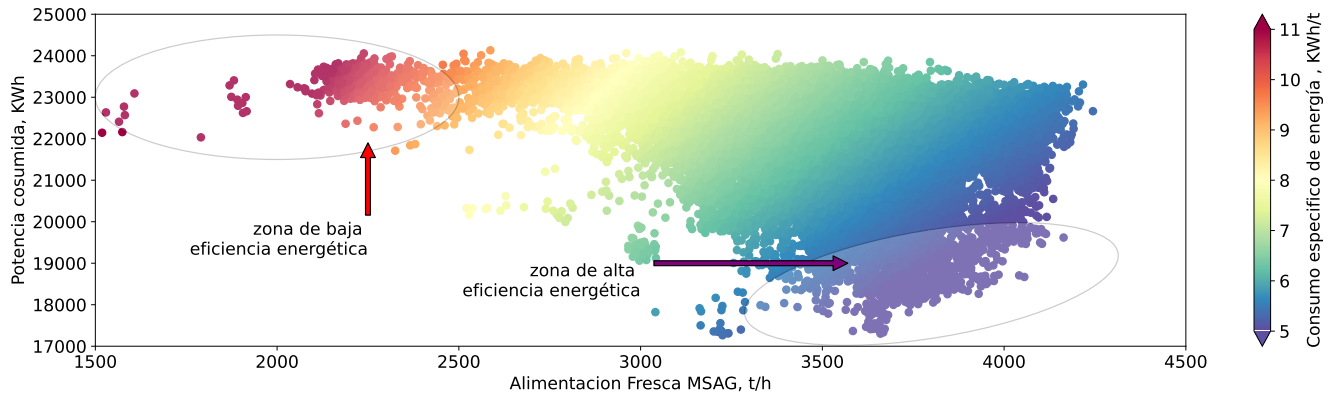


Figura 5.44: Gráfico de Rango de Potencia Consumida vs Alimentación Mineral Fresca y escala de colores Consumo específico de energía para aplicación BrainWave

5.8 Análisis de tiempo efectivo de utilización:

El tiempo planificado de utilización es de 264 horas divididas en 33 turnos de 8 horas cada uno. E el caso del control Andritz, este se utilizó de manera efectiva 252,6 horas equivalentes a 96% del tiempo planificado. Por su parte para la aplicación Profit, este se utilizó durante 262,5 horas equivalentes a una utilización del 99,4%, el cumplimiento se aprecia de manera gráfica en la Figura 5.45 .

Gráfico Comparativo Cumplimiento de Horas de Control

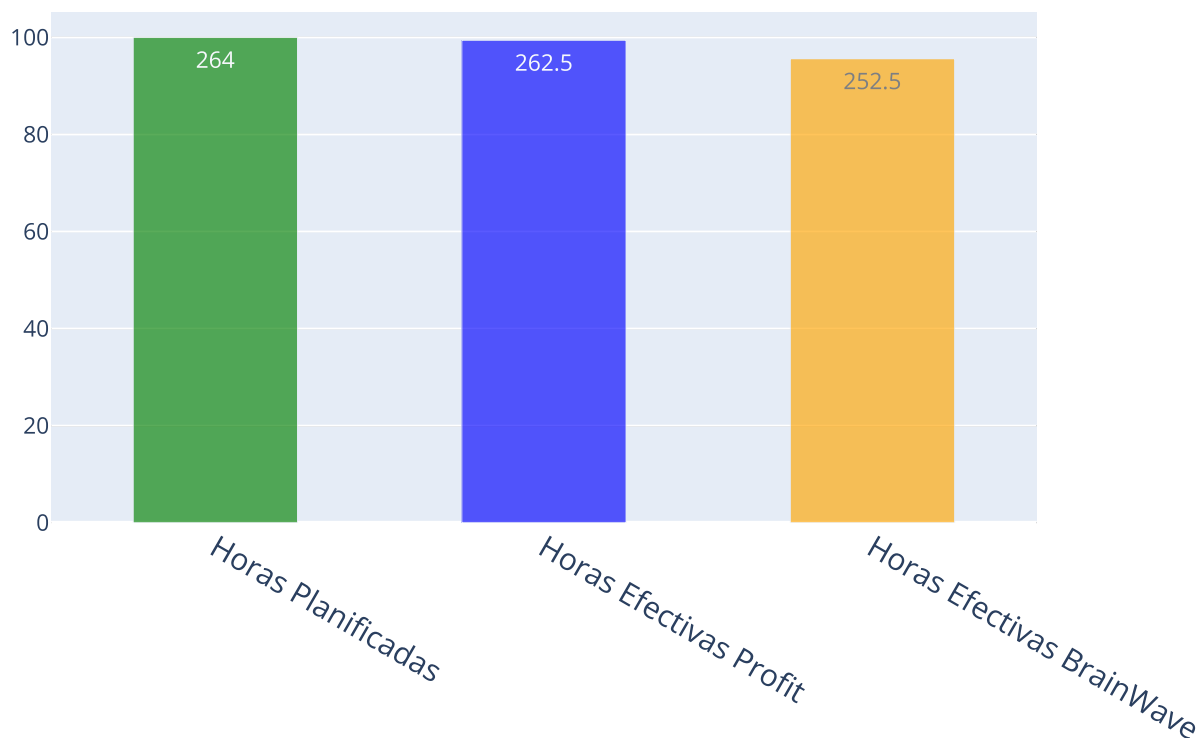


Figura 5.45: Gráfico de columnas comparativo cumplimiento de horas de control programadas

La diferencia entre el tiempo planificado y el tiempo efectivo es debida principalmente a la activación del modo manual. .

