



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica**

**Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica**

**Optimización de la molienda primaria de una unidad  
minera ubicada al sur de Perú empleando un Sistema de  
Inferencia Difusa (FIS)**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico**

**AUTOR**

**Leonardo ALMEYDA TEJADA**

**ASESOR**

**Dr. Daniel Florencio LOVERA DAVILA**

**Lima, Perú**

**2024**



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Almeyda, L. (2024). *Optimización de la molienda primaria de una unidad minera ubicada al sur de Perú empleando un Sistema de Inferencia Difusa (FIS)*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

## Metadatos complementarios

|                                  |                                                                                           |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Datos de autor</b>            |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Leonardo Almeyda Tejada                                                                   |
| Tipo de documento de identidad   | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 73664915                                                                                  |
| URL de ORCID                     | <a href="https://orcid.org/0000-0003-3345-7042">https://orcid.org/0000-0003-3345-7042</a> |
| <b>Datos de asesor</b>           |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Daniel Florencio Lovera Davila                                                            |
| Tipo de documento de identidad   | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 06450640                                                                                  |
| URL de ORCID                     | <a href="https://orcid.org/0000-0003-2815-0716">https://orcid.org/0000-0003-2815-0716</a> |
| <b>Datos del jurado</b>          |                                                                                           |
| <b>Presidente del jurado</b>     |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Jorge Luis Ventosilla Shaw                                                                |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 08386770                                                                                  |
| <b>Miembro del jurado 1</b>      |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Manuel Prudencio Caballero Rios                                                           |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 09136425                                                                                  |
| <b>Miembro del jurado 2</b>      |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | José Luis Vidarte Merizalde                                                               |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 07397539                                                                                  |
| <b>Datos de investigación</b>    |                                                                                           |
| Línea de investigación           | Diseño y aplicación de nuevas tecnologías                                                 |
| Grupo de investigación           | No aplica                                                                                 |

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Agencia de financiamiento                              | Sin financiamiento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Ubicación geográfica de la investigación               | <p>Edificio: Unidad Minera Cerro Lindo</p> <p>País: Perú</p> <p>Departamento: Ica</p> <p>Provincia: Chincha</p> <p>Distrito: Chavín</p> <p>Latitud: -13.076612</p> <p>Longitud: -75.991507</p>                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | 2022 - 2024                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| URL de disciplinas OCDE                                | <p>Minería, Procesamiento de minerales<br/> <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05</a></p> <p>Sistemas de automatización, Sistemas de control<br/> <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.03">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.03</a></p> <p>Ciencias de la computación<br/> <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.02.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.02.01</a></p> |



"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el miércoles 04, del mes de Diciembre del 2024 siendo las 10:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| Ing. JORGE LUIS, Ventosilla Shaw      | (PRESIDENTE) |
| Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios | (MIEMBRO)    |
| Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde     | (MIEMBRO)    |

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada: «**OPTIMIZACIÓN DE LA MOLIENDA PRIMARIA DE UNA UNIDAD MINERA UBICADA AL SUR DE PERÚ EMPLEANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA (FIS)**» presentada por Don: LEONARDO ALMEYDA TEJADA, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....**SATISFACCIÓN**.....

Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

.....**QUINZE (15) . APROBADO**.....

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Leonardo Almeyda Tejada**.

Siendo las **11:05** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 04 de diciembre de 2024

Ing. JORGE LUIS VENTOSILLA SHAW  
**Presidente**

Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS  
**Miembro**

Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE  
**Miembro**

Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DAVILA  
**ASESOR DE TESIS**



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
Universidad del Perú. Decana de América  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA y GEOGRÁFICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**

**CERTIFICADO DE SIMILITUD**

Yo, DANIEL FLORENCIO LOVERA DAVILA en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N.º000543-2024-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es “OPTIMIZACIÓN DE LA MOLIENDA PRIMARIA DE UNA UNIDAD MINERA UBICADA AL SUR DE PERÚ EMPLEANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA (FIS)” presentado por el bachiller **LEONARDO ALMEYDA TEJADA** para optar el título profesional de Ingeniero Metalúrgico.

**CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **8%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 1 de julio de 2024

Firma del Asesor

Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DAVILA

DNI: 06450640

## Contenido

|                                                                           |          |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>CAPÍTULO I</b>                                                         | <b>1</b> |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>                                                    | <b>1</b> |
| 1.1. INTRODUCCIÓN                                                         | 1        |
| 1.2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA                                            | 2        |
| 1.2.1. Descripción de la Problemática                                     | 2        |
| 1.2.2. Formulación del Problema                                           | 4        |
| 1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN                                        | 5        |
| 1.3.1. Objetivo General                                                   | 5        |
| 1.3.2. Objetivos Específicos                                              | 5        |
| 1.4. IMPORTANCIA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN                            | 5        |
| 1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN                                     | 5        |
| <b>CAPÍTULO II</b>                                                        | <b>6</b> |
| <b>2. EL MARCO TEÓRICO</b>                                                | <b>6</b> |
| 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN                                     | 6        |
| 2.2. BASES TEÓRICAS                                                       | 14       |
| 2.2.1. Estrategia de Control                                              | 14       |
| 2.2.2. Lógica Difusa                                                      | 16       |
| 2.2.3. Sistema de Inferencia Difusa (FIS)                                 | 27       |
| 2.2.4. Molienda de Minerales                                              | 31       |
| 2.2.5. Modelamiento y Simulación del Proceso de Molienda                  | 34       |
| 2.2.6. Optimización en Circuitos de Molienda                              | 37       |
| <b>CAPÍTULO III</b>                                                       | <b>1</b> |
| <b>3. HIPÓTESIS Y VARIABLES</b>                                           | <b>1</b> |
| 3.1. LAS HIPÓTESIS                                                        | 1        |
| 3.1.1. Hipótesis General                                                  | 1        |
| 3.1.2. Hipótesis Específicas                                              | 1        |
| 3.2. LAS VARIABLES                                                        | 1        |
| 3.2.1. Variable Independiente (X)                                         | 1        |
| 3.2.2. Variable Dependiente (Y)                                           | 1        |
| 3.2.3. Otras Variables Medidas                                            | 1        |
| 3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES                                      | 1        |
| 3.4. MATRIZ DE CONSISTENCIA                                               | 2        |
| <b>CAPÍTULO IV</b>                                                        | <b>1</b> |
| <b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b>                                            | <b>1</b> |
| 4.1. ÁREA DE ESTUDIO                                                      | 1        |
| 4.1.1. Ubicación de la Unidad Minera                                      | 1        |
| 4.1.2. Información sobre el Circuito de Molienda Primaria                 | 1        |
| 4.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN                                              | 3        |
| 4.2.1. Tipo de Investigación                                              | 3        |
| 4.2.2. Nivel de Investigación                                             | 3        |
| 4.2.3. Método de Diseño de Investigación                                  | 3        |
| 4.3. POBLACIÓN Y MUESTRA                                                  | 4        |
| 4.3.1. Población                                                          | 4        |
| 4.3.2. Muestra                                                            | 4        |
| 4.4. PROCEDIMIENTO, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN | 4        |
| 4.4.1. Procedimiento Metodológico                                         | 4        |

|                 |                                                                                      |     |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.2.          | <i>Técnicas e instrumentos</i> .....                                                 | 5   |
| 4.5.            | EQUIPOS Y MATERIALES.....                                                            | 6   |
| CAPÍTULO V..... |                                                                                      | 7   |
| 5.              | PRUEBAS EXPERIMENTALES MEDIANTE LÓGICA DIFUSA.....                                   | 7   |
| 5.1.            | LIMPIEZA Y PROCESAMIENTO DE DATOS .....                                              | 7   |
| 5.2.            | ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....                                                           | 12  |
| 5.2.1.          | <i>Análisis de Correlación de Variables Estudiadas</i> .....                         | 12  |
| 5.2.2.          | <i>Distribución Estadística de las Variables Analizadas</i> .....                    | 16  |
| 5.2.3.          | <i>Determinación de Rangos en Función de Percentiles</i> .....                       | 17  |
| 5.3.            | CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA (FIS).....                             | 18  |
| 5.3.1.          | <i>Definición de las Variables de Entrada y Salida</i> .....                         | 19  |
| 5.3.2.          | <i>Definición de los Antecedentes para cada Regla</i> .....                          | 23  |
| 5.3.3.          | <i>Definición de los Consecuentes para cada Regla</i> .....                          | 23  |
| 5.3.4.          | <i>Conversión de la Entrada a un Conjunto Difuso (Fuzzificación).</i> .....          | 23  |
| 5.3.5.          | <i>Aplicación de Reglas Difusas</i> .....                                            | 33  |
| 5.3.6.          | <i>Conversión de la Salida Difusa a una Respuesta Nítida (Defuzzificación)</i> ..... | 49  |
| 5.4.            | EJECUCIÓN DEL SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA (FIS) .....                               | 52  |
| 5.4.1.          | <i>Tiempo de Respuesta del Sistema de Inferencia Difusa (FIS)</i> .....              | 53  |
| 5.4.2.          | <i>Ingreso y Salida de Valores en el Sistema de Inferencia Difusa (FIS)</i> .....    | 53  |
| 5.4.3.          | <i>Impacto del FIS en los Valores Sugeridos</i> .....                                | 55  |
| 6.              | RESULTADOS.....                                                                      | 57  |
| 6.1.            | IMPACTO MENSUAL DEL FIS DURANTE EL 2023 (SIMULADO) .....                             | 57  |
| 6.1.1.          | <i>Enero</i> .....                                                                   | 57  |
| 6.1.2.          | <i>Febrero</i> .....                                                                 | 58  |
| 6.1.3.          | <i>Marzo</i> .....                                                                   | 60  |
| 6.1.4.          | <i>Abril</i> .....                                                                   | 61  |
| 6.1.5.          | <i>Mayo</i> .....                                                                    | 63  |
| 6.1.6.          | <i>Junio</i> .....                                                                   | 64  |
| 6.1.7.          | <i>Julio</i> .....                                                                   | 66  |
| 6.1.8.          | <i>Agosto</i> .....                                                                  | 67  |
| 6.1.9.          | <i>Septiembre</i> .....                                                              | 69  |
| 6.1.10.         | <i>Octubre</i> .....                                                                 | 70  |
| 6.1.11.         | <i>Noviembre</i> .....                                                               | 72  |
| 6.1.12.         | <i>Diciembre</i> .....                                                               | 73  |
| 6.2.            | CONTRASTACIÓN DE LAS HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....                                      | 74  |
| 6.2.1.          | <i>Contrastación de la Hipótesis Específica 1</i> .....                              | 75  |
| 6.2.2.          | <i>Contrastación de la Hipótesis Específica 2</i> .....                              | 81  |
| 6.2.3.          | <i>Contrastación de la Hipótesis Específica 3</i> .....                              | 87  |
| 7.              | DISCUSIÓN.....                                                                       | 93  |
| 7.1.            | DESEMPEÑO DEL FIS PROPUESTO.....                                                     | 93  |
| 7.1.1.          | <i>Rango Fino</i> .....                                                              | 93  |
| 7.1.2.          | <i>Rango Normal</i> .....                                                            | 93  |
| 7.1.3.          | <i>Rango Grueso</i> .....                                                            | 94  |
| 7.2.            | ANÁLISIS DE RESPUESTAS DIFUSAS .....                                                 | 94  |
| 7.2.1.          | <i>Disminuir Mucho</i> .....                                                         | 95  |
| 7.2.2.          | <i>Disminuir</i> .....                                                               | 97  |
| 7.2.3.          | <i>Aumentar</i> .....                                                                | 100 |
| 7.2.4.          | <i>Aumentar Mucho</i> .....                                                          | 102 |
| 8.              | CONCLUSIONES .....                                                                   | 104 |
| 9.              | RECOMENDACIONES .....                                                                | 105 |

|              |                                                |            |
|--------------|------------------------------------------------|------------|
| <b>10.</b>   | <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>        | <b>106</b> |
| <b>11.</b>   | <b>ANEXOS .....</b>                            | <b>110</b> |
| <b>11.1.</b> | <b>DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....</b>             | <b>110</b> |
| <b>11.2.</b> | <b>HOJA DE REGISTRO DE OBSERVACIÓN.....</b>    | <b>112</b> |
| <b>11.3.</b> | <b>CUESTIONARIOS .....</b>                     | <b>115</b> |
| <b>11.4.</b> | <b>BASE DE DATOS OPERACIONAL.....</b>          | <b>118</b> |
| <b>11.5.</b> | <b>CÓDIGO DE LÓGICA DIFUSA EN PYTHON .....</b> | <b>119</b> |

## **DEDICATORIA**

A mi abuelo, quién desde muy pequeño me inculcó la pasión por la ingeniería y ayudó con cada uno de mis proyectos.

A mi abuela, de quién guardo enseñanzas y memorias que atesoro cada día.

A mis padres y mi hermana, qué son mi motor constante de motivación y superación.

A mi padrino, quién en vida fue un soporte constante para mí.

A mi novia, quién supo acompañarme pacientemente durante todo el proceso universitario.

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias UNMSM, porque me enseñaste cuan diverso y apasionante es nuestro país. Porque con cada reto me permitiste crecer personal y profesionalmente. Porque me abriste las puertas y me permitiste conocer lugares fuera del país con los que solo soñaba de niño.

Gracias Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, porque me brindaste los conocimientos necesarios y la confianza suficiente para desempeñarme satisfactoriamente en el ambiente profesional.

## RESUMEN

Un estudio realizado en una Unidad Minera determinó que el ingreso de mineral fresco con un tamaño F80 grueso genera variabilidad operacional en el proceso de molienda primaria. Esta alta variabilidad, genera tres problemas principales: el engrosamiento del tamaño del producto de molienda (caracterizado por un P80 grueso), la disminución del tonelaje de mineral procesado y el aumento del flujo de agua consumida.

Para lo cual, se plantea el desarrollo y aplicación de un Sistema de Inferencia Difusa (FIS) tipo Mamdani, como alternativa para optimizar la molienda primaria.

Para ello se realizó una investigación de tipo aplicada y de nivel correlacional, con un enfoque metodológico de tipo experimental. Utilizando data operacional extraída a través del Pi System, con una frecuencia de medición de un minuto, durante el periodo de enero a diciembre del 2023.

Puntualmente, la investigación desarrolló el FIS incluyendo los pasos: definición de reglas difusas, fuzzificación y defuzzificación.

Como valores de entrada el FIS consideró la granulometría de la alimentación y la tensión de las corrientes de las bombas del circuito. Asimismo; como valores de salida el FIS consideró una variación al tonelaje de alimentación y consecuentemente al caudal de agua.

Como resultado de esta investigación, el FIS propuesto consiguió: Reducir el tamaño de partícula P80 de 585  $\mu\text{m}$  a 564  $\mu\text{m}$ ; incrementar el tonelaje de alimentación a molienda de 510 t/h a 550 t/h; y, reducir la cantidad de agua consumida de 180 m<sup>3</sup>/h a 143 m<sup>3</sup>/h.

**Palabras clave:** Molienda, Molino de Bolas, Optimización, Estrategia de Control, Lógica Difusa, FIS, Mamdani, Python.

## ABSTRACT

A study carried out in a Mining Operation determined that the entry of fresh ore with a gross F80 size generates operational variability in the primary grinding process. This high variability generates three main problems: The thickening of the size of the grinding product (characterized by a gross P80), the decrease in the tonnage of ore processed and the increase in the flow of water consumed.

For this purpose, the development and application of a Mamdani-type Fuzzy Inference System (FIS) is proposed as an alternative to optimize primary grinding.

For this, an applied and correlational type of research was carried out, with an experimental methodological approach. Using operational data extracted through the Pi System, with a measurement frequency of one minute, during the period from January to December 2023.

Specifically, this research has developed the FIS including the following steps: definition of fuzzy rules, fuzzification and defuzzification.

As input values, the FIS considered the granulometry of the feed and the voltage of the circuit pump currents. In addition; as output values, the FIS considered a variation in the feed tonnage and consequently in the water flow.

As a result of this research, the FIS managed to: Reduce the P80 particle size from 585  $\mu\text{m}$  to 564  $\mu\text{m}$ ; increase feed to grind tonnage from 510 t/h to 550 t/h; and reduce the amount of water consumed from 180 m<sup>3</sup>/h to 143 m<sup>3</sup>/h.

**Keywords:** Grinding, Ball Mill, Optimization, Control Strategy, Fuzzy Logic, FIS, Mamdani, Python.

## NOMENCLATURA

| <i>Símbolo</i> | <i>Descripción</i>                                                |
|----------------|-------------------------------------------------------------------|
| U.M            | Unidad Minera.                                                    |
| F80            | Tamaño representativo al 80% del alimento que ingresa a molienda. |
| P80            | Tamaño representativo al 80% del producto de molienda.            |
| PID            | Control proporcional, integral y derivativo.                      |
| PLC            | Controlador lógico programable.                                   |
| TPH            | Tonelaje procesado por hora.                                      |
| TPMD           | Toneladas métricas procesadas por día.                            |
| Wi             | Work Index.                                                       |
| FIS            | Sistema de inferencia difusa.                                     |
| DEM            | Método de elementos discretos.                                    |
| MOM            | Valor máximo medio.                                               |
| SOM            | Valor máximo más pequeño.                                         |
| LOM            | Valor máximo más grande.                                          |
| QTA            | Análisis de tendencia cualitativo.                                |
| FCM            | Controlador difuso basado en un algoritmo de agrupamiento.        |
| FAM            | Matriz de asociación difusa.                                      |
| MIMO           | Sistema de control de múltiples entradas y múltiples salidas.     |
| DOB            | Observador de perturbaciones.                                     |
| IDOB           | Algoritmo utilizado en el desarrollo de controladores.            |
| PI IDOB        | Observador de perturbaciones mejorado.                            |
| FLST - PID     | Controlador PID autorregulable basado en lógica difusa.           |

|               |                                                                 |
|---------------|-----------------------------------------------------------------|
| NMPC          | Método de control predictivo de modelos no lineales.            |
| MPC           | Modelos predictivos.                                            |
| SAG           | Molino semiautógeno.                                            |
| Corr_BMetso1  | Corriente de las bombas de descarga del Metso 1.                |
| Corr_BMetso 2 | Corriente de las bombas de descarga del Metso 2.                |
| Corr_ZAF      | Corriente de las bombas de alimentación hacia las ZAF.          |
| Del_Ton       | Diferencia entre el tonelaje sugerido y el tonelaje registrado. |
| P80*          | Valor simulado de P80.                                          |
| mm            | Milímetros.                                                     |
| μm            | Micras.                                                         |
| t/h           | Toneladas por hora.                                             |
| m3/h          | Metros cúbicos por hora.                                        |
| A             | Amperios.                                                       |
| RPM           | Revoluciones por minuto.                                        |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1</b> Comparación entre los Tipos de FIS .....                                              | 28 |
| <b>Tabla 2</b> Molino de Bolas .....                                                                 | 33 |
| <b>Tabla 3</b> Matriz de Operacionalización de Variables .....                                       | 1  |
| <b>Tabla 4</b> Matriz de Consistencia .....                                                          | 2  |
| <b>Tabla 5</b> Fuente de Datos Original (Población) .....                                            | 7  |
| <b>Tabla 6</b> Análisis Estadístico de la Fuente Original de Datos (Población) .....                 | 8  |
| <b>Tabla 7</b> Análisis Estadístico de Datos Filtrados (Muestra).....                                | 9  |
| <b>Tabla 8</b> Información para el Cálculo del $W_i$ .....                                           | 11 |
| <b>Tabla 9</b> Inclusión del Valor P80 en la Muestra .....                                           | 12 |
| <b>Tabla 10</b> Interpretación del Coeficiente de Correlación de Pearson .....                       | 13 |
| <b>Tabla 11</b> Cuartiles de las Variables Estudiadas.....                                           | 18 |
| <b>Tabla 12</b> Variables de Entrada y Salida Consideradas en Lógicas de Control para Molienda ..... | 19 |
| <b>Tabla 13</b> Instrumentación Disponible en el Circuito de Molienda de la Unidad Minera.....       | 20 |
| <b>Tabla 14</b> Lista de Campos Presentes en la Tabla de Salida.....                                 | 55 |
| <b>Tabla 15</b> Impacto del FIS durante Enero.....                                                   | 57 |
| <b>Tabla 16</b> Impacto del FIS durante Enero cuando el Mineral tenía un F80 Fino .....              | 57 |
| <b>Tabla 17</b> Impacto del FIS durante Enero cuando el Mineral tenía un F80 Normal .....            | 58 |
| <b>Tabla 18</b> Impacto del FIS durante Enero cuando el Mineral tenía un F80 Grueso .....            | 58 |
| <b>Tabla 19</b> Impacto del FIS durante Febrero.....                                                 | 59 |
| <b>Tabla 20</b> Impacto del FIS durante Febrero cuando el Mineral tenía un F80 Fino .....            | 59 |
| <b>Tabla 21</b> Impacto del FIS durante Febrero cuando el Mineral tenía un F80 Normal .....          | 59 |
| <b>Tabla 22</b> Impacto del FIS durante Febrero cuando el Mineral tenía un F80 Grueso .....          | 60 |
| <b>Tabla 23</b> Impacto del FIS durante Marzo.....                                                   | 60 |
| <b>Tabla 24</b> Impacto del FIS durante Marzo cuando el Mineral tenía un F80 Fino .....              | 60 |
| <b>Tabla 25</b> Impacto del FIS durante Marzo cuando el Mineral tenía un F80 Normal .....            | 61 |
| <b>Tabla 26</b> Impacto del FIS durante Marzo cuando el Mineral tenía un F80 Grueso .....            | 61 |
| <b>Tabla 27</b> Impacto del FIS durante Abril.....                                                   | 62 |
| <b>Tabla 28</b> Impacto del FIS durante Abril cuando el Mineral tenía un F80 Fino.....               | 62 |
| <b>Tabla 29</b> Impacto del FIS durante Abril cuando el Mineral tenía un F80 Normal.....             | 62 |
| <b>Tabla 30</b> Impacto del FIS durante Abril cuando el Mineral tenía un F80 Grueso .....            | 63 |
| <b>Tabla 31</b> Impacto del FIS durante Mayo.....                                                    | 63 |
| <b>Tabla 32</b> Impacto del FIS durante Mayo cuando el Mineral tenía un F80 Fino .....               | 63 |
| <b>Tabla 33</b> Impacto del FIS durante Mayo cuando el Mineral tenía un F80 Normal.....              | 64 |
| <b>Tabla 34</b> Impacto del FIS durante Mayo cuando el Mineral tenía un F80 Grueso .....             | 64 |
| <b>Tabla 35</b> Impacto del FIS durante Junio .....                                                  | 64 |
| <b>Tabla 36</b> Impacto del FIS durante Junio cuando el Mineral tenía un F80 Fino .....              | 65 |
| <b>Tabla 37</b> Impacto del FIS durante Junio cuando el Mineral tenía un F80 Normal .....            | 65 |
| <b>Tabla 38</b> Impacto del FIS durante Junio cuando el Mineral tenía un F80 Grueso.....             | 65 |
| <b>Tabla 39</b> Impacto del FIS durante Julio .....                                                  | 66 |
| <b>Tabla 40</b> Impacto del FIS durante Julio cuando el Mineral tenía un F80 Fino .....              | 66 |
| <b>Tabla 41</b> Impacto del FIS durante Julio cuando el Mineral tenía un F80 Normal .....            | 67 |

