

Gino Jr Rivera del Carpio Condorhuanca

¹ Afiliación, dirección, Cusco, Perú (gino.rivera@mmg.com)

RESUMEN

Los Índices de Desempeño y Cálculo de tonelaje máximo posible a procesar para sistemas de control avanzados en circuitos de molienda SAG “Maximizer” nos proveen nuevas y mejores formas de Controlar nuestros Procesos Productivos en este caso particularmente para la Molienda SAG; en el presente trabajo podremos explorar las diversas posibilidades que se generan con este nuevo enfoque, contaremos con una herramienta que nos permita calcular con precisión el máximo tonelaje posible que puede alcanzar nuestro sistema en tiempo real, será posible auditar objetivamente a los sistemas de control avanzado o sistemas expertos, también seremos capaces de identificar con mucha más rapidez las oportunidades de mejora en nuestra operación gracias al análisis que realiza el Maximizer ahorrando hasta un 80% de tiempo (mucho más veloz que la revisión de tendencias). Aunque en este trabajo se utilizan diversas técnicas AI que nos permiten ofrecer predicciones y sugerencias, no se abordarán ni se describirán por ser el carácter de este trabajo explicar la innovación que trae el Maximizer, así como su filosofía y arquitectura, y no una descripción de aplicaciones de IA.

1. Introducción

Los índices de desempeño son herramientas / instrumentos que nos permiten apreciar en qué medida se están aprovechando todos los recursos con los que cuenta la molienda primaria (Molienda SAG) para lograr su objetivo principal, procesar la mayor cantidad posible de mineral. Considerando que el objetivo principal de una Planta Concentradora de Cu es producir la mayor cantidad de Cu fino (con grado comercial), sabemos que si tenemos mayor procesamiento de mineral por hora, tenemos más Cu en el sistema que podemos colocar en nuestro concentrado, basados en esta premisa, el PRINCIPAL índice que se debe verificar para determinar el desempeño de la molienda SAG es el Índice de desempeño General SAG (IDSAG), mientras este índice de desempeño se encuentre en 1 (100%) o lo más cercano a uno, el desempeño del sistema de control avanzado o Experto, es Optimo, si el índice es menor a 1 (ejemplo

0.90 = 90%) revisamos el resto de índices (Índice de Peso, Índice de Potencia, Índice de Velocidad, Índice de % Sólidos) que nos dirán específicamente donde está la oportunidad de mejora, y saber si se trata de un tema del Sistema Experto u operacional (mineralogía), así rápidamente se atenderá la oportunidad identificada. Por otro lado, al construir los índices de desempeño se abren nuevas posibilidades a nivel de control de procesos como por ejemplo calcular con precisión cuanto tonelaje más puede procesar la molienda primaria en tiempo real y de manera dinámica, con este nuevo conocimiento podemos definir los nuevos límites de producción del sistema de control avanzado o sistema experto. Otra nueva posibilidad de control de proceso que se deriva del desarrollo de los Índices de Desempeño es la capacidad de conocer si realmente el Sistema de Control Avanzado o Sistema Experto que ocupamos esta extrayendo el mejor rendimiento posible de muestra capacidad instalada, y cuantificar en qué medida lo hace; los métodos tradicionales de evaluación de un sistema Experto consisten en comparar periodos semejantes (en tiempo y características) de operación en manual y con el sistema experto operando y luego cuantificar cuales son las diferencias en términos de producción; sin embargo esto no responde a la pregunta de si ¿mi sistema experto realmente está extrayendo todo el potencial de mi planta?, ¿mi sistema experto es el mejor que puedo ocupar de las ofertas disponibles? Todas estas preguntas encuentran respuesta con el Maximizer.