Si bien el segundo motivo es debido a la diferencia que ocurre en el momento del cambio de aplicaciones, se aprecia que para el caso de la aplicación BrainWave, la activación del modo manual durante el turno fue recurrente. Durante estas activaciones el operador tomó acciones de control directas sobre las variables manipuladas forzando al proceso a un nuevo estado y no permitiendo que la aplicación de control opere sobre estas variables y el proceso.

Capítulo 6

Conclusiones

El periodo de prueba piloto de la solución de control Profit para molino SAG de la empresa Kairos Mining, comprendido entre el 30 de marzo de 2019 y el 26 de abril de 2019, finalizó con un total de 33 turnos para cada sistema, siendo la duración total de estos turnos de 251 y 263 horas para las aplicaciones de control BrainWave y Profit, respectivamente.

La identificación de datos anómalos permitió la eliminación de eventos de Porcentaje de Gruesos de valores mayores a 43%, mientras que las pruebas de normalidad concluyen que todos los conjuntos de datos por variables y aplicación de control corresponde a conjuntos no normales. Adicionalmente, la aplicación de los filtros temporales como operacionales permitió la correcta categorización de la información para el posterior análisis de esta.

La aplicación Profit ha demostrado que, durante las primeras 264 horas de evaluación, fue capaz de controlar el proceso de molienda SAG, ejerciendo acciones de control sobre las variables manipuladas, manteniendo las variables controladas dentro de los rangos de control y respetando las restricciones físicas de proceso, logrando de esta manera un rendimiento medio semejante a la solución de control actual de Andritz, BrainWave. Se aprecia que durante los turnos de aplicación Profit, se redujo la variabilidad, medida como desviación estándar, de las variables críticas Presión de Descansos (-4,7%), impactos críticos(-5,8%), generación de pebbles(-11,4%) y la Potencia Utilizada (-19%).

Respecto a los eventos con pebbles recirculados sin chancar, se concluye que el control Profit mantuvo dentro del rango las variables presión de descansos, y pebbles generados, respetando las restricciones del proceso, lo que a su vez implica la disminución del rendimiento del molino SAG.

La disminución de la variabilidad en las variables controladas es el primer paso para lograr una operación mas cercana a los limites de los procesos, seguida por una operación mas cercana a la capacidad del proceso. De esta manera un desarrollo posterior permitirá utilizar esta mejora en el control, estabilidad, para la optimización de los límites de control de los procesos, aquello con la utilización de una aplicación de control global entre varios procesos que permita la identificación

y aplicación de límites con el objetivo de un mayor rendimiento del equipo.

Adicionalmente, la aplicación Profit operó en modo optimización más de un 90,3% del tiempo de sus turnos durante las pruebas piloto, indicando que todas las variables se encontraron dentro de los límites de control y la aplicación de control se encontraba ejecutando la optimización de rendimiento del equipo.

Considerado lo antes mencionado, se concluye que la solución Profit de Kairos fue capaz de controlar el proceso de molienda SAG, cumplir las restricciones, reducir la variabilidad y optimizar el rendimiento cuando las variables estaban dentro del rango de control.

De esta manera se recomienda la solución Profit de Kairos por sus características competitivas y atractivas para futuras licitaciones de sistemas de control para el grupo minero.

Capítulo 7

Recomendaciones

Basado en las conclusiones, futuros estudios deberían considerar que la tecnología MPC se adapta a los procesos mediante modelos empíricos y que requieren de un sistema de comunicaciones centralizado, estable y confiable.

Una consideración adicional es la opción de comparar más de un proceso consecutivo mediante la utilización de un controlador optimizador global que permita la modificación de límites de control para algoritmos de control por rango y por otra parte la modificación del punto de seteo(setpoint) para los algoritmos de control por punto de seteo(setpoint).

Por ultimo considerar la opción de utilizar variados tiempos de turno para cada aplicación, el actual estudio utilizó un tiempo fijo por aplicación de 8 horas, periodos variables de 16, 24 o hasta 48 horas por turno de aplicación podrían permitir encontrar nuevos óptimos y diferencias entre las aplicaciones.

Referencias

- Drzymala, J. and Swatek, A. (2007). *Mineral processing : foundations of theory and practice of mineralurgy*. University of Technology.
- Fox, J. (2016). *Applied regression analysis and generalized linear models*. SAGE, 3 edition.
- Gough, B. (2011). *Advanced Model Predictive Control*. InTech, Rijeka.
- Gupta, A. A. and Yan, D. S. D. S. (2016). *Mineral processing design and operations : an introduction*, volume 1. Elsevier, second edition.
- Gutiérrez, M. and Iturralde, S. (2017). *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control*. UPSE.
- Navarrete, N. P., Muratt, J., Olivares, J., Encina, M., and Bastías, J. P. (2019). Informe de levantamiento Centinela Sulfuros. Technical report, Kairos Mining, Santiago.
- OSIsoft (2006). *Manual de usuario de PI ProcessBook*. Osisoft, San Leandro.
- SGS MINERALS SERVICES (2013). JK Drop weight test model-based grinding circuit testing, design and optimisation. Technical report, SGS Group Management, Ulaanbaatar.
- Silva, D. A., McGarry, M. F., Rojas, A. P., and Gracia, R. A. (2014). Streamlining the Steps to Optimized Production: Project Process Modelling, Advanced Control, and Simulator Based Training for Optimized Operation – Case Studies. *CIM Conference*, pages 1–12.
- Wills, B. A. B. A., Napier-Munn, T., Wills, B. A. B. A., and Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre. (2006). *Wills’ mineral processing technology : an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Elsevier/BH.