|                 |                                                                              |     |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 42</b> | Impacto del FIS durante Julio cuando el Mineral tenía un F80 Grueso.....     | 67  |
| <b>Tabla 43</b> | Impacto de FIS durante Agosto .....                                          | 67  |
| <b>Tabla 44</b> | Impacto del FIS durante Agosto cuando el Mineral tenía un F80 Fino .....     | 68  |
| <b>Tabla 45</b> | Impacto del FIS durante Agosto cuando el Mineral tenía un F80 Normal .....   | 68  |
| <b>Tabla 46</b> | Impacto del FIS durante Agosto cuando el Mineral tenía un F80 Grueso .....   | 68  |
| <b>Tabla 47</b> | Impacto del FIS durante Septiembre .....                                     | 69  |
| <b>Tabla 48</b> | Impacto del FIS durante Septiembre cuando el Mineral tenía un F80 Fino       | 69  |
| <b>Tabla 49</b> | Impacto del FIS durante Septiembre cuando el Mineral tenía un F80 Normal     | 70  |
| <b>Tabla 50</b> | Impacto del FIS durante Septiembre cuando el Mineral tenía un F80 Grueso     | 70  |
| <b>Tabla 51</b> | Impacto del FIS durante Octubre .....                                        | 70  |
| <b>Tabla 52</b> | Impacto del FIS durante Octubre cuando el Mineral tenía un F80 Fino .....    | 71  |
| <b>Tabla 53</b> | Impacto del FIS durante Octubre cuando el Mineral tenía un F80 Normal        | 71  |
| <b>Tabla 54</b> | Impacto del FIS durante Octubre cuando el Mineral tenía un F80 Grueso        | 71  |
| <b>Tabla 55</b> | Impacto del FIS durante Noviembre .....                                      | 72  |
| <b>Tabla 56</b> | Impacto del FIS durante Noviembre cuando el Mineral tenía un F80 Fino        | 72  |
| <b>Tabla 57</b> | Impacto del FIS durante Noviembre cuando el Mineral tenía un F80 Normal      | 72  |
| <b>Tabla 58</b> | Impacto del FIS durante Noviembre cuando el Mineral tenía un F80 Grueso      | 73  |
| <b>Tabla 59</b> | Impacto del FIS durante Diciembre .....                                      | 73  |
| <b>Tabla 60</b> | Impacto del FIS durante Diciembre cuando el Mineral tenía un F80 Fino        | 73  |
| <b>Tabla 61</b> | Impacto del FIS durante Diciembre cuando el Mineral tenía un F80 Normal      | 74  |
| <b>Tabla 62</b> | Impacto del FIS durante Diciembre cuando el Mineral tenía un F80 Grueso      | 74  |
| <b>Tabla 63</b> | Impacto Promedio en el Tonelaje cuando Ingresa Mineral Fino.....             | 75  |
| <b>Tabla 64</b> | Impacto Promedio en el Tonelaje cuando Ingresa Mineral Normal.....           | 77  |
| <b>Tabla 65</b> | Impacto Promedio en el Tonelaje cuando Ingresa Mineral Grueso .....          | 79  |
| <b>Tabla 66</b> | Impacto Promedio en el Caudal de Agua cuando Ingresa Mineral Fino.....       | 81  |
| <b>Tabla 67</b> | Impacto Promedio en el Caudal de Agua cuando Ingresa Mineral Normal          | 84  |
| <b>Tabla 68</b> | Impacto Promedio en el Caudal de Agua cuando Ingresa Mineral Grueso          | 85  |
| <b>Tabla 69</b> | Impacto Promedio en el P80 cuando Ingresa Mineral Fino .....                 | 87  |
| <b>Tabla 70</b> | Impacto Promedio en el P80 cuando Ingresa Mineral Normal .....               | 89  |
| <b>Tabla 71</b> | Impacto Promedio en el P80 cuando Ingresa Mineral Grueso.....                | 91  |
| <b>Tabla 72</b> | Hoja de Registro de Observación N°1: Comportamientos operacionales, Día 1112 |     |
| <b>Tabla 73</b> | Hoja de Registro de Observación N°2: Comportamientos operacionales, Día 2112 |     |
| <b>Tabla 74</b> | Hoja de Registro de Observación N°3: Comportamientos operacionales, Día 3113 |     |
| <b>Tabla 75</b> | Hoja de Registro de Observación N°4: Comportamientos operacionales, Día 4113 |     |
| <b>Tabla 76</b> | Hoja de Registro de Observación N°5: Comportamientos operacionales, Día 5114 |     |
| <b>Tabla 77</b> | Hoja de Registro de Observación N°6: Comportamientos operacionales, Día 6114 |     |
| <b>Tabla 78</b> | Cuestionario 1: Validar las Variables Disponibles asociadas a la Molienda    | 115 |
| <b>Tabla 79</b> | Cuestionario 2: Validar las Variables Utilizadas en el Control de Molienda   | 115 |
| <b>Tabla 80</b> | Cuestionario 3: Validar los Rangos para cada Variable Operacional .....      | 116 |
| <b>Tabla 81</b> | Rangos Operacionales del F80.....                                            | 116 |
| <b>Tabla 82</b> | Rangos Operacionales de la Corr_BMetso1.....                                 | 116 |
| <b>Tabla 83</b> | Rangos Operacionales de la Corr_BMetso2.....                                 | 117 |
| <b>Tabla 84</b> | Rangos Operacionales de la Corr_ZAF.....                                     | 117 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> Variación Histórica del Tamaño F80 .....                                                     | 2  |
| <b>Figura 2</b> Variación Histórica del Tamaño P80 .....                                                     | 3  |
| <b>Figura 3</b> Variación Histórica del Tonelaje .....                                                       | 3  |
| <b>Figura 4</b> Variación Histórica del Flujo de Agua Consumida.....                                         | 4  |
| <b>Figura 5</b> Estructura de un Sistema de Control .....                                                    | 14 |
| <b>Figura 6</b> Tipos de Controladores más Utilizados en Molienda.....                                       | 15 |
| <b>Figura 7</b> Proceso de Inferencia Difusa.....                                                            | 16 |
| <b>Figura 8</b> Grado de Membresía de un Elemento en un Conjunto Difuso.....                                 | 18 |
| <b>Figura 9</b> Partes de una Función de Membresía.....                                                      | 18 |
| <b>Figura 10</b> Función de Membresía Triangular .....                                                       | 19 |
| <b>Figura 11</b> Función de Membresía Trapezoidal .....                                                      | 20 |
| <b>Figura 12</b> Función de Membresía Gaussiana.....                                                         | 21 |
| <b>Figura 13</b> Función de Membresía Tipo Campana.....                                                      | 21 |
| <b>Figura 14</b> Función de Membresía Sigmodial.....                                                         | 22 |
| <b>Figura 15</b> Proceso de Interpretación de Reglas Si - Entonces .....                                     | 23 |
| <b>Figura 16</b> Operadores Difusos .....                                                                    | 24 |
| <b>Figura 17</b> Defuzzificación.....                                                                        | 25 |
| <b>Figura 18</b> Método del Centroide.....                                                                   | 26 |
| <b>Figura 19</b> Método de la Bisectriz.....                                                                 | 26 |
| <b>Figura 20</b> Método MOM, SOM y LOM.....                                                                  | 27 |
| <b>Figura 21</b> Sistema de Inferencia Difusa (FIS) .....                                                    | 28 |
| <b>Figura 22</b> Método Mamdani .....                                                                        | 29 |
| <b>Figura 23</b> Método Sugeno .....                                                                         | 30 |
| <b>Figura 24</b> Molino de Bolas .....                                                                       | 32 |
| <b>Figura 25</b> Variables Habitualmente Medidas en Circuitos de Molienda Cerrada.....                       | 37 |
| <b>Figura 26</b> Diagrama de Proceso y Variables Utilizadas en una Estrategia de Control para Molienda ..... | 1  |
| <b>Figura 27</b> Área de Estudio de la Investigación .....                                                   | 1  |
| <b>Figura 28</b> Circuito de Molienda Primaria de la Unidad Minera.....                                      | 2  |
| <b>Figura 29</b> Matriz de Correlación de las Variables Analizadas (Muestra).....                            | 13 |
| <b>Figura 30</b> Tonelaje vs Tamaño F80 del Mineral Alimentado.....                                          | 15 |
| <b>Figura 31</b> Tonelaje vs Caudal de Agua Alimentada.....                                                  | 15 |
| <b>Figura 32</b> Distribución Estadística de las Variables Analizadas .....                                  | 16 |
| <b>Figura 33</b> Variables Regulables en la Operación de un Molino de Bolas.....                             | 21 |
| <b>Figura 34</b> Función de Membresía para el F80 .....                                                      | 25 |
| <b>Figura 35</b> Función de Membresía para la Corr_BMetso1.....                                              | 27 |
| <b>Figura 36</b> Función de Membresía para la Corr_BMetso2.....                                              | 29 |
| <b>Figura 37</b> Función de Membresía para la Corr_ZAF .....                                                 | 31 |
| <b>Figura 38</b> Conformación de 3 <sup>4</sup> Reglas Difusas.....                                          | 34 |
| <b>Figura 39</b> Conformación de 3 <sup>3</sup> Reglas Difusas cuando el F80 es Fino .....                   | 35 |
| <b>Figura 40</b> Conformación de 3 <sup>3</sup> Reglas Difusas cuando el F80 es Normal.....                  | 40 |
| <b>Figura 41</b> Conformación de 3 <sup>3</sup> Reglas Difusas cuando el F80 es Grueso .....                 | 45 |

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 42</b> Dufizzificación de Delta_Ton .....                                                                | 50  |
| <b>Figura 43</b> Comparación entre el Tonelaje Registrado y el Tonelaje Sugerido cuando el Mineral es Fino .....   | 76  |
| <b>Figura 44</b> Impacto Porcentual del FIS en el Tonelaje cuando el Mineral es Fino .....                         | 76  |
| <b>Figura 45</b> Comparación entre el Tonelaje Registrado y el Tonelaje Sugerido cuando el Mineral es Normal ..... | 78  |
| <b>Figura 46</b> Impacto Porcentual del FIS en el Tonelaje cuando el Mineral es Normal .....                       | 78  |
| <b>Figura 47</b> Comparación entre el Tonelaje Registrado y el Tonelaje Sugerido cuando el Mineral es Grueso ..... | 80  |
| <b>Figura 48</b> Impacto Porcentual del FIS en el Tonelaje cuando el Mineral es Grueso .....                       | 80  |
| <b>Figura 49</b> Comparación entre el Agua Registrada y el Agua Sugerida cuando el Mineral es Fino .....           | 82  |
| <b>Figura 50</b> Impacto Porcentual del FIS en el Caudal de Agua cuando el Mineral es Fino ...                     | 83  |
| <b>Figura 51</b> Comparación entre el Agua Registrada y el Agua Sugerida cuando el Mineral es Normal .....         | 83  |
| <b>Figura 52</b> Impacto Porcentual del FIS en el Caudal de Agua cuando el Mineral es Normal .....                 | 84  |
| <b>Figura 53</b> Comparación entre el Agua Registrada y el Agua Sugerida cuando el Mineral es Grueso .....         | 86  |
| <b>Figura 54</b> Impacto Porcentual del FIS en el Caudal de Agua cuando el Mineral es Grueso .....                 | 86  |
| <b>Figura 55</b> Comparación entre el P80 Registrado y el P80 Simulado cuando el Mineral es Fino .....             | 88  |
| <b>Figura 56</b> Impacto Porcentual del FIS en el P80 cuando el Mineral es Fino.....                               | 88  |
| <b>Figura 57</b> Comparación entre el P80 Registrado y el P80 Simulado cuando el Mineral es Normal .....           | 89  |
| <b>Figura 58</b> Impacto Porcentual del FIS en el P80 cuando el Mineral es Normal.....                             | 90  |
| <b>Figura 59</b> Comparación entre el P80 Registrado y el P80 Simulado cuando el Mineral es Grueso .....           | 91  |
| <b>Figura 60</b> Impacto Porcentual del FIS en el P80 cuando el Mineral es Grueso .....                            | 92  |
| <b>Figura 61</b> Histograma de Respuestas Difusas.....                                                             | 94  |
| <b>Figura 62</b> Histograma del F80 cuando el Tonelaje Disminuyó Mucho .....                                       | 95  |
| <b>Figura 63</b> Histograma de la Corr_M1 cuando el Tonelaje Disminuyó Mucho.....                                  | 96  |
| <b>Figura 64</b> Histograma de la Corr_M2 cuando el Tonelaje Disminuyó Mucho.....                                  | 96  |
| <b>Figura 65</b> Histograma de la Corr_ZAF cuando el Tonelaje Disminuyó Mucho.....                                 | 97  |
| <b>Figura 66</b> Histograma del F80 cuando el Tonelaje Disminuyó .....                                             | 97  |
| <b>Figura 67</b> Histograma de la Corr_M1 cuando el Tonelaje Disminuyó .....                                       | 98  |
| <b>Figura 68</b> Histograma de la Corr_M2 cuando el Tonelaje Disminuyó .....                                       | 99  |
| <b>Figura 69</b> Histograma de la Corr_ZAF cuando el Tonelaje Disminuyó .....                                      | 99  |
| <b>Figura 70</b> Histograma del F80 cuando el Tonelaje Aumentó.....                                                | 100 |
| <b>Figura 71</b> Histograma de la Corr_M1 cuando el Tonelaje Aumentó .....                                         | 100 |
| <b>Figura 72</b> Histograma de la Corr_M2 cuando el Tonelaje Aumentó .....                                         | 101 |
| <b>Figura 73</b> Histograma de la Corr_ZAF cuando el Tonelaje Aumentó .....                                        | 101 |
| <b>Figura 74</b> Histograma del F80 cuando el Tonelaje Aumentó Mucho .....                                         | 102 |
| <b>Figura 75</b> Histograma de la Corr_M1 cuando el Tonelaje Aumentó Mucho.....                                    | 102 |

|                  |                                                                        |     |
|------------------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 76</b> | Histograma de la Corr_M2 cuando el Tonelaje Aumentó Mucho.....         | 103 |
| <b>Figura 77</b> | Histograma de la Corr_ZAF cuando el Tonelaje Aumentó Mucho.....        | 103 |
| <b>Figura 78</b> | Imagen Referencial de la Base de Datos Operacional.....                | 118 |
| <b>Figura 79</b> | Imagen Referencial del Algoritmo de Lógica Difusa en Google Colab..... | 119 |

# **CAPÍTULO I**

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Introducción**

En la industria minera, el proceso de molienda es probablemente el más crítico, ya que la granulometría alcanzada en esta fase influye directamente en el grado de recuperación en las etapas subsecuentes, afectando la rentabilidad económica del proceso.

Asimismo; algunos autores como Chen et al. (2007) y Granados (2018) resaltan la importancia de minimizar el consumo de energía, recurso hídrico y materiales en este proceso, ya que esto permitiría maximizar la protección del medio ambiente, minimizar la huella de CO<sub>2</sub> e incrementar la satisfacción social.

Por ello, durante la última década, la aplicación de estrategias de control para optimizar los sistemas de molienda ha tomado mayor relevancia dentro del sector. En especial, según lo propuesto por Candiotti et al. (2020) las estrategias basadas en lógica difusa han emergido como herramientas predominantes, debido a su simpleza y a que esta técnica incluye el conocimiento experto de las personas vinculadas al proceso.

A la fecha, existen varias unidades mineras que cuentan con un Sistema de Control Distribuido (DCS) que permite el desarrollo de lógicas de control difuso. Sin embargo, esto conlleva una gran inversión y a su vez, la contratación de empresas de ingeniería especializadas para su desarrollo, lo que limita su aplicación masiva debido a restricciones presupuestarias. No obstante, existe también la posibilidad de utilizar lenguajes de programación de código abierto, como Python, para el desarrollo, aplicación y/o simulación de Sistemas de Inferencia Difusa (FIS) . Por lo cual, esta investigación propone emplear un FIS de tipo Mamdani para optimizar el proceso de molienda primaria de una Unidad Minera.

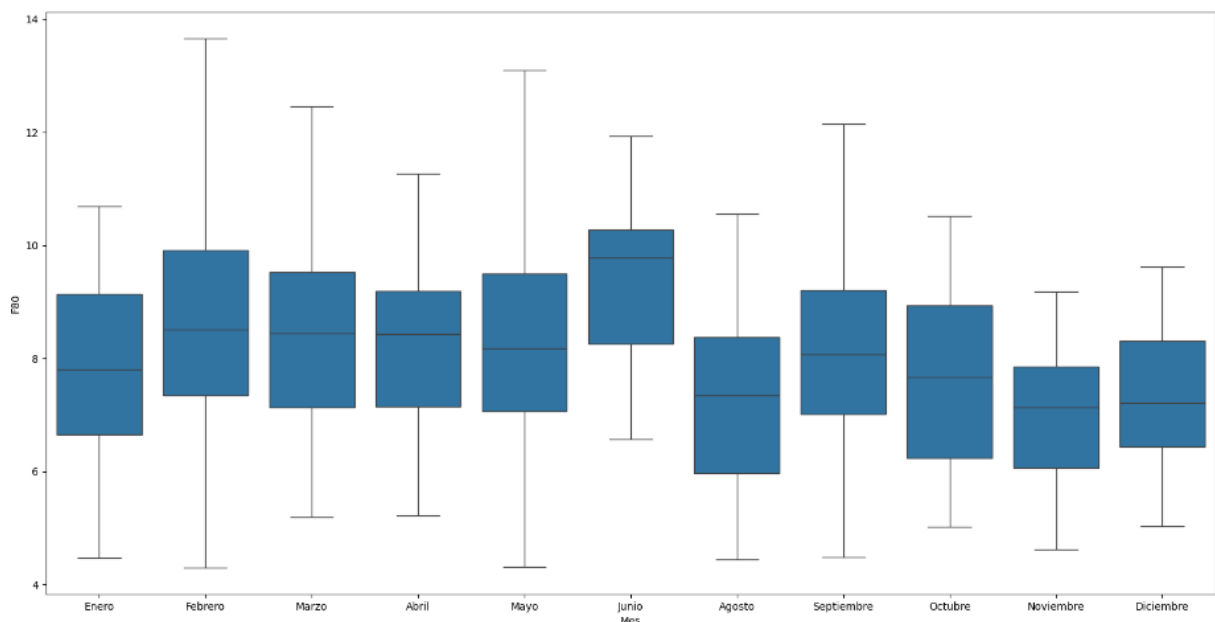
## 1.2. Planteamiento de Problema

### 1.2.1. Descripción de la Problemática

Un estudio realizado en una Unidad Minera determinó que existe variabilidad operacional en su área de molienda de molienda primaria. En la Figura 1, se observa que los valores del tamaño F80 del alimento oscilan entre 4 mm a 12.5 mm; sin embargo, el F80 al que debería trabajar el molino es de 6.5 mm.

**Figura 1**

*Variación Histórica del Tamaño F80*



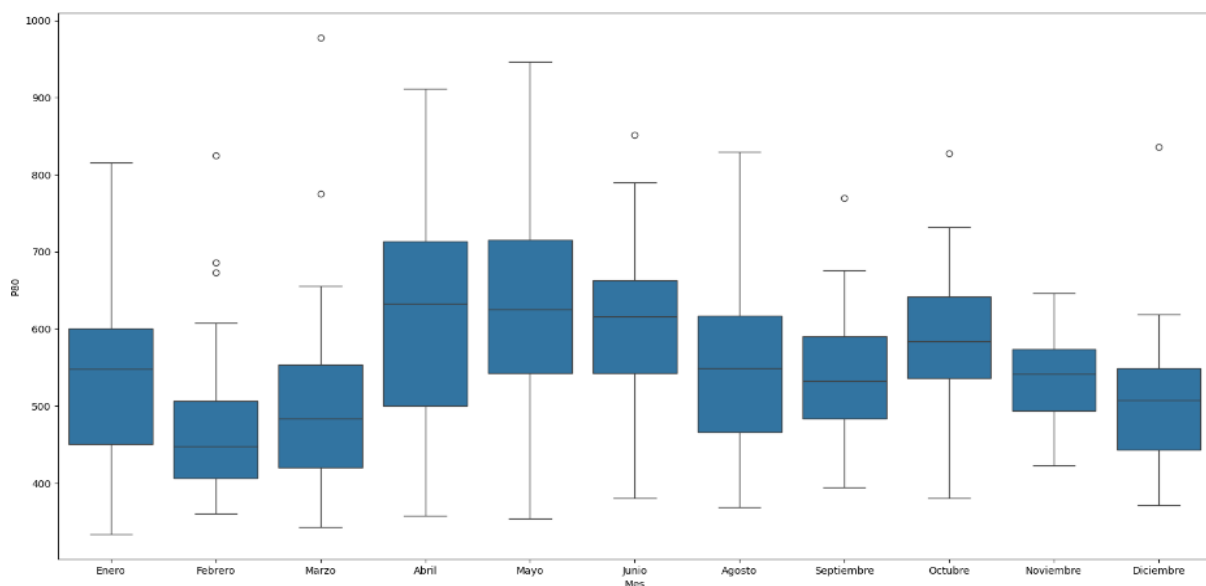
Nota. Información operacional de la unidad minera.

Esta alta variabilidad, genera tres problemas principales: el engrosamiento del tamaño del producto de molienda (caracterizado por un P80 grueso), la disminución del flujo de mineral procesado y el aumento del flujo de agua consumida.