2. Índices de Desempeño

2.1. Índice de desempeño SAG

EL principal índice de desempeño para el circuito de molienda es el Índice de Desempeño de molino SAG (IDSAG), el cual representa cuán cerca estamos de cumplir con el objetivo propuesto para el sistema en términos de toneladas procesadas por hora, haciendo uso de los recursos con los que cuenta la operación y se representa con la siguiente expresión:

$$IDSAG = \frac{SP_{APC}}{LS_{APC}} \rightarrow IDSAG = 1 = (100\%)$$

$ID_{SAG} = \text{Indice Desempeño SAG}$

$SP_{SXP} = \text{Set Point Remoto del SXP} \approx PV_{SAG}$

$LS_{SXP} = \text{Limite Superior } \frac{T_n}{h} \text{ SXP}$

El Set Point Remoto del Sistema Experto o Sistema de Control Avanzado (PXP) es el valor con el cual el PXP (Sistema Experto) controla la alimentación al molino SAG, en términos generales es idéntico a la PV, es decir, es igual al tonelaje actual alimentado.

2.2. Índice de desempeño PESO

El índice de Peso nos indica cuan cerca estamos del límite superior de peso con el cual puede trabajar de manera segura el molino SAG, en otras palabras, representa en qué medida estamos utilizando el recurso peso del Molino SAG para alcanzar el objetivo propuesto de producción y se representa con la siguiente expresión:

$$RANGO_{PESO} = LS_{SXP} - LI_{SXP}$$

$$ID_{PESO} = (PV_{PESO} - LI_{SXP}) / RANGO_{PESO}$$

$ID_{PESO} = \text{Indice Peso SAG}$

$PV_{PESO} = \text{Peso Actual del Molino}$

$LS_{SXP} = \text{Limite Superior SXP}$

$LI_{SXP} = \text{Limite Inferior SXP}$

Si IDPESO es menor a 95% entonces el sistema experto tiene oportunidad de subir el tonelaje alimentado al SAG, si el IDPESO es mayor a 95% se debe verificar. Los otros índices.

2.3. Índice de desempeño POTENCIA

El índice de Potencia nos indica cuan cerca estamos del límite superior de potencia con el cual puede trabajar de manera segura el molino SAG, en otras palabras, representa en qué medida estamos utilizando el recurso Potencia del Molino SAG para alcanzar el objetivo propuesto de producción.

$$ID_{POTENCIA} = (PV_{Potencia} - LS_{SXP}) / LS_{SXP}$$

$ID_{Potencia} = \text{Indice Potencia SAG}$

$PV_{Potencia} = \text{Potencia Actual del Molino}$

$LS_{SXP} = \text{Limite Superior Potencia SXP}$

Si IDPOTENCIA es menor a 95% entonces el sistema experto tiene oportunidad de subir el tonelaje alimentado al SAG, si el IDPOTENCIA es mayor a 95% se debe verificar otros índices.

2.4. Índice de desempeño VELOCIDAD

El índice de Velocidad nos indica cuan cerca estamos del límite superior de velocidad con el cual puede trabajar de manera segura el molino SAG, en otras palabras, representa en qué medida estamos utilizando el recurso Velocidad del Molino SAG para alcanzar el objetivo propuesto de producción.

$$RANGO_{VELOCIDAD} = LS_{SXP} - LI_{SXP}$$

$$ID_{VELOCIDAD} = (PV_{Velocidad} - LI_{SXP}) / RANGO_{VELOCIDAD}$$

$ID_{Velocidad} = \text{Indice Velocidad SAG}$

$PV_{velocidad} = \text{Velocidad Actual del Molino}$

$LS_{SXP} = \text{Limite Superior SXP}$

$LI_{SXP} = \text{Limite Inferior SXP}$

Si IDVELOCIDAD es menor a 95% entonces el sistema experto tiene oportunidad de subir el tonelaje alimentado al SAG, si el IDVELOCIDAD es mayor a 95% se debe verificar otros índices.