Con respecto al tamaño de partícula P80 en la molienda, en la Figura 2, se observa que el valor medio del P80 fluctuó entre las 400  $\mu\text{m}$  a las 900  $\mu\text{m}$ , con un valor promedio de 585  $\mu\text{m}$ ; sin embargo, el P80 al que debería trabajar el molino es de 500  $\mu\text{m}$ .

**Figura 2**

*Variación Histórica del Tamaño P80*

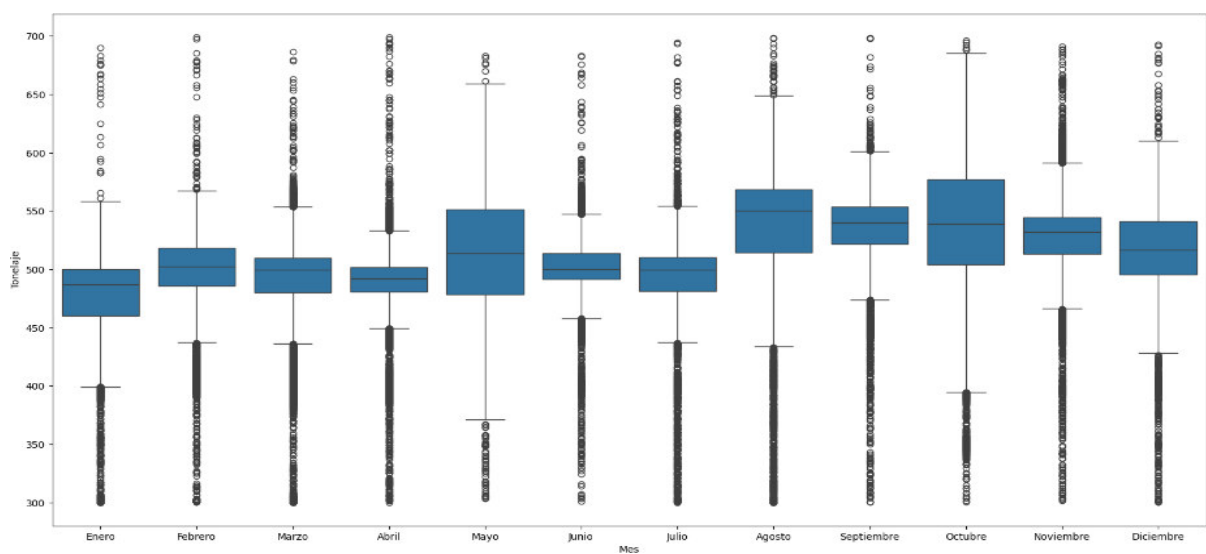


Nota. Información operacional de la unidad minera.

En relación con flujo de mineral procesado, la Figura 3, muestra que los valores de tonelaje oscilaron entre 300 t/h a 700 t/h, con un valor promedio de 510 t/h; sin embargo, el tonelaje al que debería trabajar el molino es de 550 t/h.

**Figura 3**

*Variación Histórica del Tonelaje*

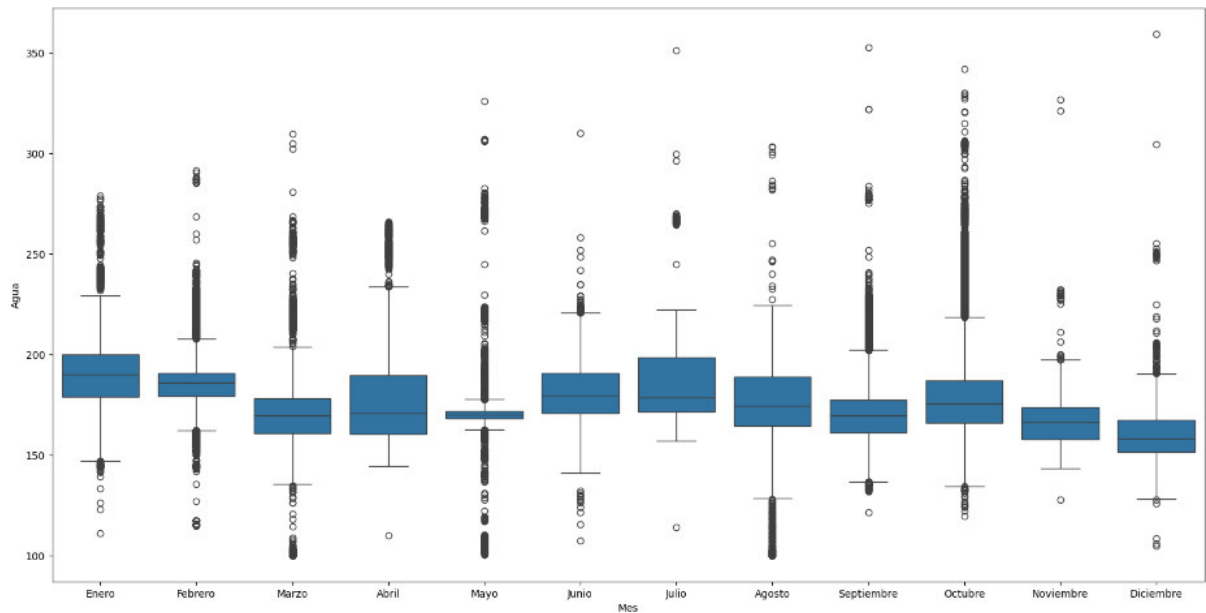


Nota. Información operacional de la unidad minera.

Asimismo, en lo que respecta al flujo de agua consumida en la molienda, la Figura 4, muestra que el flujo de agua oscilo entre los 100 m<sup>3</sup>/h a los 350 m<sup>3</sup>/h, con un valor promedio de 180 m<sup>3</sup>/h; sin embargo, el flujo de agua ideal es de 150 m<sup>3</sup>/h.

**Figura 4**

*Variación Histórica del Flujo de Agua Consumida*



Nota. Información operacional de la unidad minera.

## 1.2.2. Formulación del Problema

### 1.2.2.1. Problema General.

- El ingreso de mineral fresco con un tamaño F80 grueso genera variabilidad operacional en el proceso de molienda primaria de una U.M.

### 1.2.2.2. Problemas Específicos.

- ¿Cómo maximizar el tonelaje procesado en la molienda primaria de una U.M?
- ¿Cómo reducir la cantidad de agua consumida en la molienda primaria de la U.M?
- ¿Cómo reducir el tamaño de partícula P80 en la molienda primaria de una U.M?

### **1.3. Objetivos de la Investigación**

#### **1.3.1. *Objetivo General.***

- Reducir la variabilidad operacional del proceso molienda primaria de la U.M.

#### **1.3.2. *Objetivos Específicos.***

- Maximizar el tonelaje procesado en la molienda primaria de una U.M.
- Reducir la cantidad de agua consumida en la molienda primaria de la U.M.
- Reducir el tamaño de partícula P80 en la molienda primaria de una U.M.

### **1.4. Importancia y Alcance de la Investigación**

La importancia de la presente investigación se justifica desde:

*Perspectiva metodológica.* La investigación expandirá el conocimiento sobre las estrategias de control aplicadas a la optimización de la molienda, incluyendo como factor diferencial el emplear un Sistema de Inferencia Difuso (FIS) desarrollado en código abierto.

*Perspectiva práctica.* La investigación permitirá optimizar el proceso de molienda de bolas a partir de la aplicación de un Sistema de Inferencia Difusa (FIS) garantizando un impacto directo en el tamaño P80 del producto, el tonelaje de mineral procesado, y el flujo de agua consumido.

### **1.5. Limitaciones de la Investigación**

La presente investigación busca desarrollar un FIS partir de datos operacionales históricos. Esto significa que las sugerencias de optimización que brindará la herramienta responderán a las condiciones operacionales de dichos datos y serán evaluadas en un entorno virtual (simulación). Por lo tanto, los porcentajes de mejora operacional estimados por la herramienta deberán ser validados en una etapa posterior con pruebas industriales, a través de data captada por sensores y muestreos en campo.

## CAPÍTULO II

### 2. EL MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de la Investigación

Los principales antecedentes bibliográficos relacionados con la investigación son:

**Zou et al. (2022)**<sup>1</sup> tuvieron como objetivo desarrollar un método de control lógico difuso adaptivo que respondiera a la recurrente variación de las propiedades del mineral y permitiera optimizar el proceso de molienda.

La metodología de trabajo consistió en extraer la tendencia del sonido de molienda mediante el análisis de tendencia cualitativo (QTA) propuesto por Mauram et al. (2010) y en desarrollar un controlador difuso adaptativo mejorado basado en FCM, que incluyó: (1) Desarrollo de un algoritmo de agrupamiento FCM, (2) Determinación del conjunto universo, (3) Determinación de la función membresía, (4) Elaboración de las reglas difusas para el control del proceso de molienda y (5) Inferencia difusa mediante el método de Mamdani y Defuzzificación. En el controlador difuso propuesto por los autores la señal de sonido de molienda y la potencia del molino se utilizan como variables de entrada; y la alimentación de mineral, así como la alimentación de agua, se utilizan como variables de salida.

Los resultados de la simulación demuestran que el enfoque propuesto logra una menor fluctuación en la alimentación de mineral, en comparación con el control manual, y que, garantiza que el rendimiento del mineral cumpla con el objetivo operacional.

El trabajo concluye que la aplicación de un control difuso adaptativo mejorado puede estabilizar la carga del molino y el proceso de molienda, reduciendo el consumo de energía y garantizando el rendimiento del mineral.

---

<sup>1</sup> Zou, M., Yi, J., Yang, C., Liao, Q., Xiong, W. y Wang, X. (2022). Adaptive Fuzzy Logic Control for Grinding Process Based on Grinding Sound Trend. *IFAC-PapersOnLine*, 55(21), 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.254>

**Alfaro (2021)<sup>2</sup>** tuvo como objetivo desarrollar un modelo matemático que considerara las principales variables de un molino y ajustara su respuesta según los datos operacionales tomados en una de las unidades mineras de la empresa Antapaccay.

Utilizó como metodología el diseño de grupos de control, considerando dos grupos de control: principales y secundarios. En relación con los grupos primarios, el autor consideró: (1) Control de potencia, (2) Control de Peso, (3) Control de Impactos Críticos, (4) Control de Pebbles y (5) Control de Mejora de Producción del Molino. Con respecto al control secundario, este permitió fijar el objetivo de peso mediante lógica difusa de acuerdo con la diferencia entre la potencia y los impactos críticos.

Los resultados sostienen que el control difuso maximizó el tonelaje procesado por el molino SAG en 3.47%, lo que representó un incremento de 78,240 Ton en producción neta y un beneficio económico aproximado de USD 5,864,000 asumiendo una Ley de Cu de 1% y un porcentaje de recuperación de 85%. Asimismo, la mejora calculada en impactos críticos fue de 22.13%, lo que se reflejó en el aumento del tiempo necesario para el cambio de liners en 6 a 8.5 meses, reduciendo el costo anual de mantenimiento del molino SAG. Además, cuando se realizaron pruebas para evaluar el control de perturbaciones al proceso, considerando al control de flujo de Pebbles, se obtuvo una mejora en tiempo pico de 51.9% y una mejora en sobre impulso máximo de 56.3%.

El autor concluye que en comparación al control manual donde la respuesta del control del peso del molino no es estable, oscilando con valores de error entre el 11% y el 8%; el sistema de control avanzado basado en lógica difusa tiene un porcentaje de error absoluto menor al 2%.

---

<sup>2</sup> Alfaro, A. (2021). *Modelamiento y diseño de un sistema de control de las variables críticas de un molino semiautógeno mediante un sistema experto basado en control MPC y lógica difusa*. [Tesis de postgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/21199>

**Huaman (2019)<sup>3</sup>** tuvo como objetivo evaluar el impacto económico de la implementación del sistema de control basado en lógica difusa para el circuito de control de molienda en el proceso metalúrgico en la planta concentradora de la Minera Condestable.

La metodología de trabajo consistió en un conjunto de pasos que permitieron al autor la construcción de un sistema experto basado en lógica difusa: (1) Identificación de variables del dominio, (2) Identificación de los términos lingüísticos vinculados a cada variable y su respectiva definición, (3) Construcción de las reglas difusas mediante la Matriz de Asociación Difusa (FAM) y finalmente, (4) Representación simbólica de las reglas difusas. En el controlador difuso propuesto por el autor la densidad de la pulpa (producto de molienda), nivel de cajón de descarga y el tonelaje procesado por hora (TPH) se utilizan como variables de entrada; y la alimentación de agua (controlada mediante una válvula automática), así como, la alimentación de mineral fresco (controlada por la velocidad de la faja de alimentación) se utilizan como variables de salida.

Los resultados sostienen que con la implementación del sistema de control basado en lógica difusa fue posible incrementar el tonelaje tratado en casi 2 TMPD (toneladas métricas procesadas por día), lo que representa hasta un 4.44% de incremento con respecto al tonelaje histórico, además, fue posible disminuir la densidad de pulpa en 6%, garantizando una mayor estabilidad en el proceso comparado al escenario base.

La investigación concluyó que con un sistema experto basado en lógica difusa en funcionamiento es posible estabilizar y optimizar el proceso de molienda. Además, puesto en servicio garantiza un funcionamiento constante sin paradas intempestivas, incrementando la disponibilidad de los equipos.

---

<sup>3</sup> Huaman Huacho, H. R. (2019). *Implementación de un sistema de control basado en lógica difusa para el proceso de molienda*. [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Tecnológica del Perú]. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/2374>

**Khodadadi y Ghadiri (2019)<sup>4</sup>** tuvieron como objetivo desarrollar un controlador basado en lógica difusa para mejorar el control del circuito de molienda.

Cómo método de optimización los autores utilizaron un controlador PID (control proporcional, integral y derivativo) de autoajuste mediante lógica difusa, que es una combinación de lógica difusa y un controlador PID convencional, esto con la finalidad de controlar el sistema de molienda, especialmente en presencia de desajustes y perturbaciones ocasionadas por condiciones operacionales. Además, con el fin de resolver los desafíos del sistema, los autores también proponen un enfoque de control multivariable basado en un observador de perturbaciones mejorado para suprimir los efectos de las perturbaciones.

El controlador difuso desarrollado permitió que el tamaño de partícula del producto y la carga circulante sean reguladas a partir de la tasa de alimentación de mineral fresco y el caudal de agua de dilución. Asimismo, para el desarrollo del controlador, el autor consideró al molino de bolas como un sistema multi-entrada-multi-salida (MIMO), considerando su estructura, alta interacción, retrasos de tiempo y grandes perturbaciones externas.

Los resultados sostienen que, para mejorar el rendimiento del controlador en la eliminación de grandes perturbaciones, un observador de perturbaciones mejorado (DOB) debe asegurarse de minimizar la influencia de la perturbación en la salida del sistema mediante el uso de un compensador principal.

Finalmente, los autores concluyen que las simulaciones en presencia de perturbaciones internas y externas demuestran mejor desempeño con el controlador FLST-PID basado en IDOB en comparación con el controlador PI-IDOB, especialmente en la respuesta transitoria.

---

<sup>4</sup> Khodadadi, H. y Ghadiri, H. (2019). Fuzzy Logic Self-Tuning PID Controller Design for Ball Mill Grinding Circuits Using an Improved Disturbance Observer. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 36(1), 1075–1090. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-0098-y>

**Granados (2018)**<sup>5</sup> tuvo como objetivo maximizar la producción de una planta concentradora, a partir de mayores flujos de mineral procesado, menores consumos de energía específica, y menor cantidad de agua alimentada al proceso.

Para ello el autor utilizó como método de simulación el control basado en lógica difusa, lo que le permitió controlar la variación del flujo de alimentación del mineral al molino, así como el caudal de agua alimentación al cajón de descarga del molino. Además, consideró cuatro variables de control: (1) la granulometría, controlada en un valor máximo deseado, (2) la potencia del motor del molino, controlada en valores mínimos deseados, (3) el amperaje del motor de la bomba de ciclones, controlado en un valor máximo deseado y (4) el nivel del cajón de descarga, controlada en un valor máximo deseado.

Los resultados sostienen que, son seis los estados que deben ser configurados en el diseño de control usando lógica difusa: (1) Estado de control activo, (2) Estado de sobrecarga, (3) Estado de amperaje alto de la bomba de ciclones, (4) Estado de control de la granulometría, (5) Estado de equilibrio y (6) Estado de carga baja. Además, el autor menciona que, controlando estos seis estados, manipulando los flujos de agua y el mineral alimentado al molino, es posible maximizar el tonelaje procesado.

El autor concluye que el control difuso permite controlar la variación de flujo de alimentación del mineral al molino según lo planteado. Además, se validó que, una vez activado el control, el molino operó sin cortes de carga, ya sea debido a sobrecargas, paradas de la bomba de ciclones o por el alto nivel del cajón; asimismo, el control difuso garantizó una pulpa de mineral con una calidad de la granulometría adecuada a la etapa de flotación rougher.

---

<sup>5</sup> Granados, F. (2018). *Diseño de una estrategia de control multivariable para el incremento del régimen de carga de mineral en el área de Molienda de una planta concentradora usando lógica difusa*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/15784>

**Ninam, Wyk y Tu (2018)**<sup>6</sup> tuvieron como objetivo implementar un control predictivo para mejorar los retratos de tiempo y el consumo de energía en el proceso de molienda.

Utilizaron como método el control predictivo de modelos no lineales (NMPC), basado en análisis computacional difuso y control de lazo abierto de horizonte finito. En este método el comportamiento de bucle cerrado es diferente de un comportamiento predictivo, ya que necesita ser medido primero antes de cualquier otra suposición o predicción.

Los resultados obtenidos por los autores sostienen que las variables operativas tienen un efecto enorme sobre el factor de consumo de energía en la molienda. Por ello, la variable bola es la variable que más constantemente indica un efecto considerable sobre la potencia del molino. Ya que, la carga de mineral se volvió mucho más fina a medida que disminuyó la potencia consumida. En cuanto al tamaño de las bolas, los elevadores de bolas elevaron las bolas pequeñas, dislocando el centro de gravedad lejos del centro del molino. Probando que el tamaño del medio de molienda es la variable que más afecta el consumo de energía y la rotura de partículas. Asimismo, respecto a las variables elegidas se puede priorizar ya sea la rotura rápida o la eficiencia de la molienda.

Finalmente, los autores concluyeron que la mejora del rendimiento económico puede incrementarse mediante la implementación de una simulación DEM (Método de Elementos Discretos) a mayor escala. Ya que, la simulación DEM ha demostrado ser una herramienta muy poderosa para crear simulaciones de molienda en molinos de bolas. Además, los autores sugieren realizar trabajos futuros con menor velocidad de rotación, para adquirir las condiciones operativas óptimas bajo las cuales la planta logrará actuaciones de mayor eficiencia.

---

<sup>6</sup> Ninam, K., Wyk, B. y Tu, C. (2018). Fuzzy Logic Non-Linear Model Predictive Control of the Grinding Process in Ball Mills. 2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICONIC.2018.8601265>

**Guerrero (2017)<sup>7</sup>** tuvo como objetivo reducir el consumo de energía eléctrica (KW-h/tc) de un molino de bolas a escala de laboratorio ubicado en la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la FIGMM - UNI. Para ello, desarrolló un sistema de control automático aplicado a un molino de bolas de 12" x 12" utilizando el entorno de simulación Simulink.

Utilizó como método de simulación el control automático basado en lógica difusa, este algoritmo buscó controlar la velocidad del molino (RPM) mediante el Work Index en lazo abierto y reducir la energía específica consumida por el motor del molino en lazo cerrado mediante un controlador PID. Para el desarrollo y calibración de este algoritmo, el autor realizó pruebas experimentales en donde cambió las velocidades de rotación del molino, y midió la potencia consumida en cada variación para determinar el Work Index operacional, para ello, modificó el tablero eléctrico de control del molino de bolas añadiendo un variador de frecuencia, un medidor de energía eléctrica multifuncional y un PLC.

Los resultados obtenidos por el autor mediante simulaciones sostienen que un sistema de control difuso modifica automáticamente las RPM del molino ante cualquier cambio en la granulometría (F80 o P80), evitando producir exceso de finos y regulando la carga circulante. Asimismo, en relación la energía específica consumida, esta última puede ser vista como un indicador indirecto de la dureza del mineral, ya que, al ser más duro, esta aumenta, y al ser más blando, esta disminuye.

Finalmente, el autor concluye que al incrementar la velocidad del molino (RPM) durante el proceso de molienda, la energía eléctrica consumida aumenta y la granulometría P80 del producto disminuye, en cambio, si la velocidad del molino disminuye, la energía eléctrica consumida es menor y la granulometría P80 del producto aumenta.

---

<sup>7</sup> Guerrero, J. (2017). *Reducción del consumo energético de un molino de bolas mediante un sistema de control automático para la velocidad de rotación del molino*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/12195>

**Modesto y Melo (2017)**<sup>8</sup> tuvieron como objetivo maximizar la tasa de alimentación de mineral que ingresa a un molino de bolas, considerando como variable crítica el rango del tamaño de partículas y variando dinámicamente los puntos de ajuste del proceso a través de un controlador PID en un entorno virtual simulado.

Para ello, los autores utilizaron como método la simulación dinámica bajo un modelo abierto con abordaje modular. Asimismo, el modelo matemático empleado fue la ecuación del mezclado perfecto.

Los resultados obtenidos por los autores sostienen que, combinando la estabilidad de la granulometría del producto con la aplicación de un controlador difuso se logró incrementar la producción de mineral en el molino entre un 3% a 5%. Además, en relación con la tasa de adición de agua, este lazo requirió de control mediante dos controladores PID en cascada, donde el primero actuó ajustando la densidad de la pulpa y el segundo, la tasa de adición de agua en el cajón de descarga. Así, en todos los escenarios, la densidad de la pulpa para el controlador difuso fue menor hasta en un 2,8% con respecto al valor histórico. Asimismo, con respecto a la carga circulante, se determinó que para los escenarios donde el control difuso se mantuvo encendido, esta fue mayor, ya que, al aumentar la carga circulante, aumentó la cantidad de material que ingresaba el molino y disminuyó el tiempo de residencia de cada partícula dentro del mismo, ocasionando que disminuyera la generación de finos y se mantuviera la granulometría del producto dentro del intervalo requerido por el proceso.

Finalmente, los autores concluyen que actuando en una capa de control más alta que la del control regulatorio tradicional a través de un controlador difuso, es posible determinar los puntos de ajuste adecuados para cumplir todos los objetivos propuestos.