2.5. Índice de desempeño %SÓLIDOS [rango 2]

El índice de % Sólidos nos indica cuan cerca estamos del límite superior de % Sólidos con el cual puede trabajar de manera segura el molino SAG, en otras palabras, representa en qué medida estamos utilizando el recurso % Sólidos del Molino SAG para alcanzar el objetivo propuesto de producción.

$$RANGO_{\%Sólidos} = LS_{SXP} - LI_{SXP}$$

$$ID_{\%Sólidos} = (LS_{SXP} - PV_{\%Sólidos}) / RANGO_{\%Sólidos}$$

$ID_{\%Sólidos} = \text{Indice \%Sólidos SAG}$

$PV_{\%Sólidos} = \%Sólidos \text{ actual del Molino}$

$LI_{SXP} = \text{Limite Inferior SXP}$

$LS_{SXP} = \text{Limite Superior SXP}$

Si ID%SÓLIDOS es menor a 95% entonces el sistema experto tiene oportunidad de subir el tonelaje alimentado al SAG, si el ID%SÓLIDOS es mayor a 95% se debe verificar otros índices.

3. Cálculo de LSPXP Recomendado → LSRXP Limite de procesamiento superior recomendado para el sistema experto

Cuando el IDSAG está al 100%, sabemos que se ha alcanzado el LSPXP de procesamiento haciendo uso de los recursos con los que cuenta el sistema: IDPESO, IDPOTENCIA, IDVELOCIDAD, ID%SÓLIDOS.

Es posible que a pesar de que $IDSAG = 100\%$, tengamos otros índices que aún no se saturaron ($ID < 100\%$) y tengamos la oportunidad de poder aprovechar los recursos que aún se tienen disponibles. Al calcular cual es el aporte en Tn/h que puede ofrecer cada índice, podemos recomendar un Nuevo Limite Superior de Procesamiento \rightarrow LSRXP y maximizar la producción.

3.1. Cálculo Aporte (Tn/h) del IDPOTENCIA \rightarrow APIDPot [rango 2]

APIDPot representa las toneladas que puede aportar el Índice de Desempeño de Potencia, al LSPXP, antes de saturarse ($\rightarrow 100\%$) y se define con la siguiente expresión:

$$APID_{Pot} = \left(\frac{ID_{SAG}}{ID_{Potencia}} - 1 \right) * (MTD_{SAG} - LS_{SXP})$$

$ID_{SAG} =$ Índice Desempeño SAG

$ID_{Potencia} =$ Índice Desempeño Potencia

$LS_{SXP} =$ Limite Superior $\frac{Tn}{h}$ SXP

MTD_{SAG}
 $=$ Maximo Tratamiento por Diseño del SAG
 $= 4300 \frac{Tn}{h}$

Si IDPotencia es de 98%, LSSXP es 3600 entonces el APIDPot será 14.3 Tn/h

3.2. Cálculo Aporte (Tn/h) del IDPESO \rightarrow APIDPeso [rango 2]

APIDPeso representa las toneladas que puede aportar el Índice de Desempeño de Peso, al LSPXP, antes de saturarse ($\rightarrow 100\%$) y se define con la siguiente expresión:

$$APID_{Peso} = \left(\frac{ID_{SAG}}{ID_{Peso}} - 1 \right) * (MTD_{SAG} - LS_{SXP})$$

$ID_{SAG} =$ Índice Desempeño SAG

$ID_{Peso} =$ Índice Desempeño Peso

$LS_{SXP} =$ Limite Superior $\frac{Tn}{h}$ SXP

MTD_{SAG}
 $=$ Maximo Tratamiento por Diseño del SAG
 $= 4300 \frac{Tn}{h}$

Si IDPeso es de 95%, LSPXP es 3600 entonces el APIDPeso será 36.8 Tn/h

3.3. Cálculo Aporte (Tn/h) del IDVELOCIDAD \rightarrow APIDVel [rango 2]

APIDVel representa las toneladas que puede aportar el Índice de Desempeño de Velocidad, al LSPXP, antes de saturarse ($\rightarrow 100\%$) y se define con la siguiente expresión:

$$APID_{Vel} = \left(\frac{ID_{SAG}}{ID_{Velocidad}} - 1 \right) * (MTD_{SAG} - LS_{SXP})$$

$ID_{SAG} =$ Índice Desempeño SAG

$ID_{Peso} =$ Índice Desempeño Velocidad

$LS_{SXP} =$ Limite Superior $\frac{Tn}{h}$ SXP

MTD_{SAG}
 $=$ Maximo Tratamiento por Diseño del SAG
 $= 4300 \frac{Tn}{h}$

Si IDVelocidad es de 90%, LSPXP es 3600 entonces el APIDVel será 77.8 Tn/h.