---

<sup>8</sup> Modesto, J. y Melo, T. (2017). Controlador fuzzy multivariável aplicado a um simulador de circuito de moagem. *18º Simpósio de Mineração*, 47(18), 217 - 222. <https://doi.org/10.5151/2594-357X-30498>

## 2.2. Bases Teóricas

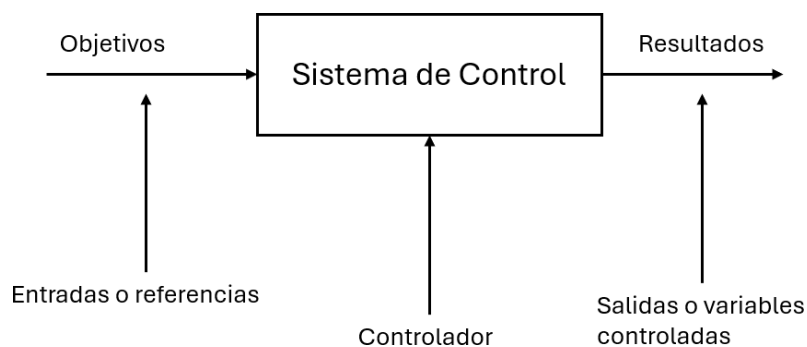
### 2.2.1. Estrategia de Control

Pérez et al. (2007)<sup>9</sup> definen los sistemas de control como “*un arreglo de componentes físicos conectados de tal manera que el arreglo pueda comandar, dirigir o regular, asimismo o a otro sistema*”.

Sobre los elementos que conforman un sistema de control, Gandhi (2019)<sup>10</sup> menciona que está constituido por tres elementos base: una variable a la cual controlar, un actuador y un punto de referencia o set-point de salida. La estructura básica de operación y/o conformación de un sistema de control se observa en la Figura 5.

**Figura 5**

*Estructura de un Sistema de Control*



Nota. Imagen extraída Pérez et al. (2007).

Es importante mencionar que según López (2021, p. 15)<sup>11</sup> todas las formas de sistema de control se basan en un conocimiento más o menos acabado de un sistema a controlar, tanto en su fenomenología como en sus condiciones de operación, a través de un modelo

<sup>9</sup> Pérez, M., Pérez, A. y Pérez, E. (2007). *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo*.

<sup>10</sup> Gandhi, M. (2019). *¿Qué es un sistema de control?* Recuperado de: <https://www.autycom.com/que-es-un-sistema-de-control/>

<sup>11</sup> López, S. (2021). Apoyo en el diseño y parametrización de un control avanzado de proceso (APC) para un proceso petroquímico basado en analítica de datos. [Informe final de pasantía, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/28248/LopezBlancoSamuelRaul2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

matemático que lo describa en forma bastante aproximada, en todo su rango de operación y para cualquier instante de tiempo.

Asimismo, Cipriano (2010)<sup>12</sup> afirma que respecto a los sistemas control avanzado en el procesamiento de minerales existen principalmente dos categorías. Aquellos que implican el control inteligente de procesos, dónde están incluidos el control experto y la lógica difusa. Y aquellos que implican modelos de control predictivo.

En relación con las técnicas de control avanzado aplicadas a la molienda de minerales, Candiotti et al. (2020)<sup>13</sup> mencionan al control PID, los modelos predictivos (MPC), los sistemas expertos, los controladores difusos y los controladores basados en restricciones como las técnicas más usadas, según se observa en la Figura 6.

**Figura 6**

*Tipos de Controladores más Utilizados en Molienda*



Nota. Extraída de Candiotti et al., 2020.

<sup>12</sup> Cipriano, A. (2010). Industrial Products for Advanced Control of Mineral Processing Plants. En Sbárbaro, D. y Del Villar, R. (Ed.), *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants* (pp. 287 – 306). Springer.

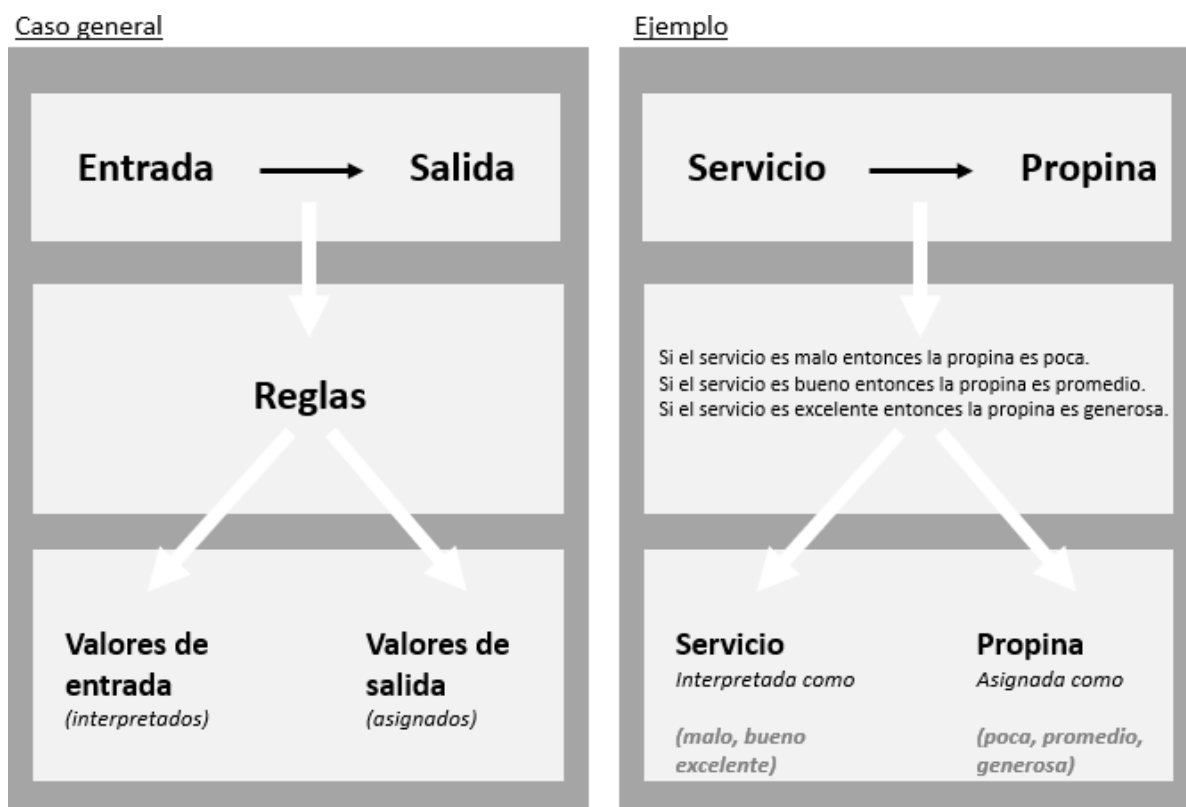
<sup>13</sup> Candiotti, S., Montañó, L., Barja, F., Charca, S., Quineche, L. y Flores, C. (2020). *Estudio del arte de sistemas de molienda polimetálica*. Universidad de Ingeniería y Tecnología.

Puntualmente, para el caso de los sistemas expertos, Cipriano (2010)<sup>12</sup> .menciona que una de las técnicas más aplicadas para el manejo de incertidumbres y errores en estos sistemas de control es la lógica difusa.

### 2.2.2. Lógica Difusa

**Figura 7**

*Proceso de Inferencia Difusa*



Nota. Adaptado de Mathworks, 2020.

Según lo expuesto por Sivnandam et al. (2006)<sup>14</sup> la lógica difusa fue introducida en 1965 por Lotfi Zadeh, y se define como “una herramienta matemática para lidiar con la incertidumbre”. (p.17). En concordancia, Mathworks (2020)<sup>15</sup> afirma que la lógica difusa es un “método que interpreta los valores a través de un vector de entrada y, en base a un

<sup>14</sup> Sivnandam, S. N., Sumathi, S. y Deepa, S.N. (2007). *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. Springer.

<sup>15</sup> Mathworks. (2020). *Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide*.

*conjunto de reglas de tipo si – entonces, asigna valores un vector salida”.* (p.8) Según el autor, la principal ventaja que ofrece el razonamiento de tipo difuso es la capacidad de responder a una pregunta de sí o no con una respuesta "no del todo sí o no".

La Figura 7, refleja el razonamiento básico que sigue la inferencia difusa a través de un ejemplo de cálculo de propina sobre un servicio brindado, en la sección de reglas, estás siguen la estructura de “si – entonces”, en dónde, la forma en la que es brindado un servicio condiciona la cantidad de propina a recibir.

#### **2.2.2.1. Conjuntos Difusos.**

Según lo expuesto por Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> a diferencia de los conjuntos clásicos dónde un elemento pertenece o no pertenece a dicho conjunto, representándose por 1 o 0; los conjuntos difusos pueden tener valores intermedios, por lo tanto, se puede decir que en los conjuntos difusos un elemento puede pertenecer parcialmente a un conjunto dado. (p. 19)

La Figura 8, desarrollada por Mathworks (2020)<sup>15</sup> permite comprender mejor el concepto de un conjunto difuso. Bajo la lógica de los conjuntos clásicos, los días de la semana (A) y los fines de semana (B) se podrían representar de la siguiente forma:

$$A = \{\text{lunes, martes, miércoles, jueves, viernes}\}$$

$$B = \{\text{sábado, domingo}\}$$

Se puede observar que, al ser conjuntos del tipo clásico, cada uno de los elementos es único y solo puede pertenecer a un conjunto a la vez, sin embargo, los conjuntos del tipo difuso proponen un enfoque alternativo, dónde los jueves y viernes se pueden considerar en cierta medida como fines de semana, no en la misma medida, pero sí parcialmente.

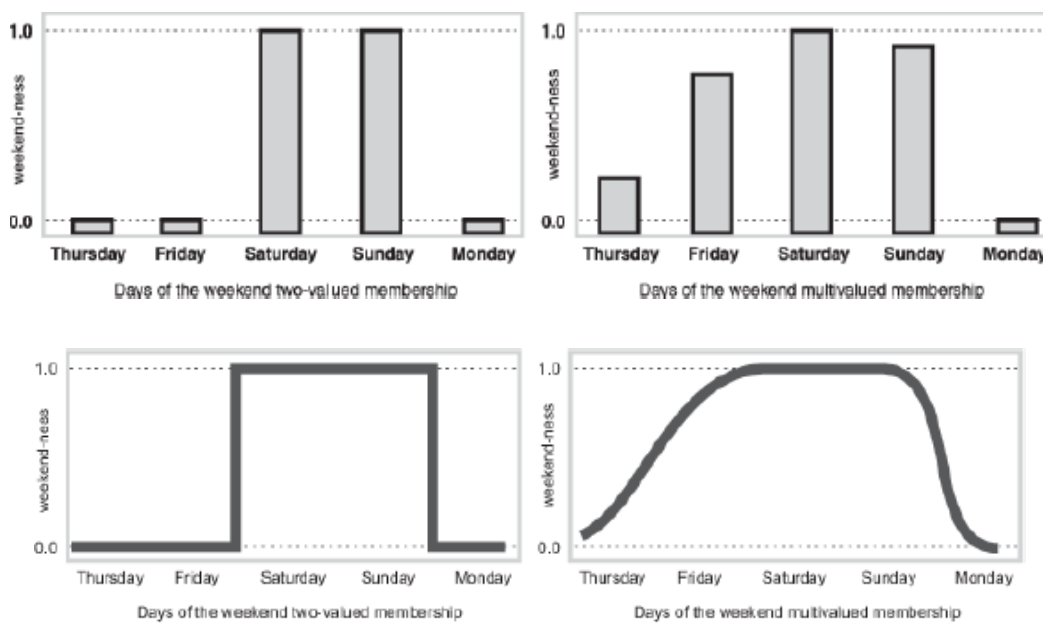
---

<sup>15</sup> Mathworks. (2020). *Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide.*

<sup>16</sup> Singh, H. y Ahmad, Y. (2020). *Deep Neuro – Fuzzy Systems with Python.* With caase studies and applications from the industry. Apress.

**Figura 8**

*Grado de Membresía de un Elemento en un Conjunto Difuso*

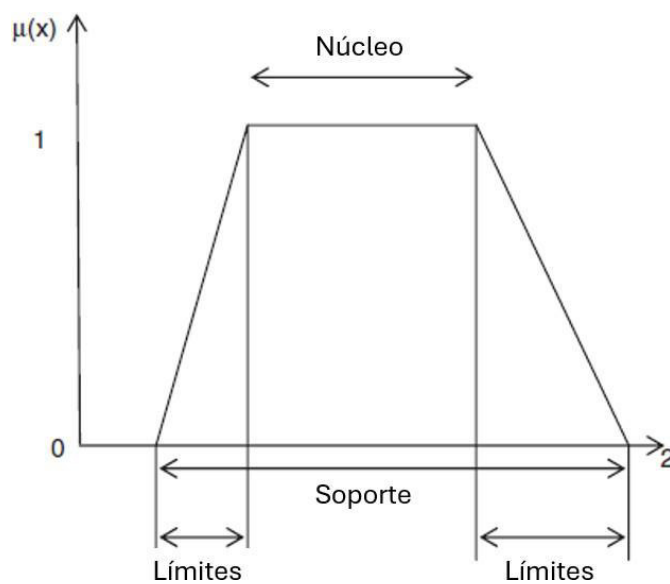


Nota. Extraída de Mathworks, 2020.

#### 2.2.2.2. Funciones de Membresía.

**Figura 9**

*Partes de una Función de Membresía*



Nota. Extraído de Sivanandam et al.(2007)<sup>14</sup>

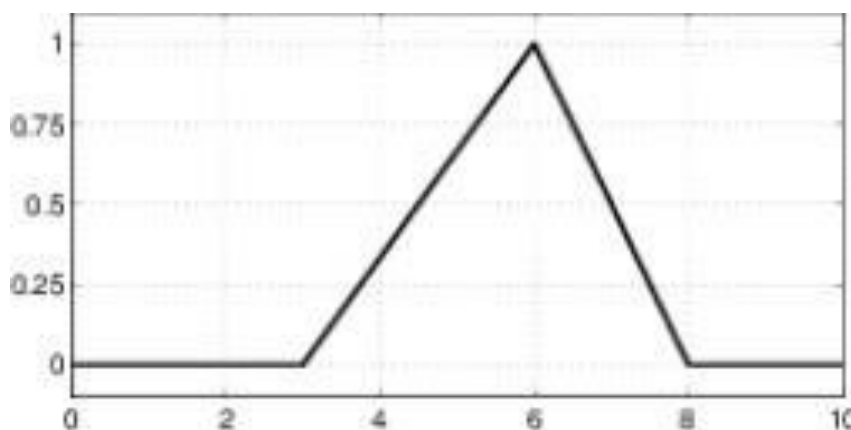
De acuerdo con Mathworks (2020)<sup>15</sup> una función de membresía es una “*curva que define cómo a cada punto en el espacio de entrada se asigna a un valor entre 0 y 1*”. (p. 11). Además, según el autor la función en sí puede ser una curva arbitraria, asimismo, entre las curvas más usadas se mencionan: las funciones lineales, funciones de distribución gaussiana, curvas sigmoidales y curvas polinomiales.

Según Sivanandam et al.(2007)<sup>14</sup>, una función de membresía está definida en función a tres parámetros principales: Núcleo, soporte y límites, como se observa en la Figura 9.

#### 2.2.2.2.1. *Función de Membresía Triangular.*

**Figura 10**

*Función de Membresía Triangular*



Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

Mathworks (2020)<sup>15</sup> menciona que la membresía triangular está conformada por tres puntos en el plano cartesiano que forman un triángulo. Donde, el valor “a” representa el límite inferior, “b” el centro y “c” el límite superior. Según Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> los valores mencionados, responden a la Figura 10 y a la siguiente ecuación:

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases}$$

$$\{ \quad 0, c \leq x$$

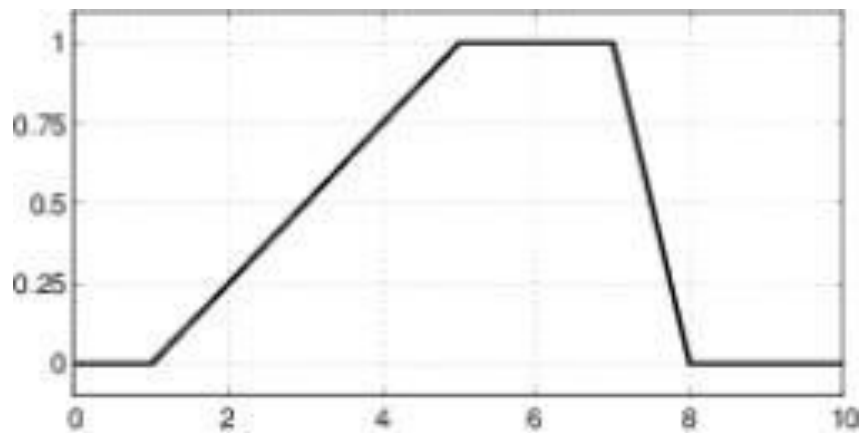
#### 2.2.2.2. *Función de Membresía Trapezoidal.*

Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> afirman que la membresía trapezoidal, Figura 11, está conformada por cuatro coordenadas: a, b, c y d. Dónde se debe cumplir la premisa:  $b < c < d$ , y responder a la siguiente ecuación:

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$$

**Figura 11**

*Función de Membresía Trapezoidal*



Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

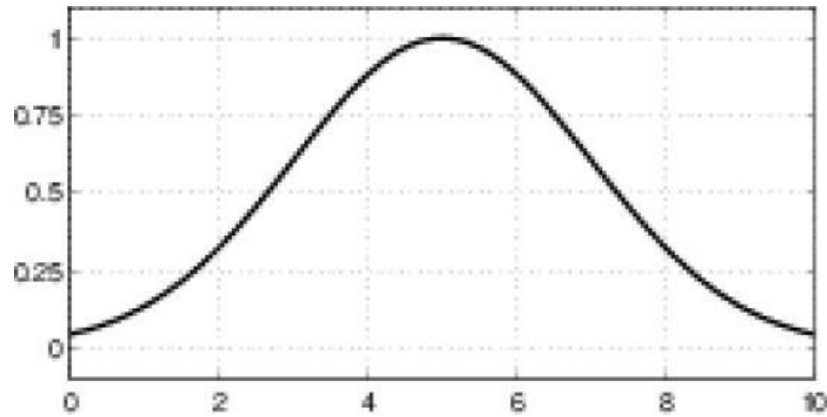
#### 2.2.2.3. *Función de Membresía Gaussiana.*

Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> mencionan que, cuándo es posible conocer la media (c) y la desviación estándar (s), y un factor de fuzzyficación (m) es recomendable utilizar una función de membresía de tipo gaussiana. Que responde a la Figura 12 y a la siguiente ecuación

$$\mu_A(x, c, s, m) = e^{\frac{-1}{2} \left( \frac{x-c}{s} \right)^2 m}$$

**Figura 12**

*Función de Membresía Gaussiana*

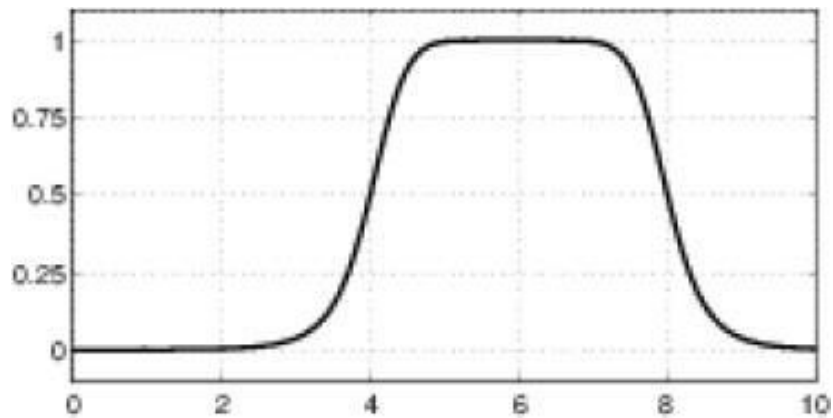


Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

#### **2.2.2.2.4. Función de Membresía de campana.**

**Figura 13**

*Función de Membresía Tipo Campana*



Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> mencionan que esta función de membresía se caracteriza mediante tres valores: la pendiente (b), el centro (c) y el ancho de la curva (a). La membresía tipo campana responde a la Figura 13 y a la siguiente ecuación:

$$gbell(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{b} \right|^{2b}}$$

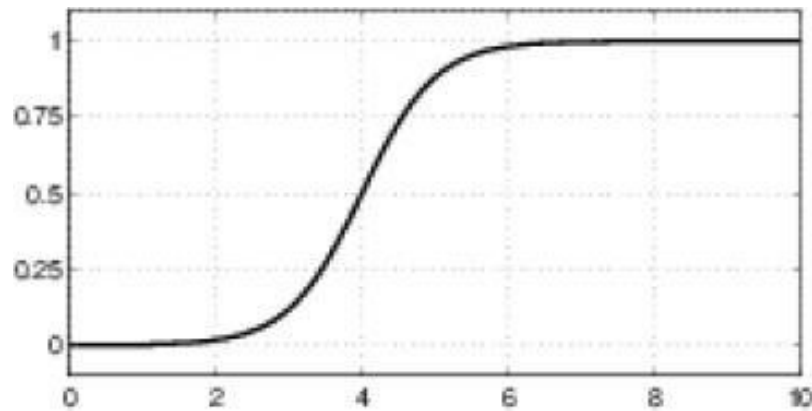
#### 2.2.2.2.5. *Función de Membresía Sigmoidal.*

Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> afirman que esta función de membresía se utiliza principalmente en la construcción de redes neuronales, y utiliza la pendiente (a) y el punto de cruce (c) como valores principales. Responde a la Figura 14 y a la siguiente ecuación:

$$\text{sigmoid}(x, a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$

**Figura 14**

*Función de Membresía Sigmoidal*



Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

#### 2.2.2.3. **Reglas Difusas.**

Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> mencionan que el proceso de incorporar situaciones condicionales se conoce como “reglas difusas”, y estas reglas son del tipo si – entonces. Siguiendo la forma:

*Si x es A entonces y es B*

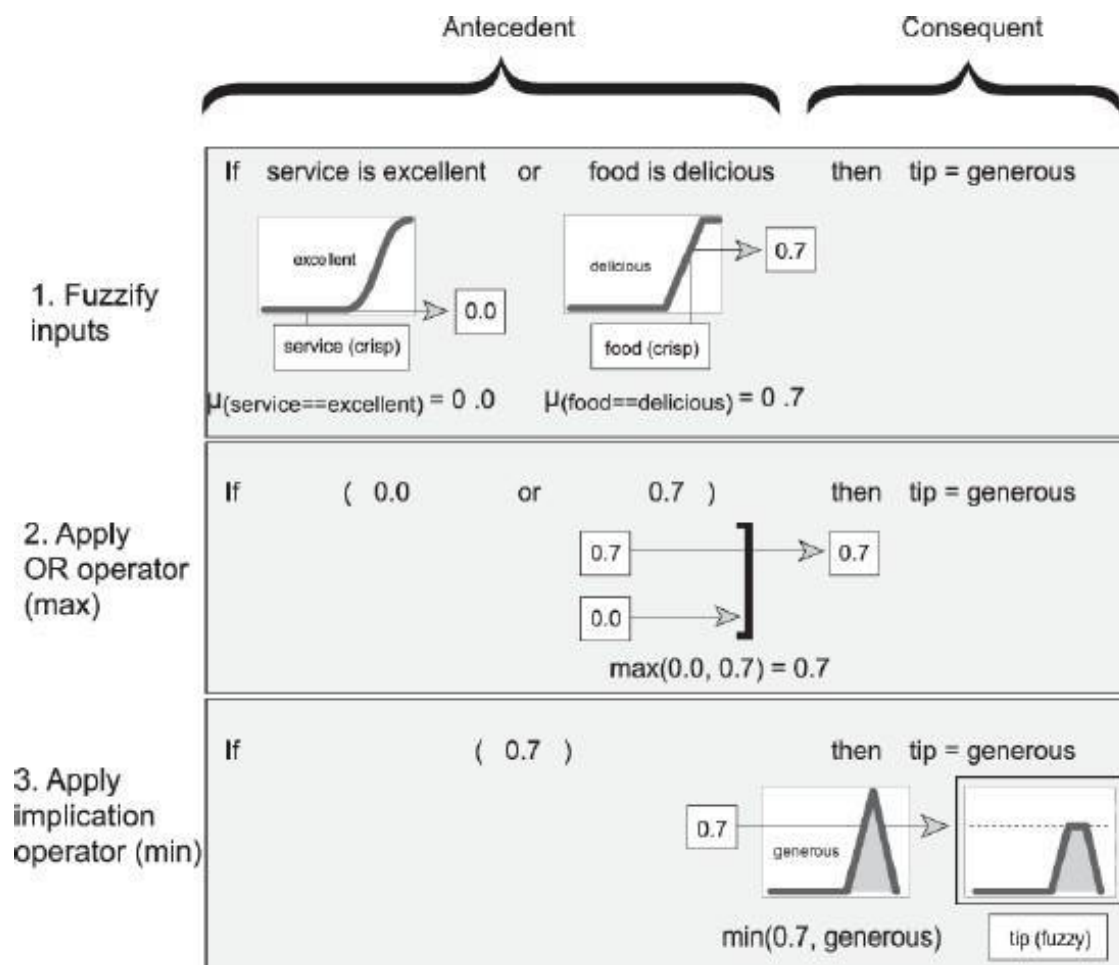
En este enunciado A y B son conocidos como valores lingüísticos, y son valores derivados de una investigación estadística, modelos matemáticos, encuestas, etc. El enunciado anterior se subdivide en dos partes: “x es A” es conocido como antecedente o premisa, mientras que “y es B” es conocido como consecuente o conclusión.

Sobre el proceso que implica el usar las reglas difusas del tipo “si – entonces”, los autores enumeran los siguientes pasos:

- Lectura del antecedente
- Conversión de la entrada a un conjunto difuso
- Aplicar los operadores difusos necesarios.
- Aplicar el resultado a un consecuente.
- Obtener un conjunto difuso como salida.
- Defuzzificar para obtener una respuesta nítida.

**Figura 15**

*Proceso de Interpretación de Reglas Si - Entonces*



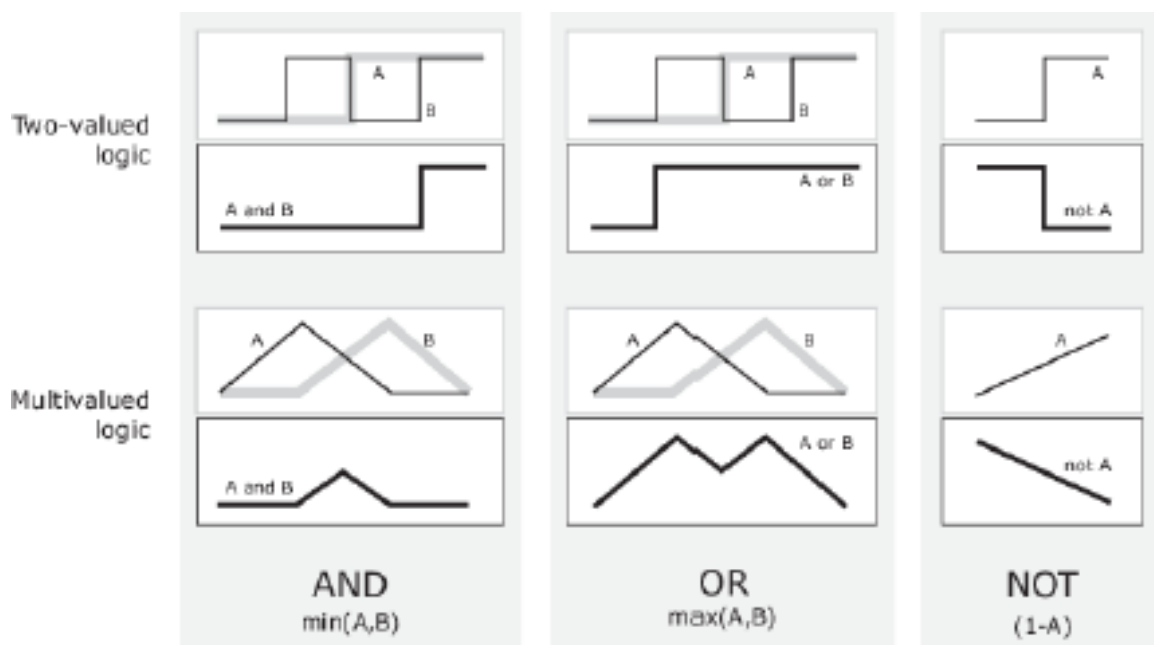
Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

De manera complementaria, Mathworks (2020)<sup>15</sup> menciona que interpretar las reglas del tipo “si – entonces” es un proceso con tres etapas, y se observa en la Figura 15:

- Fuzzificar las entradas.
- Aplicar un operador a los antecedentes.
- Aplicar un método de implicación o defuzzificación.

**Figura 16**

*Operadores Difusos*



Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

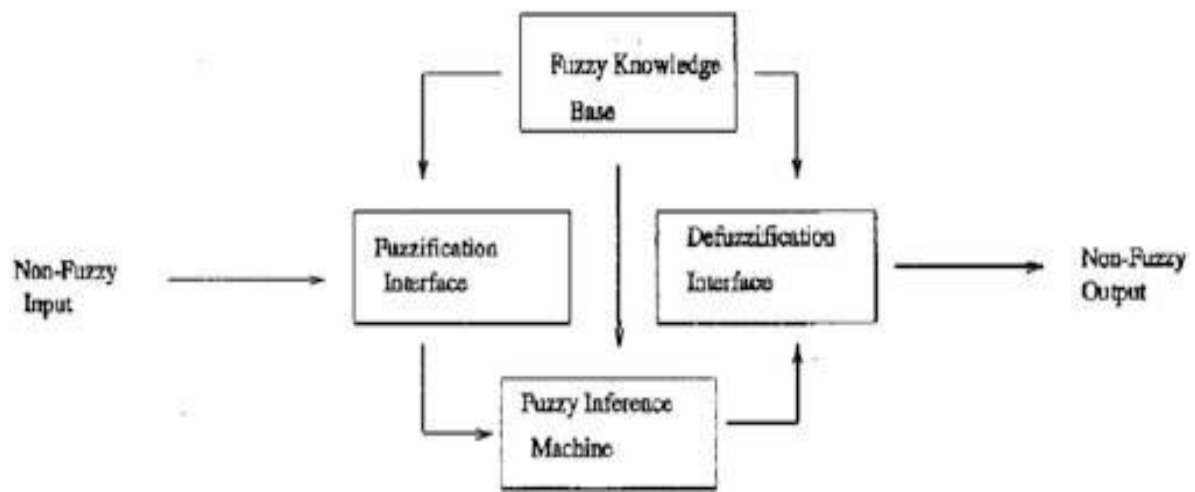
Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> mencionan que el razonamiento difuso es de hecho, un tipo de razonamiento booleano. En otras palabras, si los valores difusos se mantienen entre los extremos 1 (completamente verdadero) o 0 (completamente falso), es factible aplicar los operadores lógicos tradicionales: AND, OR y NOT, según se observa en la Figura 16.

#### 2.2.2.4. Defuzzificación.

Según mencionan Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup>, la Defuzzificación es el proceso de convertir un conjunto difuso en conjunto de datos convencional. Este proceso ayuda a convertir una salida dada en valores nítidos, según se observa en la Figura 17. Esto tiene gran implicancia en los sistemas de control, ya que el proceso de defuzzificación determina que se debe hacer en función de un conjunto de datos de entrada y un conjunto de reglas.

**Figura 17**

*Defuzzificación*



Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

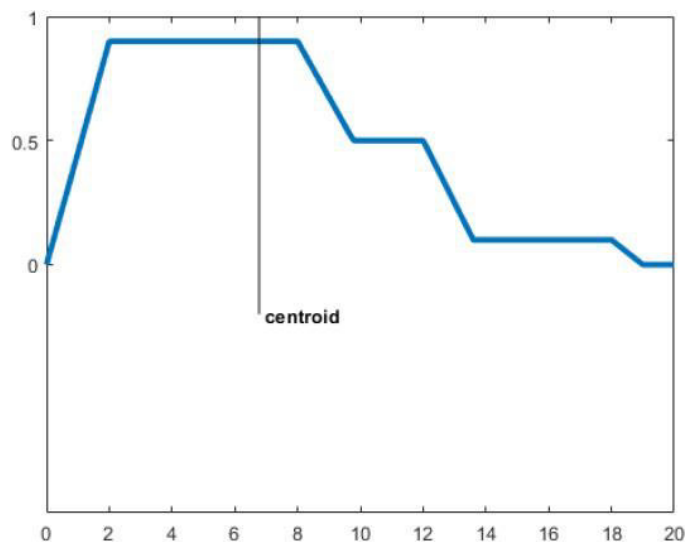
Sobre los métodos existentes de defuzzificación, Matworks (2020)<sup>5</sup>, hacen referencia a cinco: Centroide, Bisectriz, SOM, MOM y LOM.

##### 2.2.2.4.1. Centroide.

Según Matworks (2020)<sup>15</sup>, la defuzzificación mediante el método del centroide consiste en tomar el centro de gravedad del conjunto difuso a lo largo del eje x, según se observa en la Figura 18.

**Figura 18**

*Método del Centroide*



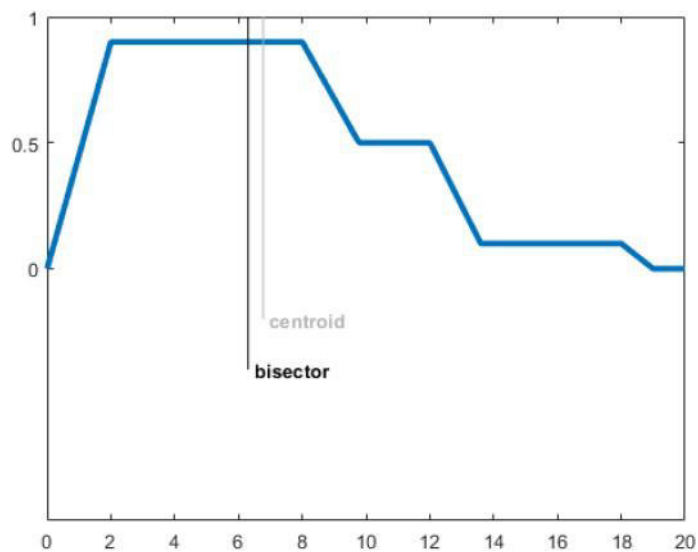
Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

#### **2.2.2.4.2. Bisectriz.**

Según Mathworks (2020)<sup>15</sup>, la defuzzificación mediante el método de la bisectriz consiste en dividir el conjunto difuso en dos subregiones de igual área, según se observa en la Figura 19.

**Figura 19**

*Método de la Bisectriz*



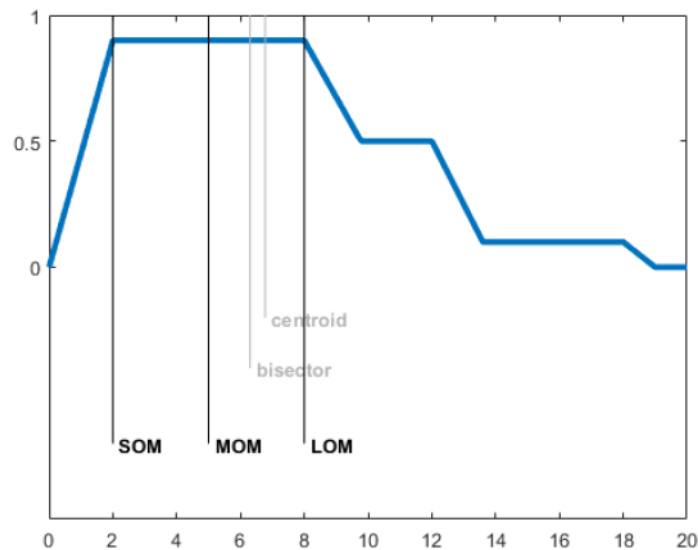
Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

#### 2.2.2.4.3. *MOM, SOM y LOM.*

Mathworks (2020)<sup>15</sup>, afirman que los métodos Valor máximo medio (MOM), Valor máximo más pequeño (SOM) y Valor máximo más grande (LOM) hace referencia a la ubicación del valor máximo en un conjunto difuso. En la Figura 20, se observa que el conjunto de datos presenta más de un valor máximo, en caso el conjunto tuviese un único valor máximo, los métodos MOM, SOM y LOM arrojarían el mismo resultado.

**Figura 20**

*Método MOM, SOM y LOM*



Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

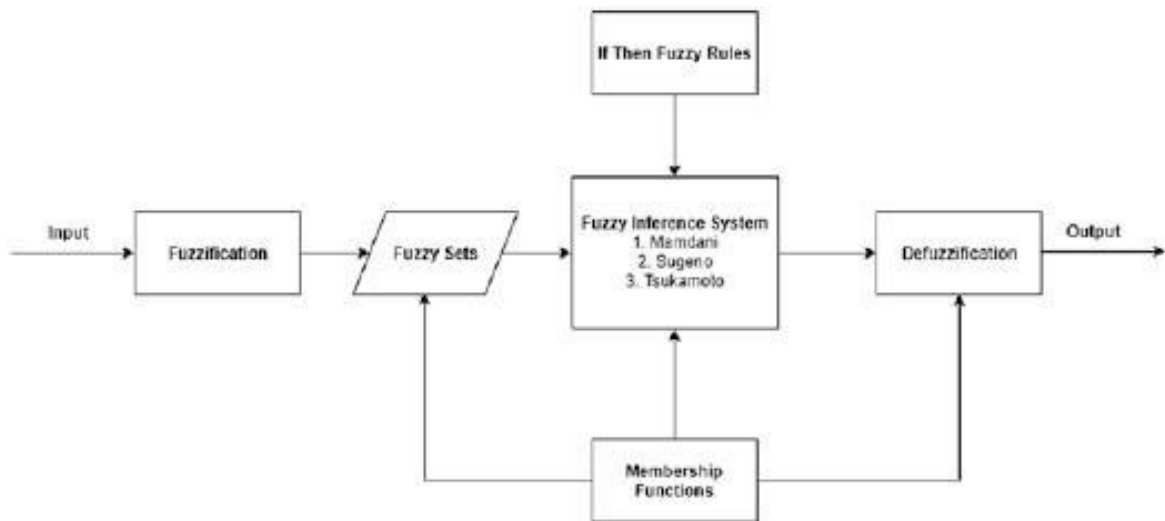
#### 2.2.3. *Sistema de Inferencia Difusa (FIS)*

Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> mencionan que un Sistema de Inferencia Difusa (FIS) busca imitar la forma en la que un humano resuelve cualquier tipo de problema mediante un razonamiento específico. El FIS lo hace utilizando la Lógica Difusa, según la Figura 21.

Sobre los tipos de Sistemas de Inferencia Difusa, Mathworks (2020)<sup>15</sup> resalta principalmente dos: el Modelo de Mamdani y el Modelo de Takagi – Sugeno. La Tabla 1, detalla las principales ventajas de cada modelo.

**Tabla 1***Comparación entre los Tipos de FIS*

| Sistema de Inferencia Difusa | Ventajas                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mamdani                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intuitivo.</li> <li>▪ Adaptado a la intervención humana.</li> <li>▪ Base de reglas más interpretable.</li> <li>▪ Tiene una amplia aceptación.</li> </ul>                                                                              |
| Sugeno                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Computacionalmente eficiente.</li> <li>▪ Funciona bien con técnicas lineales, como el control PID.</li> <li>▪ Trabaja bien con técnicas de optimización y adaptación.</li> <li>▪ Muy adecuado para el análisis matemático.</li> </ul> |

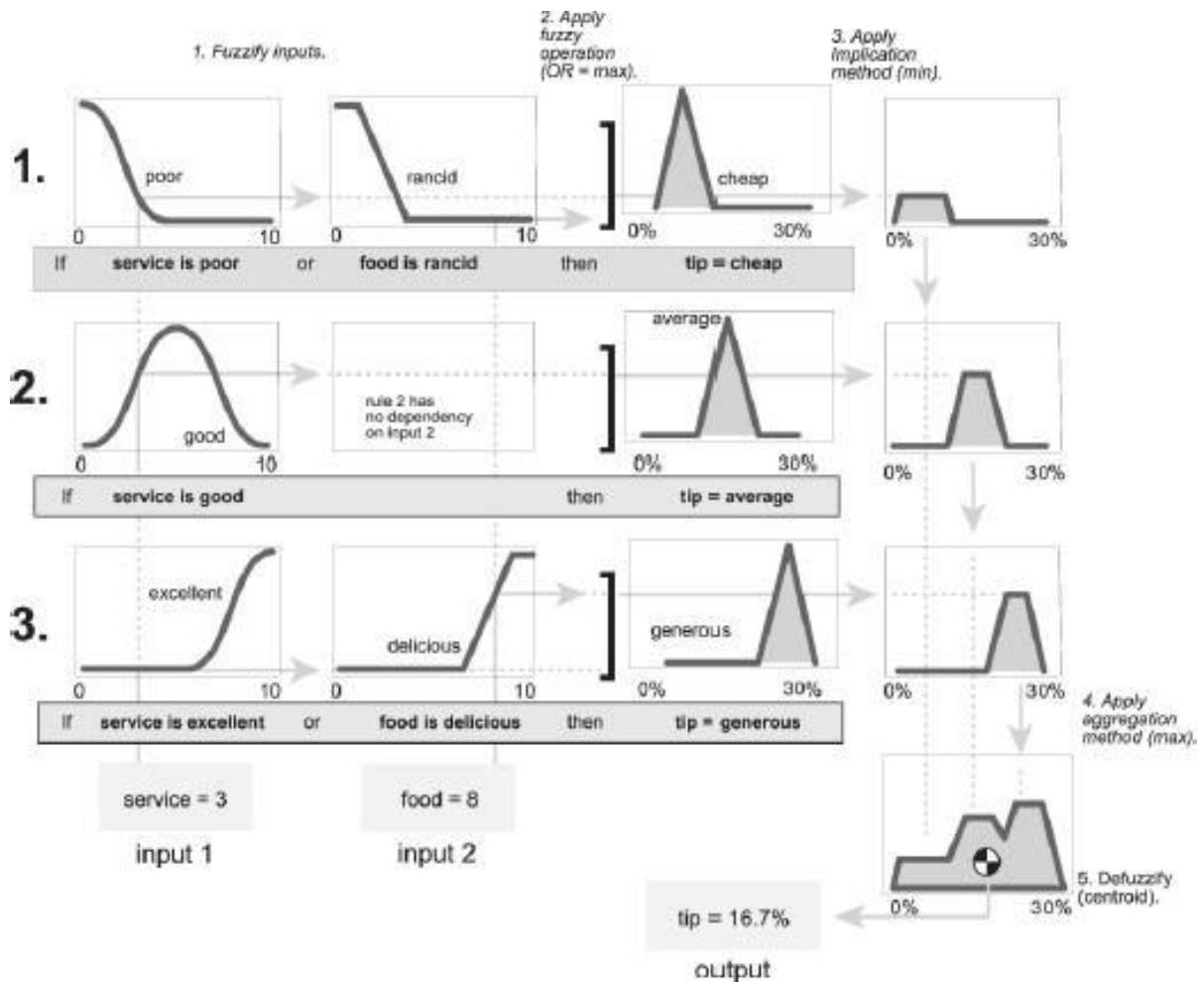
Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>**Figura 21***Sistema de Inferencia Difusa (FIS)*Nota. Extraído de Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup>**2.2.3.1. Tipo Mamdani.**

Según Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> el método Mamdani es el más usado cuando se trata de FIS. Asimismo, Mathworks (2020)<sup>15</sup> menciona que en un sistema tipo Mamdani la salida de cada regla es un conjunto difuso y que, además, este método utiliza reglas intuitivas y

fáciles de entender, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de sistemas expertos, donde las reglas se crean a partir del conocimiento humano.