3.4. Cálculo Aporte (Tn/h) del ID%SÓLIDOS \rightarrow APID%S [rango 2]

APID%Sol representa las toneladas que puede aportar el Índice de Desempeño de % Sólidos, al LSPXP, antes de saturarse ($\rightarrow 100\%$) y se define con la siguiente expresión:

$$APID_{\%S} = \left(\frac{ID_{SAG}}{ID_{\%Sólidos}} - 1 \right) * (MTD_{SAG} - LS_{SXP})$$

$ID_{SAG} =$ Índice Desempeño SAG

$ID_{\%Sólidos} =$ Índice Desempeño %Sólidos

$LS_{SXP} =$ Limite Superior $\frac{Tn}{h}$ SXP

MTD_{SAG}
 $=$ Maximo Tratamiento por Diseño del SAG
 $= 4300 \frac{Tn}{h}$

Si ID%S es de 98%, LSPXP es 3600 entonces el APID%S será 14.3 Tn/h.

4. Evaluación Lógica [rango 1]

Para realizar la evaluación lógica de la activación del cálculo de LSRXP, se generan los Valores Boolean de cada Índice de Desempeño:

Bo_{Peso} = Valor Boolean del ID_{Peso}

Bo_{Pot} = Valor Boolean del ID_{Potencia}

Bo_{Vel} = Valor Boolean del ID_{Velocidad}

$Bo_{\%S}$ = Valor Boolean del ID_{%Sólidos}

$$Bo_{Peso} \begin{cases} ID_{Peso} \geq 100\% \Rightarrow 0 \\ ID_{Peso} < 100\% \Rightarrow 1 \end{cases}$$

$$Bo_{Pot} \begin{cases} ID_{Potencia} \geq 100\% \Rightarrow 0 \\ ID_{Potencia} < 100\% \Rightarrow 1 \end{cases}$$

$$Bo_{Vel} \begin{cases} ID_{Velocidad} \geq 100\% \Rightarrow 0 \\ ID_{Velocidad} < 100\% \Rightarrow 1 \end{cases}$$

$$Bo_{\%S} \begin{cases} ID_{\%Sólidos} \geq 100\% \Rightarrow 0 \\ ID_{\%Sólidos} < 100\% \Rightarrow 1 \end{cases}$$

Con los valores booleanos ya generados para cada índice, se realiza la evaluación lógica:

$$Bo_{Pot} \wedge [(Bo_{\%S} \vee Bo_{Vel}) \vee Bo_{Peso}] = 1 \\ \Rightarrow LSR_{SXP}$$

Si la evaluación lógica resulta 1, es posible calcular LSR_{SXP}, si el resultado es 0, no se cuentan con los recursos necesarios para incrementar el LSR_{SXP}:

SI, $Bo_{Peso} = 1$, Entonces:

$$LSR_{SXP} = (APID_{Pot}, APID_{Peso})_{mim} + LS_{SXP}$$

Caso contrario:

$$LSR_{SXP} = (APID_{Pot}, APID_{\%S}, APID_{Vel})_{mim_{APID > 0}} + LS_{SXP}$$

$$LSR_{SXP} = (19_{Tn/h}, 50_{Tn/h}, 0_{Tn/h})_{mim_{APID > 0}} + 3600_{Tn/h}$$

$$LSR_{SXP} = 19_{Tn/h} + 3600_{Tn/h}$$

$$LSR_{SXP} = 3619_{Tn/h}$$

La evaluación de los valores booleanos nos permite dar pase al cálculo del LSR_{SXP} a pesar de que algunos de los Índices estén saturados ($\rightarrow 100\%$) dependiendo de su importancia para el Proceso. Con el cálculo del LSR_{SXP} es posible conocer el valor máximo que el sistema/Planta puede procesar con los recursos que tiene disponible y cuáles son sus restricciones. Caso IDSAG = 100%: En la imagen 2, se puede apreciar el comportamiento real de los Índices de desempeño en un circuito real de molienda SAG, el LSR_{SXP} (Límite Superior de Procesamiento SXP) para este caso es 3550 Tn/h, el ID_{Peso} alcanzó 58.31%, el ID_{Potencia} alcanzó 96.20%, el ID_{Velocidad} alcanzó 94.25% y el ID_{Sólidos} alcanzó 18.50%; en estas condiciones es claro que se alcanzó el objetivo propuesto para este molino SAG y que además el resto de los índices aún no se saturaron (Índices < 100%), por lo tanto es posible aprovechar

estos recursos aun disponibles. Haciendo uso de los índices de desempeño, es posible cuantificar cual es el aporte en Tn/h que aún tiene disponible cada índice de desempeño, de esta manera se emite un popup al coordinador de sala de control donde se le informa cual es la recomendación de nuevo límite superior, es decir, Límite Superior de Procesamiento Recomendado LSR_{SXP}, de esta manera se garantiza que siempre se conocerá y se podrá llevar nuestro proceso a su capacidad máxima aprovechando todos los recursos que se tienen disponibles de manera segura gracias al Maximizer.

5. IDSAG < 100% Determinación de Causas

En el escenario en el cual no se alcanza el IDSAG = 100%, es posible determinar la razón de este bajo desempeño haciendo un análisis del resto de Índices de Desempeño, específicamente del área de Causas de la arquitectura de decisiones.

Básicamente las razones son de dos tipos:

1. De tipo Mineralógico
 - a) Dureza
 - b) Tamaño
 - c) Dureza y Tamaño
2. De tipo Operacionales (gestión de recursos del Sistema Experto)
 - a) %Sólidos
 - b) Velocidad Molino SAG
 - c) Tonelaje Alimentado SAG



Imagen 1: Arquitectura de determinación de acciones y causas.

Si a pesar de contar con recursos disponibles (índices de desempeño que aún no se han saturado), el sistema experto no puede alcanzar el máximo rendimiento

propuesto (IDSAG < 100%) y no se han activado en el área de causas la condiciones de Mineral Grueso y/o Mineral Duro, la mala performance de la molienda primaria es atribuible a la mala gestión de los recursos disponibles por parte del sistema experto o sistema de control avanzado; de esta manera conoceremos las oportunidades de mejora que aun deben desarrollarse en el sistema experto o de control avanzado y la magnitud de influencia de las mismas sobre el desempeño de la molienda primaria. Caso IDSAG < 100%: En la imagen 3, se puede apreciar un claro caso de Problemas Mineralógicos, que imposibilitan al sistema alcanzar un IDPXP = 100%, esto quiere decir que a pesar de utilizar al máximo los índices de desempeño de todos los recursos, es imposible llegar a un IDPXP = 100%. En la imagen 3 se tiene que el IDPeso alcanzó 97.75%, el IDPotencia alcanzo 99.14%, el IDVelocidad alcanzo 100.00% y el IDSólidos alcanzo 122.90%, esto indica que el sistema incremento el flujo de agua al molino con el fin de reducir el tiempo de residencia de la carga y salir de la condición de sobre carga (IDPeso 97.75%).

5. Conclusiones

El Maximizer constituye una herramienta poderosa que permite identificar rápidamente como se están aprovechando los recursos que se tienen disponibles; e identificar los puntos donde podemos implementar mejoras. El Maximizer nos permiten calcular cuánto más puede procesar nuestra planta inclusive si hemos llegado a los objetivos propuestos para el sistema experto, de manera no lineal, es decir realísticamente. El Maximizer es capaz de supervisar y auditar sistemas expertos o sistemas de control avanzado para molienda SAG de cualquier proveedor o tecnología, es decir, se podrá evaluar objetivamente por primera vez un sistema experto de molienda, transparentando veneficios y oportunidades de mejora reales de cada sistema experto. El Maximizer es capaz de explicar cada estado de desempeño de un molino SAG; dada la naturaleza del Maximizer es posible identificar las desviaciones y/u oportunidades de mejora de los sistemas expertos que se auditen, esta característica nos advierte de la naturaleza heurística que promueve el Maximizer hacia una futura versión de este. El Maximizer puede auditar a otros sistemas expertos de otras etapas del procesamiento de minerales con ajustes simples; incluso puede auditar la performance de nuestros coordinadores de sala de control.