**Figura 22**

*Método Mamdani*



Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> mencionan que este método consiste en cinco pasos, según se observa en la Figura 22 :

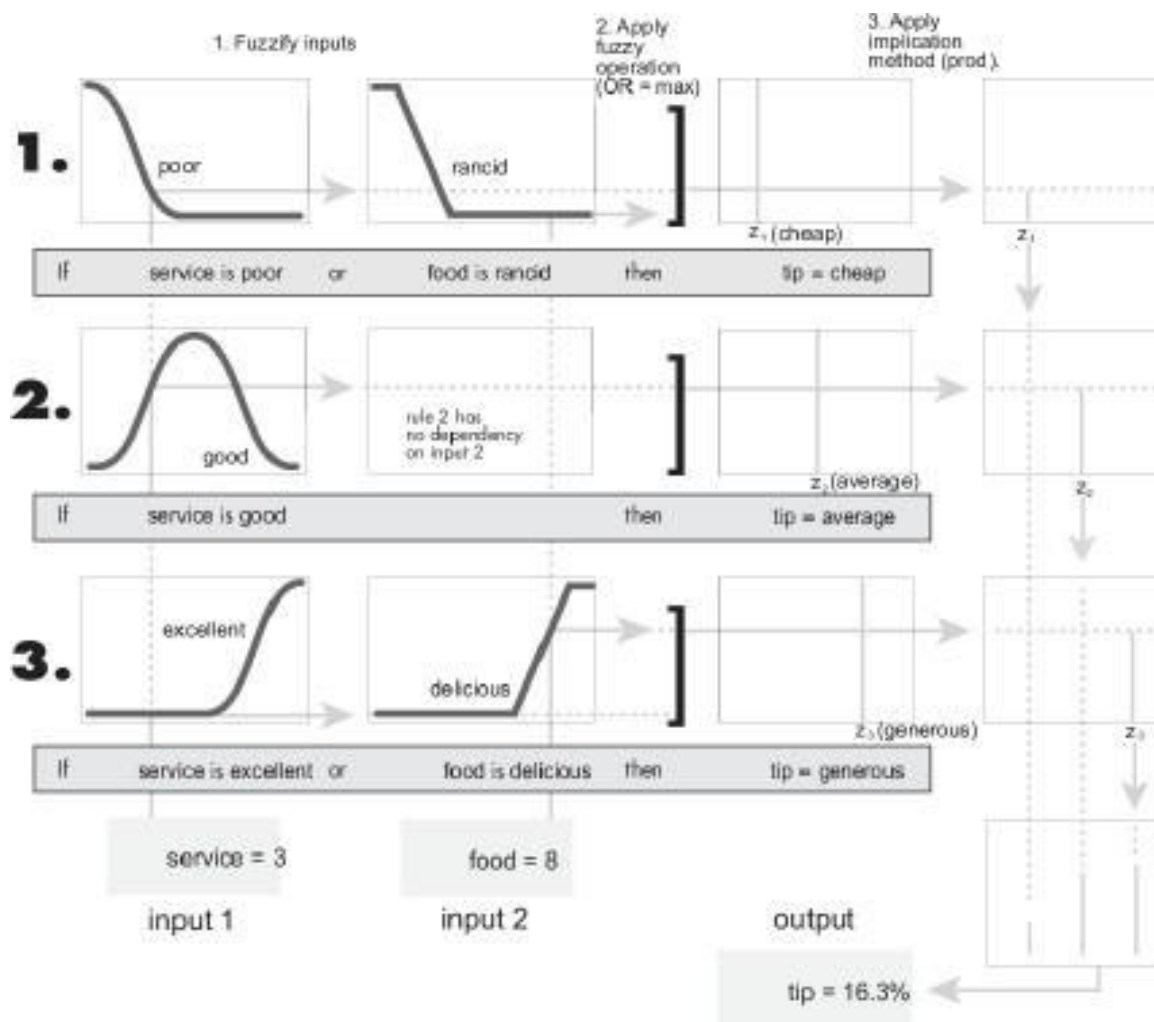
- Paso 1: Fuzzificar la entrada.
- Paso 2: Encontrar y evaluar el antecedente para cada regla.
- Paso 3: Encontrar el consecuente para cada regla.

- Paso 4: Agregar consecuentes.
- Paso 5: Defuzzificar los resultados.

### 2.2.3.2. Tipo Sugeno.

**Figura 23**

*Método Sugeno*



Nota. Extraído de Mathworks (2020)<sup>15</sup>

Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> menciona que el método Takagi – Sugeno – Kang se utiliza principalmente para modelar sistemas no lineales. A diferencia de Mamdani, la función de pertenencia en la salida debe ser únicamente lineal o constante, según se observa en la Figura

23. Según Matworks (2020)<sup>15</sup> este método utiliza un promedio ponderado de unos pocos datos en lugar de utilizar el centroide del área generada, asimismo, las funciones de membresía de salida constantes representan los centroides de las membresías de salida tipo Mamdani.

Según los autores, este tipo de sistema es ideal para supervisar la interpolación de múltiples controladores que apliquen condiciones de operación de un sistema dinámico no lineal.

#### **2.2.4. Molienda de Minerales**

Quiroz (1986)<sup>17</sup> , define la molienda como aquella operación unitaria, mediante la cual se realiza una reducción de tamaños en rangos finos para preparar al mineral en características tales como la liberación, tamaño de partícula y propiedades superficiales. (p.161).

En adición, Wills y Finch (2016)<sup>18</sup>, definen a la molienda como la última etapa en la operación de conminución donde *“las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impacto y abrasión”*. (p.147). Y afirman que esta se realiza en recipientes cilíndricos de acero, llamados molinos, que contienen una carga de cuerpos aplastantes sueltos como medios de molienda, y que pueden moverse libremente dentro del molino, triturando así las partículas de mineral.

Asimismo, los autores definen estructuralmente a un molino como una carcasa metálica cilíndrica horizontal, provista de revestimientos de desgaste renovables y una carga de medio de molienda, según se observa en la Figura 24.

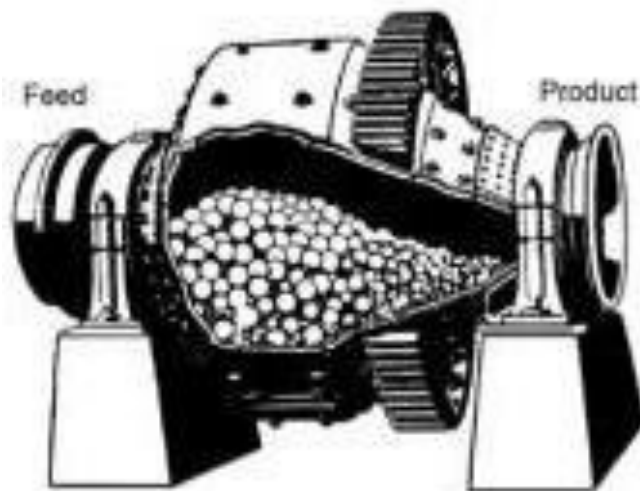
---

<sup>17</sup> Quiroz, I. (1995). *Ingeniería Metalúrgica: Operaciones unitarias en procesamiento de minerales*. Primera edición.

<sup>18</sup> Wills, B. y Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Eighth Edition.

## Figura 24

### *Molino de Bolas*



Nota. Imagen extraída de Wills y Finch (2016).

Con respecto a las variables operativas que influyen durante el proceso de molienda, Quiroz (1986, p.166 - 177)<sup>17</sup> menciona las siguientes:

- Medios de molienda y volumen de llenado.
- Tamaño de medio de molienda (bolas o barras).
- Distribución inicial del tamaño de carga.
- Características de los forros de los molinos.
- Consumo de acero en molienda (forros, bolas y/o barras).
- Velocidad de operación de los molinos.
- Carga circulante.

En línea con lo anterior, Yu (2016, como se citó en Candiotti et al., 2020)<sup>19</sup> presenta un listado de los principales parámetros y características de operación de los molinos de bolas (Tabla 2).

<sup>19</sup> Quiroz, I. (1995). *Ingeniería Metalúrgica: Operaciones unitarias en procesamiento de minerales*. Primera edición.

<sup>19</sup> Yu, P. (2016). *A Generic Dynamic Model Structure for Tumbling Mills*. [Tesis de doctorado, Queensland University].

**Tabla 2****Molino de Bolas**

| <b>Parámetro</b>       | <b>Características de operación</b>                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tamaño de alimentación | A medida que el tamaño de alimentación aumenta, incrementa el tiempo de residencia y disminuye la producción.                                                                                                                                                           |
| Tamaño del producto    | A medida que el tamaño del producto disminuye, favorece el grado de liberación en las etapas subsecuentes.                                                                                                                                                              |
| Carga de alimentación  | A medida que aumenta el tamaño de la alimentación rendimiento y producción disminuyen.                                                                                                                                                                                  |
| Dureza del mineral     | A medida que la dureza del mineral disminuye, la producción aumentará y el producto se hará más fino.                                                                                                                                                                   |
| Medio de molienda      | Bolas de acero, estas son más duras que las partículas de mineral, por lo que se desgastan lentamente.                                                                                                                                                                  |
| Carga de bolas         | Usualmente entre 27 a 40%. Al incrementar la carga de bolas incrementa la potencia requerida, y la producción se incrementa en proporción a la potencia.                                                                                                                |
| Tamaño de bolas        | Con un incremento del tamaño de la bola, la frecuencia de rotura por impacto aumentará.                                                                                                                                                                                 |
| Función de rotura      | En el molino de bolas, la rotura por impacto es relativa a la masa de la bola y proporcional al cubo del diámetro de la bola, mientras que la rotura por desgaste es relativa al área de la superficie de la bola y proporcional a la fracción del diámetro de la bola. |
| Velocidad              | El aumento de la velocidad del molino promueve la rotura por impacto. La máxima tasa de molienda ocurre a menudo a aproximadamente el 80% de la velocidad crítica.                                                                                                      |
| Potencia               | El consumo de energía permanece relativamente constante y se reduce gradualmente con el tiempo a medida que las bolas se desgastan lentamente.                                                                                                                          |

Nota. Adaptado de Yu (2016, como se citó en Candiotti et al., 2020)<sup>19</sup>.

En adición, Wills y Finch (2016)<sup>18</sup> mencionan que determinadas condiciones operacionales deben ser evitadas para lograr el buen funcionamiento de un molino de bolas:

- La densidad de la pulpa de la alimentación debe ser tan alta como sea posible.

- Es fundamental que las bolas estén recubiertas de una capa de mineral; ya que una pulpa demasiado diluida aumenta el contacto metal con metal, proporcionando un mayor consumo de acero y una reducción de eficiencia.
- Los molinos de bolas deben operar entre 65% y 80% de sólidos en peso, dependiendo del mineral; la viscosidad de la pulpa aumenta con la finura de las partículas, por lo tanto, los circuitos de molienda fina pueden necesitar menores densidades de pulpa.
- La eficiencia de la molienda depende del área superficial del medio de molienda. Por lo tanto, las bolas deben ser tan pequeñas como sea posible y la carga debe graduarse de tal manera que las bolas más grandes sean lo suficientemente pesadas para moler las partículas más grandes.

### ***2.2.5. Modelamiento y Simulación del Proceso de Molienda***

Según Bascur y Concha (2024)<sup>20</sup>, desde hace varias décadas, diversos autores han utilizado modelos empíricos, fenomenológicos y mecánicos para explicar el comportamiento del proceso de molienda. Entre los modelos más mencionados citan los realizados por Kick (1885), Rittinger (1867) y la teoría de Bond (1952). (p.21)

En adición, el estudio realizado por Candiotti et al. (2020)<sup>21</sup> menciona al modelo energético postulado por Morrell (2004), e incluyen los principales modelos fenomenológicos utilizados por las herramientas de simulación modernas: Modelo de balance poblacional o modelo cinético (PBM) adaptado por Herbst y Fuerstenau (1980)<sup>22</sup> y

---

<sup>20</sup> Bascur, O. y Concha, F. (2024). *The Engineering Science of Mineral Processing. A Fundamental and Practical Approach*. Taylor & Francis Group.

<sup>21</sup> Candiotti, S., Montaña, L., Barja, F., Charca, S., Quineche, L. y Flores, C. (2020). *Estudio del arte de sistemas de molienda polimetálica*. Universidad de Ingeniería y Tecnología.

<sup>22</sup> Herbst, J. y Fuerstenau, D. (1980). Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models. *International Journal of Mineral Processing*. 7(1). p. 1 – 31.

el Modelo de la mezcla perfecta en molino de bolas (PMM) desarrollado por Withen (1974)<sup>23</sup>. Además, menciona también los modelos basados en el torque de la carga: Modelo de Hogg y Fuerstenau (1972)<sup>24</sup> y el Modelo de Austin (1990)<sup>25</sup>.

#### **2.2.5.1. Postulado de Kick.**

En línea con lo anterior Bascur y Concha (2024)<sup>20</sup>, también mencionan que, en relación con la energía consumida y la reducción del tamaño de partículas, durante mucho tiempo esto fue explicado principalmente por el postulado de Kick (1885), quién afirmó que *“la energía necesaria para producir cambios análogos en el tamaño de cuerpos geoméricamente similares es proporcional al volumen de estos cuerpos”*. (p. 258).

$$E_k = - \int_{x_0}^{x_c} F(x) dx$$

#### **2.2.5.2. Postulado de Rittinger.**

Posteriormente, Bascur y Concha (2024)<sup>20</sup> también afirman que, el postulado de Rittinger (1867) asumió que *“la energía consumida en la reducción de tamaño es proporcional a la nueva área superficial generada”*.

$$E_R = K_R \left( \frac{1}{x_c} - \frac{1}{x_0} \right)$$

#### **2.2.5.3. Modelo de Índices de Bond.**

Con respecto a los índices de trabajo postulados por Bond (1952)<sup>26</sup>, habitualmente se describe utilizando la fórmula:

$$W = 10 * W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

<sup>23</sup> Whiten, W. J. (1974). A matrix theory of comminution machines. Chemical Engineering Science. 29(2). p. 589 – 599

<sup>24</sup> Hogg, R. y Fuerstenau, D. W. (1972). Power relationships for tumbling mills. SME/AIME. 252. p. 418 – 423.

<sup>25</sup> Austin, L. G. (1990). A mill power equation for SAG mills. Mining, Metallurgy & Exploration. 7(1). p. 49 – 57.

<sup>26</sup> Bascur, O. y Concha, F. (2024). *The Engineering Science of Mineral Processing. A Fundamental and Practical Approach*. Taylor & Francis Group.

<sup>26</sup> Bond, F. C. (1952). Third theory of comminution. *Transaction of the AIME*. 193. p. 484 – 494.

Dónde W denota la energía específica consumida durante el proceso de molienda. Mientras que el Work Index ( $W_i$ ) es un parámetro que denota la resistencia del material a ser molido. Asimismo, el P80, es un valor asociado al tamaño que representa al 80% del producto y F80, un valor asociado al tamaño que representa el 80% del material alimentado.

#### **2.2.5.4. Modelo de Morrell.**

En relación con los índices de trabajo postulados por Morrell (2004)<sup>27</sup>, esta ecuación fue propuesta inicialmente de forma diferencial:

$$dE = -C * g(x) * \frac{dx}{x^{f(x)}}$$

Dónde C representaba una constante asociada a las propiedades del mineral, y g(x), una función asociada a las propiedades que varían dependiendo del tamaño del mineral.

Posteriormente, Morrell propuso dos nuevas ecuaciones, considerando la energía requerida para reducir el tamaño de una partícula.

$$W = 4 * M_i * (x_2^{f(x_2)} - x_1^{f(x_1)})$$

$$f(x)_i = -(0.295 + \frac{x_i}{1000000})$$

Dónde W es la energía específica requerida (kWh/ton);  $M_i$  denota el índice de conminución;  $x_2$  es un valor asociado al tamaño que representa al 80% del producto y  $x_1$ , un valor asociado al tamaño que representa el 80% del material alimentado.

La distribución de tamaños producida por un paso de rotura es conocida como la función de rotura o función de aparición, y denota la distribución relativa de cada fracción de tamaño luego de la rotura. Esta es usualmente independiente de la distribución inicial de tamaño.

---

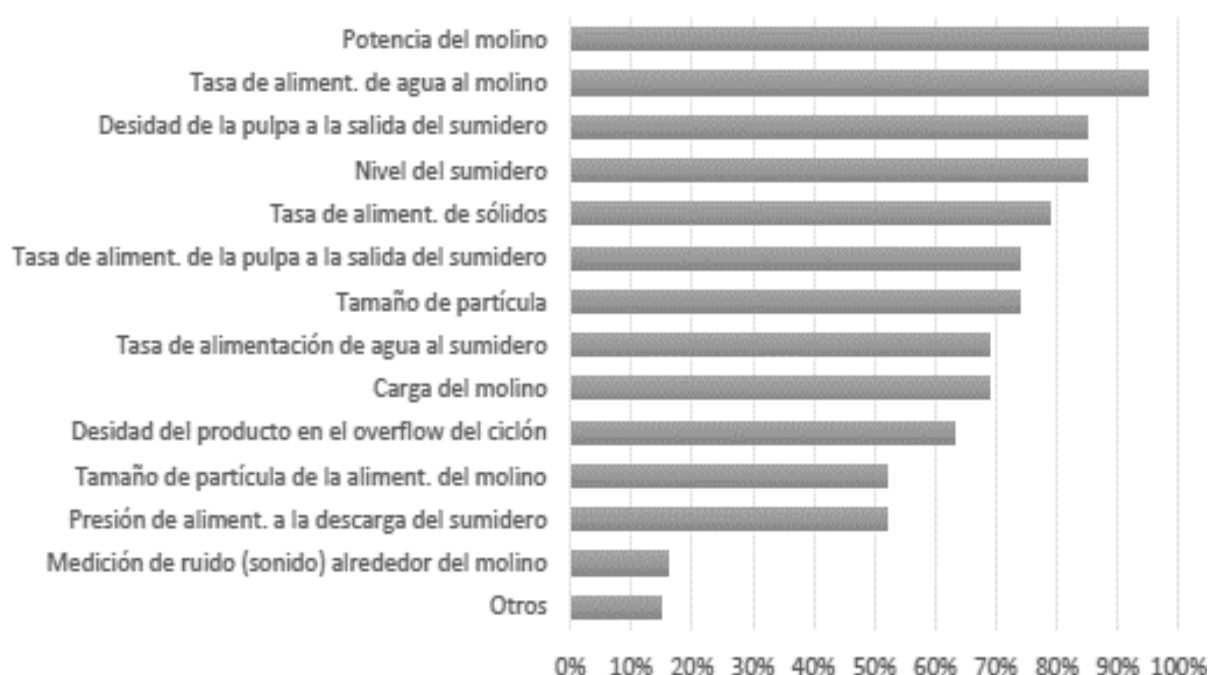
<sup>27</sup> Morrell, S. (2004). An alternative energy–size relationship to that proposed by Bond for the design and optimization of grinding circuits. International journal of mineral processing. 74(14). p. 133 – 141.

Por otro lado, la probabilidad de rotura de una partícula de cierto tamaño no es constante. Esta acción de rotura selectiva toma lugar en las diferentes etapas de la conminución; y la proporción resultante de partículas fracturadas para un intervalo de tamaño es conocida como la función de selección o probabilidad de rotura.

## 2.2.6. Optimización en Circuitos de Molienda

**Figura 25**

*Variables Habitualmente Medidas en Circuitos de Molienda Cerrada*



Nota. Extraída de Candiotti et al., 2020.

En una encuesta realizada por Wei y Craig (2009, como se citó en Candiotti et al., 2020)<sup>28</sup>, los autores determinaron las principales variables que son analizadas para realizar estrategias de mejora en circuitos de molienda cerrada, según se observa en la Figura 25. Y si bien el molino es tratado como un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas, los autores lo subdividen en subprocesos tales como el molino bolas, el sumidero y la batería de

<sup>28</sup> Wei, D. y Craig, I. K. (2009). Grinding mill circuits - a survey of control and economic concerns. International Journal of Mineral Processing. 90(1). p. 56 – 66.

ciclones, cada uno como planta independiente con sus respectivas variables de entrada y de salida.

Los autores también introducen el concepto de variables manipulables dentro del circuito de molienda, como aquellas variables del proceso que modelan al circuito en general, y mencionan:

- Potencia del molino (kW).
- Ingreso de material (t/h).
- Tamaño de partícula de material de ingreso.
- Porcentaje y volumen de bolas (% , m<sup>3</sup>).
- Velocidad de operación (% de la velocidad crítica).
- Ingreso de agua (m<sup>3</sup>/h).
- Ingreso de carga circulante (m<sup>3</sup>/h).
- Nivel de llenado del sumidero (m<sup>3</sup>).
- Densidad de pulpa al ingreso del ciclón (kg/m<sup>3</sup>).
- Densidad de pulpa en la carga circulante (kg/m<sup>3</sup>).

Asimismo, los autores definen algunas variables de salida, relativas al proceso de molienda, que determinan el comportamiento de la planta:

- Tamaño de partícula (μm).
- Rendimiento (kWh/t).

En línea con lo anterior, la Figura 26, según lo expuesto por Candiotti et al. (2020) <sup>21</sup> *“resume las variables consultadas en investigaciones de circuitos cerrados de molienda donde se busca controlar un set-point del tamaño de partícula para maximizar el rendimiento de la planta”*. (p.65)

**Figura 26**

*Diagrama de Proceso y Variables Utilizadas en una Estrategia de Control para Molienda*



Nota. Extraída de Candiotti et al. (2020) <sup>21</sup>.

## CAPÍTULO III

### 3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Las Hipótesis

##### 3.1.1. *Hipótesis General*

- El Sistema de Inferencia Difusa (FIS) permitirá reducir la variabilidad operacional del proceso molienda primaria de la U.M.

##### 3.1.2. *Hipótesis Específicas*

- El FIS permitirá maximizar el tonelaje procesado en la molienda primaria de la U.M.
- El FIS permitirá reducir la cantidad de agua consumida en la molienda primaria de la U.M.
- El FIS permitirá reducir el tamaño de partícula P80 en la molienda primaria de la U.M.

#### 3.2. Las variables

##### 3.2.1. *Variable Independiente (X)*

- X: Sistema de Inferencia Difusa (FIS).

##### 3.2.2. *Variable Dependiente (Y)*

- Y: Optimización de la molienda primaria.