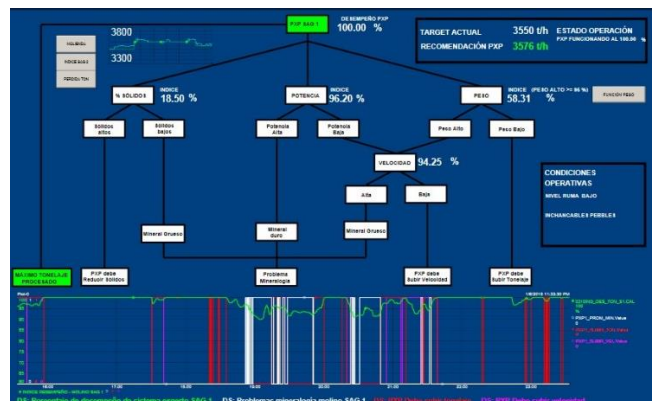


Imagen 2: aspecto de los índices de desempeño con performance del 100%.

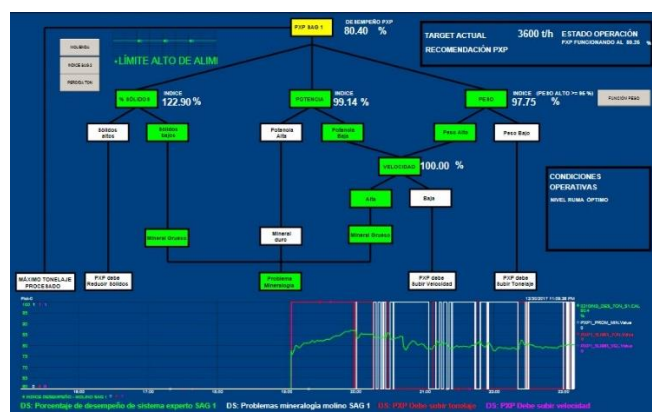


Imagen 3: Aspecto de los índices de desempeño con una performance menor al 100%.

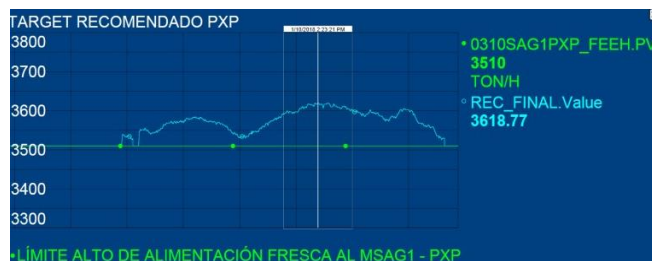


Imagen 4: aspecto del cálculo de tonelaje máximo recomendado.

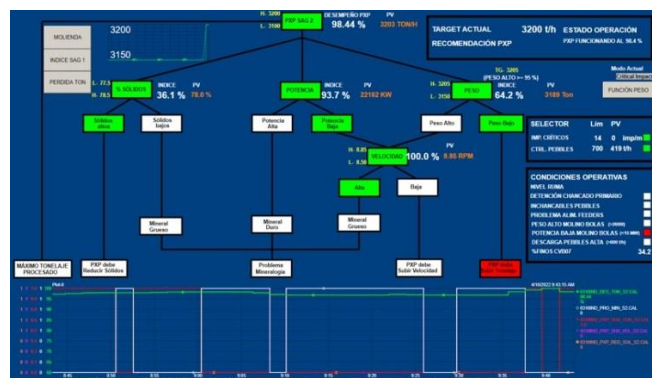


Imagen 5: aspecto de la identificación de una inconsistencia del sistema experto por parte del Maximizer.

oportunidad de mayor procesamiento por más de 12 horas continuas.

Agradecimientos

Compañía Minera Las Bambas por la confianza, al Equipo de Control de Procesos Las Bambas por el constante apoyo y soporte.

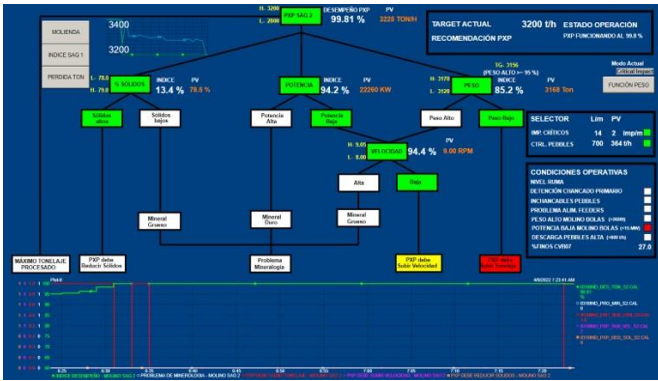


Imagen 6: aspecto de la identificación de una doble inconsistencia del sistema experto por parte del Maximizer.

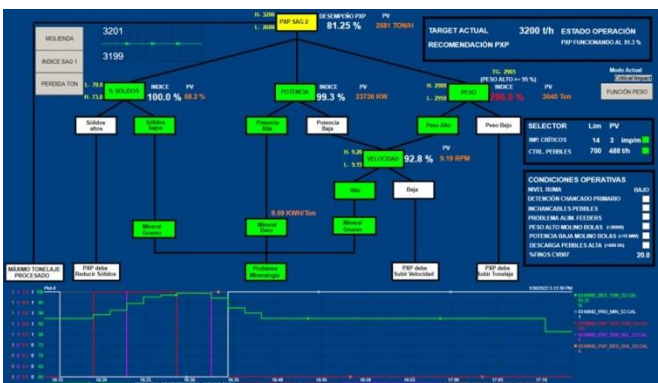


Imagen 7: aspecto de la determinación discreta del tamaño de partícula alimentado al SAG.

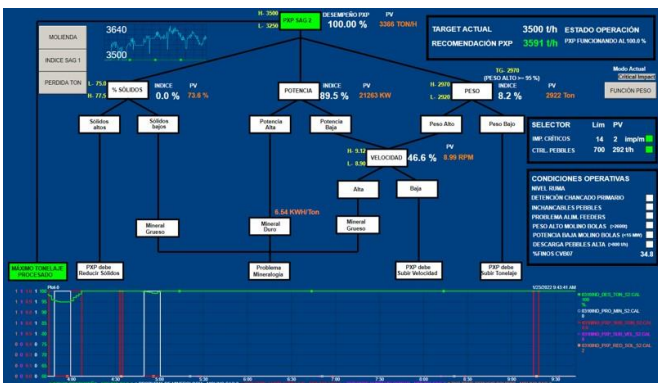


Imagen 8: aspecto de un ciclo de máximo rendimiento de 12 horas continuas.



Imagen 9: aspecto de cálculo de máximo tonelaje posible realizado por el Maximizer en tiempo real, con

Perfil profesional

Certificate in Analytics to optimize the management and performance of industrial assets: Big Data, Industrial Internet of Things (IIoT), & Machine Learning (ML)

Experto en Cybersecurity – San Antonio Texas EE. UU.

Experto en Mantenimiento de Sistemas de Control

Distribuido - Boston Massachusetts EE. UU.

Maestría Gestión Pública y Administración Empresarial

UNSAAC

MBA PUCP

Ingeniería Industrial UAC

Ingeniería Metalúrgica UNSAAC

Gino Jr Rivera del Carpio Condorhuanca

Supervisor Senior de Control de Procesos

Minera Las Bambas

Gino.rivera@mmg.com

+51 1 3217653 ext 17723 / +51 941660360

Jr. Cesar Vallejo J-3, Urb.Santa Monica, Cusco, Perú