##### 3.2.3. *Otras Variables Medidas*

- Potencia consumida (kWh)
- Work Index
- Amperaje de las bombas de descarga (A)
- Flujo de agua (m<sup>3</sup>/h)
- Tonelaje (t/h)
- F80 (mm)
- P80 (μm)

### 3.3. Operacionalización de Variables

**Tabla 3**

*Matriz de Operacionalización de Variables*

| Variable                                                            | Definición conceptual                                                                                                                                                                                                          | Definición Operacional                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Operacionalización             |                                  | Escala de medición                      |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|
|                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Dimensiones                    | Indicadores                      |                                         |
| <u>Independiente (X)</u><br><br>Sistema de Inferencia Difusa (FIS)  | Mathworks (2023) <sup>15</sup> afirma que los Sistemas de Inferencia Difusa (FIS) son un método que interpreta valores de entrada, y, en base a un conjunto de reglas asigna valores de salida.                                | Según lo planteado por Granados (2018) <sup>5</sup> , se consideran como valores de entrada: el tamaño de partícula F80 y el amperaje del motor de las bombas del circuito. Asimismo, se consideran como valores de salida: el flujo de agua y el flujo de mineral alimentado al molino de bolas.                                             | X1: Entradas                   | F80                              | Escala de razón (2.5 mm < x < 15mm)     |
|                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                | Amperaje del motor de las bombas | Escala de Razón (0A < x < 750A)         |
|                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | X2: Salidas                    | Flujo de mineral alimentado      | Escala de Razón (0 t/h < y < 620 t/h)   |
|                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                | Flujo de agua alimentado         | Escala de Razón (0 m3/h < y < 200 m3/h) |
| <u>Dependiente (Y)</u><br><br>Optimización de la molienda primaria. | Chen et al. (2007) <sup>29</sup> afirman que la optimización de la molienda de bolas consiste en maximizar el flujo de mineral procesado y el flujo de agua consumida manteniendo un tamaño de partícula de producto adecuado. | Operacionalmente, el flujo de mineral procesado describe el tonelaje por hora del molino de bolas. Y, el flujo de agua consumida es representado por la suma de todos los flujos de agua consumida en el circuito de molienda primaria. Además, como tamaño de partícula del producto, se considera el P80 del circuito de molienda primaria. | Y1: Tamaño de partícula P80    | P80                              | Escala de razón (100 µm < y < 800µm)    |
|                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Y2: Tonelaje procesado         | Tonelaje                         | Escala de Razón (0 t/h < y < 620 t/h)   |
|                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Y3: Cantidad de agua consumida | Flujo de agua                    | Escala de Razón (0 m3/h < y < 200 m3/h) |

<sup>5</sup> Granados, F. (2018). Diseño de una estrategia de control multivariable para el incremento del régimen de carga de mineral en el área de Molienda de una planta concentradora usando lógica difusa. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/15784>

<sup>15</sup> Mathworks. (2020). *Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide*

<sup>29</sup> Chen, X., Zhai, J. y Fei, L. (2007). Fuzzy Logic Based On-Line Efficiency Optimization Control of a Ball Mill Grinding Circuit. *Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. 575 – 580. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2007.329>

### 3.4. Matriz de Consistencia

**Tabla 4**

*Matriz de Consistencia*

| Título: Optimización de la Molienda Primaria de una Unidad Minera ubicada al Sur de Perú empleando un Sistema de Inferencia Difusa (FIS)                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PROBLEMAS                                                                                                                                                                                                                                                                               | OBJETIVOS                                                                                                                                                                                                                                                             | HIPÓTESIS                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | VARIABLES                                                                     | METODOLOGÍA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <u>Problema general</u><br><br>El ingreso de mineral fresco con un tamaño F80 grueso genera variabilidad operacional en el proceso de molienda primaria de una U.M.                                                                                                                     | <u>Objetivo general</u><br><br>Reducir la variabilidad operacional del proceso molienda primaria de la U.M.                                                                                                                                                           | <u>Hipótesis general</u><br><br>El Sistema de Inferencia Difusa (FIS) permitirá reducir la variabilidad operacional del proceso molienda primaria de la U.M.                                                                                                                                                           | <u>Variable independiente (X):</u><br><br>Sistema de Inferencia Difusa (FIS). | <u>Tipo de investigación:</u><br>Investigación aplicada.<br><br><u>Nivel de investigación:</u><br>Nivel correlacional.<br><br><u>Método de diseño:</u><br>Diseño cuantitativo, experimental.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <u>Problemas específicos</u><br><br>¿Cómo maximizar el tonelaje procesado en la molienda primaria de una U.M?<br><br>¿Cómo reducir la cantidad de agua consumida en la molienda primaria de la U.M.<br><br>¿Cómo reducir el tamaño de partícula P80 en la molienda primaria de una U.M? | <u>Objetivos específicos</u><br><br>Maximizar el tonelaje procesado en la molienda primaria de una U.M.<br><br>Reducir la cantidad de agua consumida en la molienda primaria de la U.M.<br><br>Reducir el tamaño de partícula P80 en la molienda primaria de una U.M. | <u>Hipótesis específicas</u><br><br>El FIS permitirá maximizar el tonelaje procesado en la molienda primaria de la U.M.<br><br>El FIS permitirá reducir la cantidad de agua consumida en la molienda primaria de la U.M.<br><br>El FIS permitirá reducir el tamaño de partícula P80 en la molienda primaria de la U.M. | <u>Variable dependiente (Y):</u><br><br>Optimización de la molienda primaria. | <u>Población:</u><br>Información operacional del circuito de molienda primaria del periodo 2023.<br>( 379,578 registros)<br><br><u>Muestra:</u><br>Información operacional filtrada del circuito de molienda primaria del periodo 2023.<br>(369,396 registros)<br><br><u>Técnicas de recolección de datos:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Observación directa.</li> <li>- Encuesta.</li> <li>- Fuentes secundarias.</li> </ul> <u>Instrumentos:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hoja de registro de la observación.</li> <li>- Cuestionario.</li> </ul> <u>Técnicas de análisis y procesamiento de datos:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Manejo de base de datos en MS Excel.</li> <li>- Análisis estadístico mediante Python.</li> </ul> |

## CAPÍTULO IV

### 4. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 4.1. Área de Estudio

##### 4.1.1. Ubicación de la Unidad Minera

El ámbito de la presente investigación se efectuará en una unidad minera ubicada al sur del Perú, en el departamento de Ica (Figura 27).

#### Figura 27

*Área de Estudio de la Investigación*



Nota. Extraída de Google Maps.

Puntualmente, en el área de molienda y específicamente en la molienda primaria (Metso 1).

##### 4.1.2. Información sobre el Circuito de Molienda Primaria

La Figura 28 muestra el diagrama de flujo (resumen) del circuito de molienda de la Unidad Minera. El material alimentado consiste en un mineral polimetálico (zinc, plomo, cobre y plata), con una densidad específica promedio de 3.83 y un Work Index operacional aproximado de 19.5.

*Circuito de Molienda Primaria de la Unidad Minera*



2

La pulpa proveniente del Metso 1 ingresa hacia un cajón de descarga que alimenta a dos bombas que envían la pulpa hacia las celdas de flotación Flash. Las colas de las celdas Flash, se dirigen hacia las zarandas de alta frecuencia (ZAF). Y, el pasante va hacia la flotación Bulk; mientras que el retenido en forma de pulpa alimenta al Metso 2.

La pulpa generada por el Metso 2 va hacia un cajón de descarga, y por medio de unas bombas se envía la pulpa hacia el proceso de flotación Flash.

Finalmente, tanto las espumas de la flotación Flash provenientes del Metso , como las espumas provenientes del Metso 2, alimentan un cajón de descarga, que posteriormente alimenta otro proceso de Flotación Flash, en este punto, las espumas van hacia un proceso de separación Pb/Cu y las colas hacia una segunda limpieza bulk.

## **4.2. Diseño de Investigación**

### ***4.2.1. Tipo de Investigación***

La investigación tiene como propósito la resolución de un problema concreto, ya que busca optimizar la molienda primaria de una Unidad Minera empleado un Sistema de Inferencia Difusa (FIS). Por lo que se considera una investigación aplicada o técnica.

### ***4.2.2. Nivel de Investigación***

En relación con el grado de profundidad con el que se aborda el estudio, la investigación busca encontrar explicaciones a través del estudio de relaciones entre las variables: Sistema de Inferencia Difusa (FIS) y optimización de molienda primaria, por lo que se considera de nivel correlacional.

### ***4.2.3. Método de Diseño de Investigación***

En relación con el enfoque metodológico, dado que la investigación recurrirá a la recopilación de datos numéricos para validar las hipótesis formuladas, se considera un diseño

de investigación cuantitativo. Además, dado que la investigación trabajará con datos provenientes de sensores industriales (información real) se considera de tipo experimental.

### **4.3. Población y Muestra**

#### **4.3.1. Población**

En relación con la población empleada para este trabajo, se extrajo la informacional operacional disponible del circuito de molienda primaria mostrado en el Figura 28. Mediante el Pi System de la unidad minera se extrajo información con una frecuencia de un minuto durante el periodo de enero 2023 a diciembre 2023. La información total asciende a 379,578 registros (filas), para un total de 10 variables analizadas, generando un total de 3,795.780 datos.

#### **4.3.2. Muestra**

En relación con la muestra empleada para este trabajo, al tratarse de información extraída mediante sensores en campo y considerando aquellos períodos de inactividad en la planta, se consideraron únicamente aquellos campos que contenían información numérica y relevante, obteniendo un total de 369,396 registros (filas), y un total de 3,693.960 datos.

### **4.4. Procedimiento, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información**

#### **4.4.1. Procedimiento Metodológico**

La presente investigación desarrollará un Sistema de Inferencia Difusa (FIS) tipo Mamdani, según lo propuesto por Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> este método consiste en la aplicación de cinco pasos:

- a) Paso 1: Fuzzificar la entrada.
- b) Paso 2: Encontrar y evaluar el antecedente para cada regla.
- c) Paso 3: Encontrar el consecuente para cada regla.
- d) Paso 4: Agregar consecuentes.

- e) Paso 5: Defuzzificar los resultados.

Lo propuesto por Mamdani asume que los valores de entrada son previamente conocidos, sin embargo, los autores también comentan que, los valores de entrada y de salida en muchos casos son derivados de una investigación estadística, modelos matemáticos, encuestas, etc. Por lo expuesto, para esta investigación se consideran los siguientes pasos, adaptados de lo propuesto inicialmente por Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup>:

- a) Paso 1: Definición de las variables de entrada y salida.
- b) Paso 2: Definición de los antecedentes para cada regla.
- c) Paso 3: Definición de los consecuentes para cada regla.
- d) Paso 4: Conversión de la entrada a un conjunto difuso (Fuzzificación).
- e) Paso 5: Aplicación de reglas difusas.
- f) Paso 6: Conversión de la salida difusa a una respuesta nítida (Defuzzificación).

#### **4.4.2. Técnicas e instrumentos**

Sobre las técnicas de estudio empleadas para esta investigación se consideró principalmente:

- a) *Análisis documental de fuentes secundarias*, ya que se recurrió a información operacional obtenida a partir de sensores por medio de la plataforma Pi System.
- b) *Observación directa*, ya que fue necesario observar la rutina diaria de los operadores en los cuartos de control y sus acciones respecto a la molienda primaria.
- c) *Encuestas*, ya que se realizaron preguntas a los operadores y jefes de guardia al respecto de las decisiones operacionales que toman en función de determinados escenarios, y cuáles son los rangos de operación habituales de algunas variables.

Al respecto de los instrumentos empleados, se detallan:

- a) *Hojas de registro de la observación*, que sirvieron para estructurar la información obtenida cuando se observó la rutina de los operadores. (Tabla 72, 73, 74, 75, 76 y 77).
- b) *Cuestionarios*, que sirvieron de apoyo al momento de utilizar la técnica de las encuestas, permitieron extraer información cuantitativa de los operadores. (Tabla 78, 79 y 80).

#### **4.5. Equipos y materiales**

Si bien esta investigación toma datos almacenados en un servidor para su análisis y posterior procesamiento, se mencionan algunos de los equipos utilizados en campo para capturar la información operacional:

- a) Analizador de granulometría en línea (cámara), para medir el tamaño de partícula F80.
- b) Balanza en faja transportadora, para medir el tonelaje de alimentación al molino.
- c) Flujómetros, para medir el caudal de agua alimentado al molino.
- d) Densímetros, para medir la densidad de la pulpa en la descarga del molino.
- e) Amperímetros, para medir el amperaje del motor de las bombas del circuito.
- f) Dinamómetros, para medir la potencia consumida por el motor del molino de bolas.
- g) Barómetros, para medir la presión en los descansos del molino de bolas.
- h) System 800xA-s, arquitectura de sistema de control distribuido que permite el desarrollo de lógicas de control avanzado.

## CAPÍTULO V

### 5. PRUEBAS EXPERIMENTALES MEDIANTE LÓGICA DIFUSA

#### 5.1. Limpieza y Procesamiento de Datos

Como se mencionó en el capítulo anterior, la Población (base de datos adquirida de la unidad minera) consiste en 525,600 registros (filas) y considera información de 14 variables (columnas). Esta información corresponde a mediciones experimentales/reales captadas por sensores durante cada minuto, desde enero 2023 hasta diciembre de 2023.

Como se observa en la Tabla 5, las variables analizadas corresponden a la tensión de las bombas de descarga del Metso 1 (C1\_a y C1\_b), la tensión de las bombas de descarga del Metso 2 (C2\_a y C2\_b), la tensión de las bombas de alimentación a las ZAF (C3\_a, C3\_b y C3\_c), granulometría en el alimento (F80), tonelaje y caudal de agua en el ingreso del Metso 1, potencia consumida por el motor del Metso 1, presiones en los lados carga y descarga, y la potencia específica calculada a partir del tonelaje.

**Tabla 5**

*Fuente de Datos Original (Población)*

| Fecha      | C1_a  | C1_b  | C2_a  | C2_b     | C3_a     | C3_b        | C3_c |
|------------|-------|-------|-------|----------|----------|-------------|------|
| 1/01 00:00 | 344.9 | 0.0   | 648.7 | 0.1      | 459.2    | 314.1       | 0.0  |
| 1/01 00:01 | 365.3 | 0.0   | 638.3 | 0.1      | 442.2    | 317.4       | 0.0  |
| 1/01 00:02 | 329.1 | 0.0   | 654.3 | 0.1      | 476.2    | 319.2       | 0.0  |
| 1/01 00:03 | 336.2 | 0.0   | 650.4 | 0.1      | 459.8    | 320.4       | 0.0  |
| Fecha      | F80   | Ton.  | Agua  | Potencia | P. Carga | P. Descarga | W    |
| 1/01 00:00 | 7.8   | 498.0 | 166.6 | 2857.5   | 973.0    | 1022.9      | 5.7  |
| 1/01 00:01 | 7.1   | 500.8 | 167.2 | 2898.2   | 973.2    | 1016.8      | 5.8  |
| 1/01 00:02 | 7.3   | 502.9 | 167.9 | 2859.7   | 971.4    | 1029.7      | 5.7  |
| 1/01 00:03 | 6.8   | 497.8 | 168.6 | 2881.9   | 971.8    | 1010.5      | 5.8  |

La fuente original de datos (población) incluye información que no ha sido filtrada, ya que esta información proviene de sensores, estos transmiten información en todo momento, inclusive en aquellos escenarios en dónde la planta estuvo detenida, o hubo falta de calibración. La Tabla 6 muestra los valores mínimos, máximos y promedio de cada variable analizada. Se observa que, para muchas variables, el valor mínimo es 0, por lo que será necesario filtrar todos los registros en los que al menos una de las variables tenga un valor 0. Asimismo, muestra que existen valores que no corresponden a los límites operacionales habituales, como un caudal de agua de 359 m<sup>3</sup>/h o una potencia consumida de 3360 kWh, por ello, esta investigación incluye una etapa de filtrado de información en función a los límites brindados por los operadores.

**Tabla 6**

*Análisis Estadístico de la Fuente Original de Datos (Población)*

| <b>Variable</b> | <b>Promedio</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| C1_a            | 211.50          | 0.00          | 596.81        |
| C1_b            | 138.37          | 0.00          | 578.50        |
| C2_a            | 291.00          | 0.00          | 1030.65       |
| C2_b            | 279.82          | 0.00          | 834.37        |
| C3_a            | 261.78          | 0.00          | 648.10        |
| C3_b            | 256.42          | 0.00          | 410.83        |
| C3_c            | 191.66          | 0.00          | 658.41        |
| F80             | 7.40            | 3.00          | 15.00         |
| Ton.            | 516.85          | 300.19        | 698.97        |
| Agua            | 175.59          | 0.05          | 359.46        |
| Potencia        | 2972.60         | 2442.22       | 3360.34       |
| P. Carga        | 944.02          | 639.05        | 2017.84       |
| P. Descarga     | 897.17          | 615.89        | 1862.24       |
| W               | 5.78            | 4.18          | 10.31         |

Según la información provista por el personal encuestado (Tablas 81, 82, 83 y 84), se detallan los límites operacionales con los que se realizó el proceso de filtrado:

- F80 de 3.5 mm a 13.5 mm y Tonelaje de 400 t/h a 580 t/h.
- Caudal de agua de 100 m<sup>3</sup>/h a 210 m<sup>3</sup>/h.
- Potencia consumida mayor a 2000 kWh.
- Corriente bomba de descarga Metso 1 de 260 A a 450 A.
- Corriente bomba de descarga Metso 2 de 330 A a 750 A.
- Corriente bomba de alimentación ZAF de 210 A a 570 A.

Asimismo, fue necesario considerar un único valor de tensión para las corrientes en las bombas de descarga del Metso 1 y 2, ya que, al solo estar una en funcionamiento, puede asumirse el valor mayor como el adecuado. Para el caso de las bombas de alimentación a las ZAF, los operadores sugirieron considerar la tensión promedio de las dos bombas. De esta forma se generó la muestra para esta investigación, con un total de 367,775 registros.

**Tabla 7**

*Análisis Estadístico de Datos Filtrados (Muestra)*

| Variable    | Promedio | Mínimo  | Máximo  |
|-------------|----------|---------|---------|
| Corr_M1     | 349.92   | 260.00  | 449.99  |
| Corr_M2     | 571.52   | 330.00  | 749.99  |
| Corr_ZAF    | 354.35   | 210.65  | 563.15  |
| F80         | 7.39     | 3.50    | 13.50   |
| Ton.        | 514.00   | 400.00  | 580.00  |
| Agua        | 173.88   | 118.34  | 210.00  |
| Potencia    | 2975.92  | 2442.23 | 3360.34 |
| P. Carga    | 945.09   | 714.16  | 2017.84 |
| P. Descarga | 900.46   | 629.42  | 1847.12 |
| W           | 5.81     | 4.68    | 8.10    |

Como se observa en la Tabla 7, el número de variables disminuyó a 10, por causa de las corrientes de las bombas. Además, se depuraron los valores iguales a 0, así como aquellos valores que estaban fuera de los límites operacionales.

La investigación desarrollada, considera como uno de los objetivos, la estabilización del tamaño de partícula P80 en el producto de molienda. Como se observa en la Tabla 7, debido a la instrumentación disponible en campo no es posible medir el P80 en tiempo real. Sin embargo, se consideró el cálculo de este valor a partir de la fórmula de los Índices de Trabajo de Bond, según la fórmula:

$$W = 10 * W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

De la Tabla 7, se observa que el F80 es un valor medido en tiempo real, así como la potencia consumida por el molino de bolas (W). Con respecto al  $W_i$ , se asumió un valor promedio de Work Index de 19.36. En la Tabla 8, se adjunta información operacional del área de Laboratorio Metalúrgico que fue utilizada para el cálculo del  $W_i$ .

A continuación, se observa el procedimiento de despeje para el cálculo del  $P_{80}$  a partir de los otros valores conocidos.

$$\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} = \frac{W}{10 \times W_i} + \frac{1}{\sqrt{F_{80}}}$$

$$P_{80} = \left( \frac{\frac{1}{\frac{W}{10 \times W_i} + \frac{1}{\sqrt{F_{80}}}}}{1} \right)^2$$

Es importante mencionar que, en la base de datos adquirida, el tamaño F80 se encuentra en milímetros, es necesario añadir un factor de 1000 para que el  $P_{80}$  calculado resulte en micras.

$$P_{80}^* = \left( \frac{\frac{1}{\frac{W}{10 \times W_i} + \frac{1}{\sqrt{F_{80}}}}}{1} \right)^2$$

+

$$10 \times Wi \quad \sqrt{1000 \times F80}$$

**Tabla 8***Información para el Cálculo del  $W_i$* 

| <b>F80</b> | <b>P80</b> | <b>Tonelaje</b> | <b>Potencia</b> | <b>W</b> | <b><math>W_i</math></b> |
|------------|------------|-----------------|-----------------|----------|-------------------------|
| 5888.70    | 550.98     | 533.75          | 3043.23         | 5.70     | 19.28                   |
| 3667.54    | 524.64     | 539.76          | 2952.68         | 5.47     | 20.15                   |
| 6075.51    | 574.83     | 549.50          | 2979.48         | 5.42     | 18.77                   |
| 5333.79    | 564.69     | 539.02          | 2906.03         | 5.39     | 18.99                   |
| 8149.32    | 565.62     | 551.30          | 2951.24         | 5.35     | 17.29                   |
| 8021.40    | 628.28     | 559.15          | 2947.65         | 5.27     | 18.35                   |
| 7434.89    | 615.86     | 559.89          | 2859.62         | 5.11     | 17.80                   |
| 6774.19    | 619.30     | 541.56          | 2935.27         | 5.42     | 19.33                   |
| 7878.99    | 610.78     | 540.17          | 2994.07         | 5.54     | 18.98                   |
| 6029.68    | 583.26     | 539.24          | 2965.75         | 5.50     | 19.28                   |
| 7001.71    | 593.90     | 538.69          | 2974.35         | 5.52     | 18.99                   |
| 6907.71    | 613.55     | 579.96          | 2902.30         | 5.00     | 17.66                   |
| 5577.93    | 645.85     | 549.76          | 2943.70         | 5.35     | 20.63                   |
| 6530.51    | 622.08     | 539.76          | 2901.25         | 5.38     | 19.39                   |
| 6583.95    | 676.59     | 550.48          | 2863.53         | 5.20     | 19.91                   |
| 5137.59    | 652.74     | 560.27          | 2989.69         | 5.34     | 21.18                   |
| 6014.47    | 643.33     | 549.96          | 2888.62         | 5.25     | 19.80                   |
| 3717.43    | 644.23     | 577.50          | 2861.86         | 4.96     | 21.55                   |
| 8280.17    | 695.45     | 580.07          | 2900.76         | 5.00     | 18.57                   |
| 5945.39    | 641.75     | 550.16          | 2975.53         | 5.41     | 20.41                   |
| 4412.02    | 662.24     | 579.33          | 3016.90         | 5.21     | 21.88                   |
| 4767.05    | 597.47     | 581.19          | 2935.77         | 5.05     | 19.11                   |
| 4478.21    | 632.95     | 568.98          | 2969.02         | 5.22     | 21.04                   |
| 4557.95    | 638.95     | 569.72          | 2948.72         | 5.18     | 20.91                   |
| 6453.61    | 644.79     | 567.97          | 2871.05         | 5.05     | 18.77                   |
| 3881.59    | 601.64     | 564.95          | 2903.63         | 5.14     | 20.79                   |
| 8333.74    | 689.83     | 569.99          | 2995.94         | 5.26     | 19.38                   |
| 5537.95    | 627.56     | 570.39          | 2862.18         | 5.02     | 18.95                   |
| 4808.17    | 640.96     | 577.88          | 2852.26         | 4.94     | 19.68                   |
| 4338.38    | 614.69     | 579.55          | 2830.40         | 4.88     | 19.42                   |
| 7388.53    | 650.99     | 590.72          | 2845.70         | 4.82     | 17.48                   |
| 7584.24    | 635.33     | 577.89          | 2783.20         | 4.82     | 17.08                   |
| 6249.28    | 645.13     | 573.22          | 2875.92         | 5.02     | 18.78                   |
| 3891.96    | 639.37     | 594.91          | 2818.42         | 4.74     | 20.14                   |
| 4678.15    | 634.19     | 596.50          | 2848.79         | 4.78     | 19.04                   |
| 5426.42    | 636.19     | 591.70          | 2961.15         | 5.00     | 19.20                   |
| 3221.65    | 625.32     | 592.33          | 2822.59         | 4.77     | 21.30                   |
| 4372.25    | 583.02     | 596.55          | 2842.96         | 4.77     | 18.13                   |
| 4258.64    | 603.90     | 593.02          | 2839.63         | 4.79     | 18.88                   |
| 3123.90    | 636.65     | 593.85          | 2813.49         | 4.74     | 21.79                   |
| 7814.33    | 643.74     | 587.48          | 2876.82         | 4.90     | 17.43                   |
| 6831.51    | 549.23     | 551.08          | 2902.85         | 5.27     | 17.23                   |
| 5008.09    | 612.81     | 586.38          | 2909.12         | 4.96     | 18.89                   |
| 4257.28    | 610.72     | 600.79          | 2853.87         | 4.75     | 18.90                   |
| 3703.98    | 614.44     | 590.30          | 2825.93         | 4.79     | 20.02                   |
| 5788.57    | 635.18     | 597.23          | 2871.05         | 4.81     | 18.12                   |
| 3080.44    | 606.12     | 594.16          | 2834.40         | 4.77     | 21.11                   |

Nota. Análisis realizado por el área de laboratorio de la unidad minera.

Según se observa en la Tabla 9, el valor del P80 calculado mediante los Índices de Trabajo de Bond fue incluido en la base de datos a analizar (muestra).

**Tabla 9**

*Inclusión del Valor P80 en la Muestra*

| Variable    | Promedio | Mínimo  | Máximo  |
|-------------|----------|---------|---------|
| Corr_M1     | 349.92   | 260.00  | 449.99  |
| Corr_M2     | 571.52   | 330.00  | 749.99  |
| Corr_ZAF    | 354.35   | 210.65  | 563.15  |
| F80         | 7.39     | 3.50    | 13.50   |
| Ton.        | 514.00   | 400.00  | 580.00  |
| Agua        | 173.88   | 118.34  | 210.00  |
| Potencia    | 2975.92  | 2442.23 | 3360.34 |
| P. Carga    | 945.09   | 714.16  | 2017.84 |
| P. Descarga | 900.46   | 629.42  | 1847.12 |
| W           | 5.81     | 4.68    | 8.10    |
| P80         | 576.97   | 320     | 846.11  |

## 5.2. Análisis Estadístico

### 5.2.1. Análisis de Correlación de Variables Estudiadas

Es posible utilizar Python para realizar un análisis estadístico descriptivo de variables. En este sentido, Stojiljković (2020)<sup>30</sup> menciona que una forma de realizar dicho análisis es a través de una matriz de correlación. Este tipo de matriz utiliza el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) como una medida de la relación lineal entre dos variables, esta relación es la covarianza de ambas variables y el producto sus desviaciones estándar.

<sup>30</sup> Stojiljković, M. (2020). *NumPy, SciPy, and pandas: Correlation With Python*. <https://realpython.com/numpy-scipy-pandas-correlation-python/#:~:text=Correlation%20coefficients%20quantify%20the%20association,comprehensive%2C%20and%20well%2Ddocumented.>

En adición, Hernández et. al (2018)<sup>31</sup> detallan que dependiendo del valor del coeficiente de correlación esta puede ser nula, débil, moderada o fuerte, esto se observa en la Tabla 10. Es importante mencionar que esta correlación puede ser linealmente positiva o negativa, cuando se encuentra en el rango de -1 a 0.

**Tabla 10**

*Interpretación del Coeficiente de Correlación de Pearson*

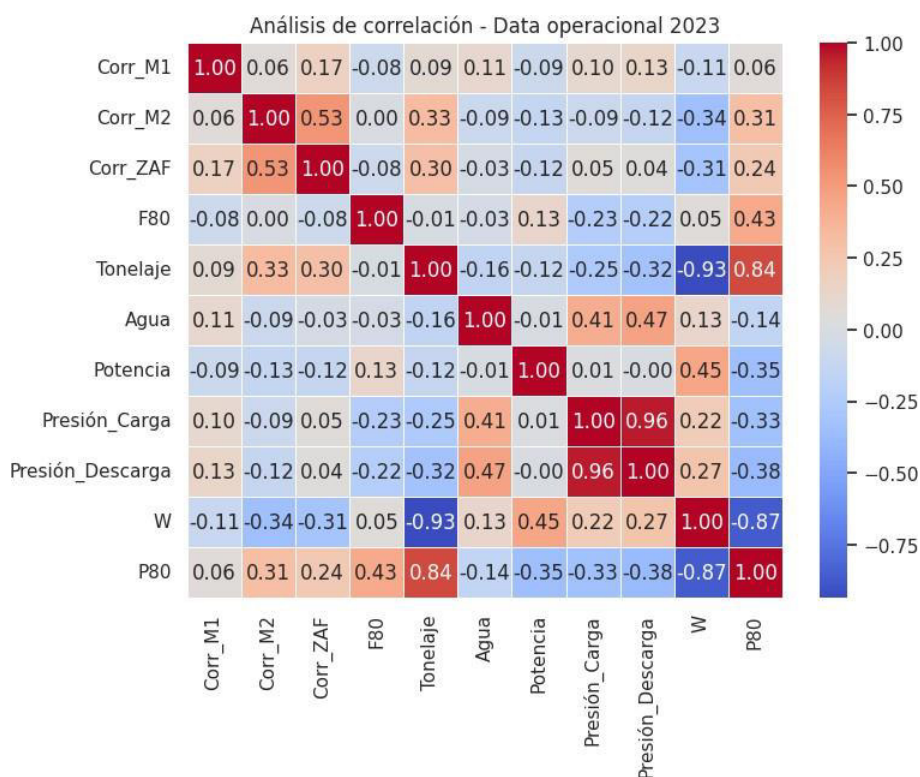
| Límite inferior | Límite superior | Interpretación       |
|-----------------|-----------------|----------------------|
| 0               | 0.1             | Correlación nula     |
| 0.1             | 0.3             | Correlación débil    |
| 0.3             | 0.5             | Correlación moderada |
| 0.5             | 1               | Correlación fuerte   |

Nota. Adaptado de Hernández et al. (2018)

Como parte del análisis estadístico de esta investigación, se realizó una matriz de correlación a las variables disponibles, según se muestra en la Figura 29.

**Figura 29**

*Matriz de Correlación de las Variables Analizadas (Muestra)*



<sup>31</sup> Hernández, J., Espinosa, F., Rodríguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S. y Bermúdez, V. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*. 37(5). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=55963207025>

Con relación a la tensión de las bombas de descarga del Metso 1 (Corr\_M1) , esta evidencia una correlación positiva débil con la tensión de las bombas de alimentación hacia las ZAF, el tonelaje de alimentación, el caudal de agua, y las presiones de los descansos en los lados carga y descarga.

Por otro lado, la tensión de las bombas de descarga del Metso 2 (Corr\_M2), evidencia una correlación positiva moderada con el tonelaje de alimentación y el tamaño de partícula P80 del Metso 1. Y, muestra una correlación positiva fuerte con la tensión de las bombas de alimentación hacia las ZAF.

En lo que respecta a la tensión de las bombas de alimentación hacia las ZAF (Corr\_ZAF), esta también evidencia una correlación positiva moderada con el tonelaje de alimentación y el tamaño de partícula P80 del Metso 1.

Asimismo, el tamaño F80 del mineral que ingresa al Metso 1, evidencia una correlación positiva débil con la potencia consumida por el molino. Y, una correlación moderada con el tamaño P80 en la salida del molino.

También, el caudal de agua alimentado al Metso 1, evidencia una correlación positiva moderada con la presión en los descansos del lado carga y descarga del molino.

Lo mencionado en los párrafos anteriores evidencia las decisiones actuales de los operadores y jefes de guardia tienen un sustento estadístico, principalmente al utilizar las corrientes de las bombas del Metso 2 y de las ZAF, y modificar el comportamiento del tonelaje de alimentación en función de las tendencias de estas.

Sin embargo, la matriz de correlación también evidencia que a la fecha no existe una correlación fuerte respecto al tonelaje alimentado y al caudal de agua, evidenciando la falta de un control automático. Asimismo, tampoco existe una correlación respecto al tonelaje de alimentación y al tamaño de partícula.

**Figura 30**

*Tonelaje vs Tamaño F80 del Mineral Alimentado*

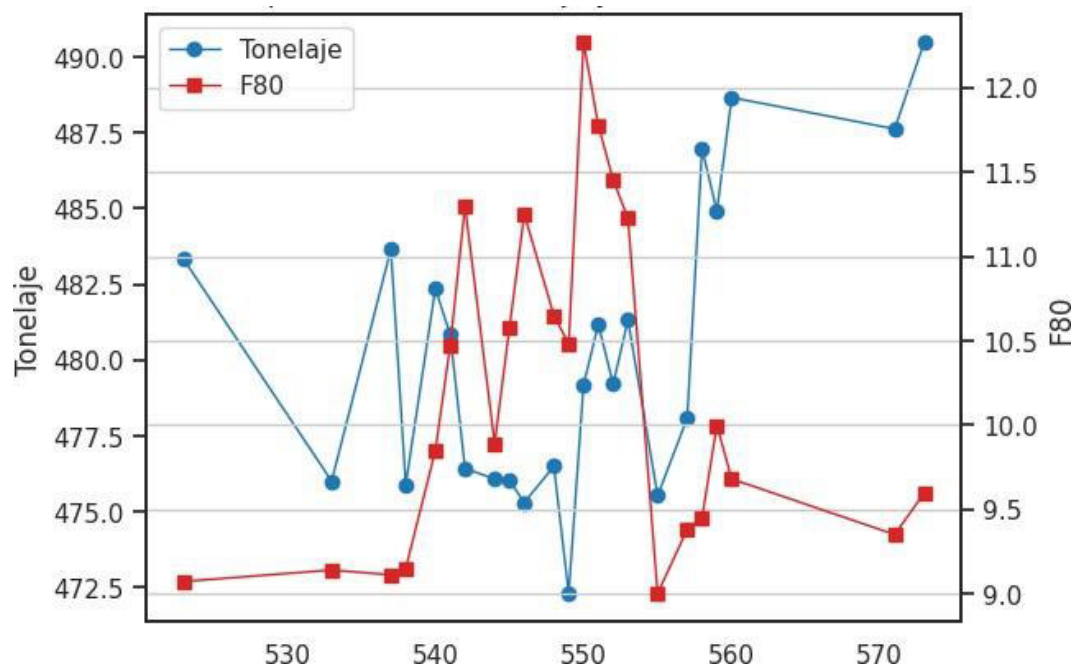
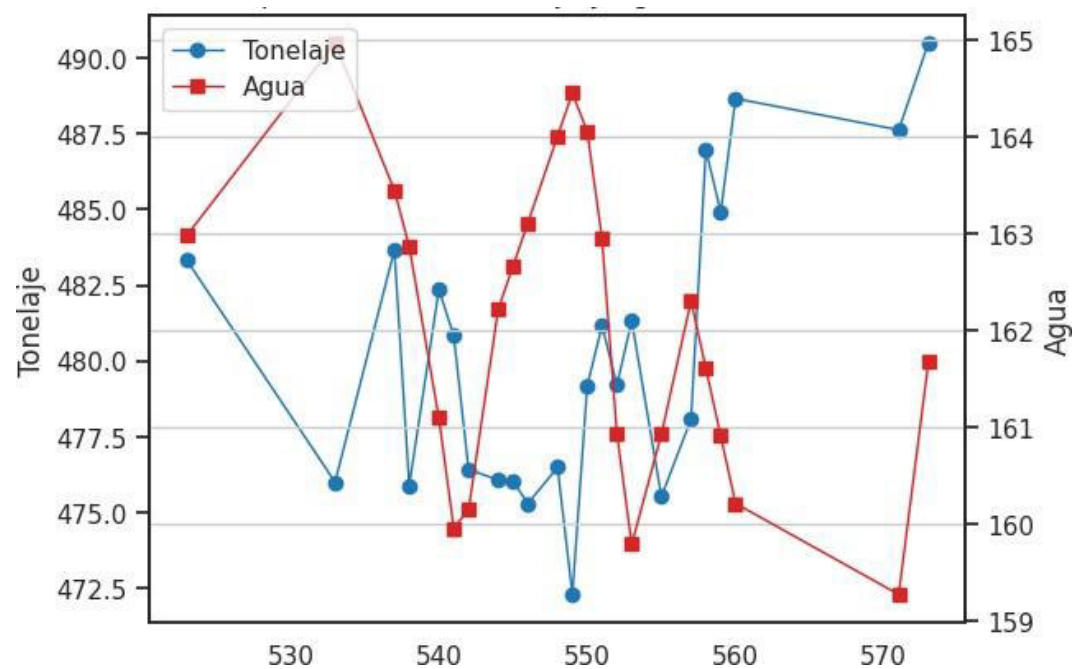


**Figura 31**

*Tonelaje vs Caudal de Agua Alimentada*



La Figura 30 evidencia como durante un día, pese a que la granulometría de alimentación se encontraba un rango “grosso”, el tonelaje incrementaba, ocasionando un incremento en el tamaño P80 a la salida del Metso 1.

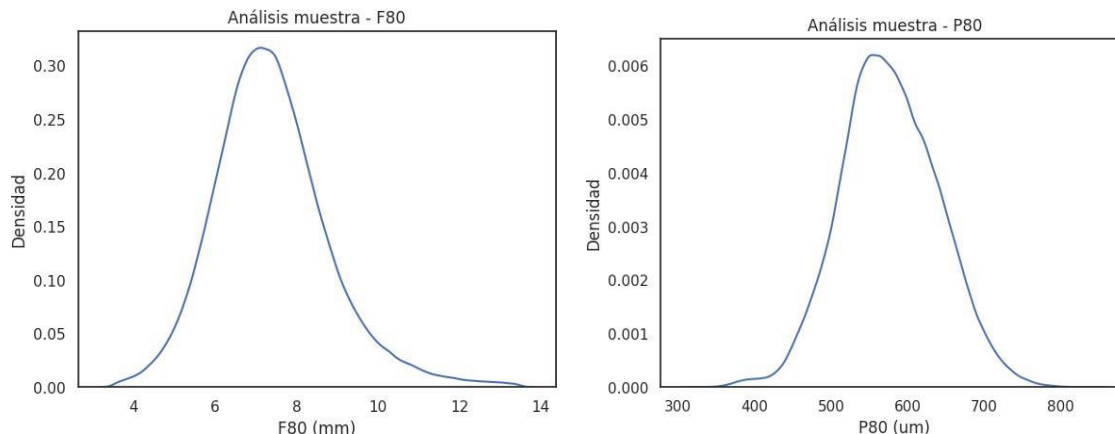
Por otro lado, la Figura 31 evidencia como inclusive en momento en donde el tonelaje incrementaba a 490 t/h, el caudal de agua alimentada disminuía, ocasionando que incremente la densidad de la pulpa del Metso 1.

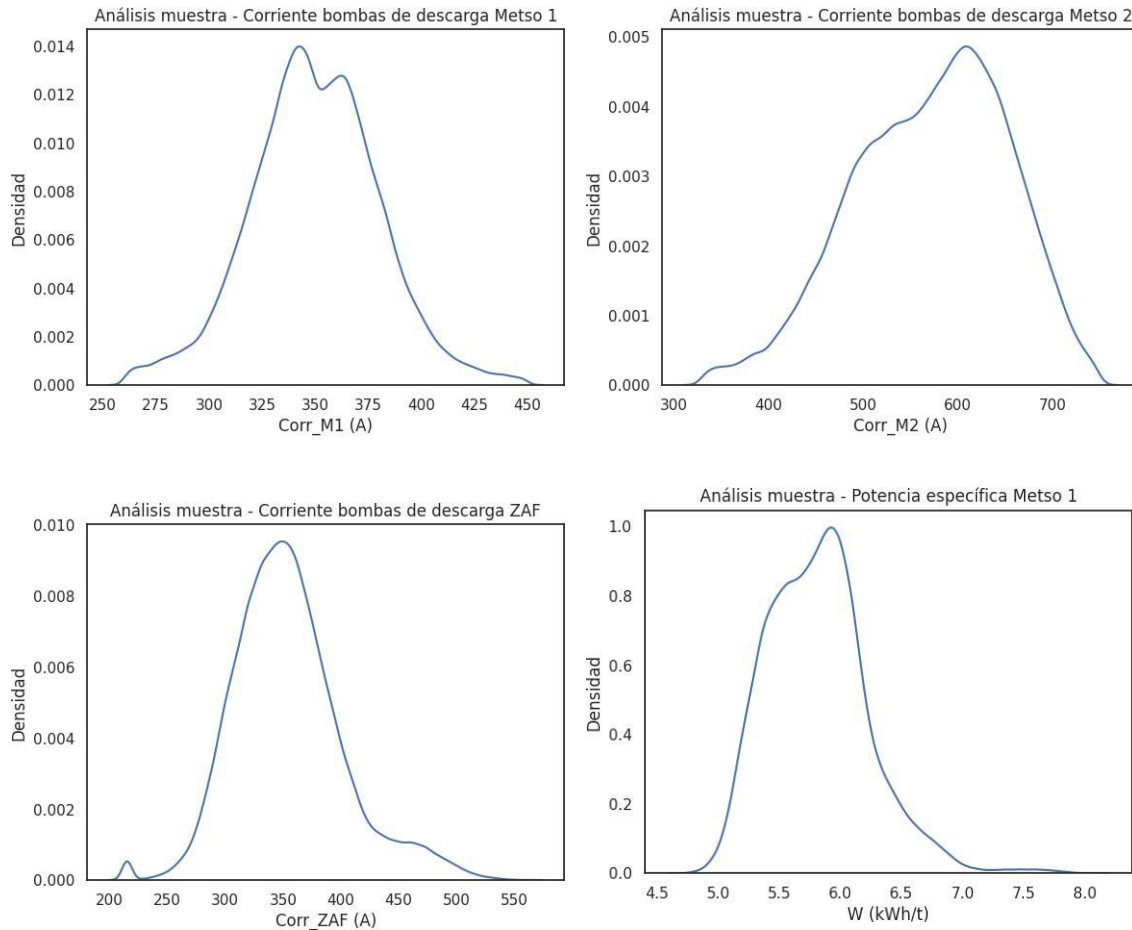
### 5.2.2. *Distribución Estadística de las Variables Analizadas*

La Figura 32, agrupa las distribuciones estadísticas de las principales variables analizadas, en lo que respecta a las granulometrías F80 y P80, ambas presentan una distribución estándar. Mientras que, los datos de la corriente de la bomba de descarga del Metso 1, presentan una distribución bimodal. Por otro lado, los datos de la corriente de las bombas de descarga del Metso 2, presenta una distribución asimétrica negativa. Y, finalmente, tanto la corriente de las bombas de alimentación de las ZAF, como la potencia consumida por el Metso 1, presenta una distribución asimétrica positiva.

**Figura 32**

*Distribución Estadística de las Variables Analizadas*





### 5.2.3. Determinación de Rangos en Función de Percentiles

Ayala (2020)<sup>32</sup> menciona que las medidas de posición estadísticas son aquellas en dónde se puede dividir a conjunto en una determinada cantidad de partes. Puntualmente, los cuartiles, dividen el conjunto de datos en cuarto partes iguales, considerando Q1 como el 25%, Q2 como el 50% y Q3 como el 75%.

La Tabla 11 muestra los diferentes cuartiles de las variables estudiadas, esta medida de posición se utilizó para determinar tres zonas: Baja, Media, Alta para los valores asociados a la tensión de las bombas; y, Fino, Normal, Grueso, para los valores asociados a la

<sup>32</sup> Ayala, S. (2020). *Estadística. Cuartiles, Deciles, Percentiles*. Escuela Superior Tepeji del Río. [Archivo PDF]. [https://www.uaeh.edu.mx/division\\_academica/educacion-media/repositorio/2010/6- semestre/estadistica/cuartiles-deciles-y-percentiles.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/division_academica/educacion-media/repositorio/2010/6- semestre/estadistica/cuartiles-deciles-y-percentiles.pdf)

granulometría. Estas zonas sirvieron como punto de referencia, para determinar realmente si según el conocimiento experto de los operadores estas zonas son válidas, fue necesario comparar los límites de cada zona con la información recabada en las encuestas.

**Tabla 11**

*Cuartiles de las Variables Estudiadas*

| <b>Variable</b> | <b>25%</b> | <b>50%</b> | <b>75%</b> |
|-----------------|------------|------------|------------|
| Corr_M1         | 330.53     | 349.45     | 369.61     |
| Corr_M2         | 513.71     | 578.90     | 632.35     |
| Corr_ZAF        | 322.50     | 350.10     | 379.64     |
| F80             | 6.46       | 7.28       | 8.17       |
| Ton.            | 496.14     | 510.97     | 537.95     |
| Agua            | 164.65     | 172.08     | 181.20     |
| Potencia        | 2926.90    | 2976.96    | 3026.11    |
| P. Carga        | 856.23     | 960.29     | 1042.63    |
| P. Descarga     | 696.33     | 989.09     | 1098.01    |
| W               | 5.51       | 5.80       | 6.06       |
| P80             | 533.52     | 574.51     | 620.86     |

### **5.3. Construcción del Sistema de Inferencia Difusa (FIS)**

En esta sección se detallará el procedimiento metodológico seguido para el desarrollo de un FIS que optimice la molienda primaria, este procedimiento es una adaptación de lo propuesto por Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup>, según lo indicado en el capítulo anterior.

El FIS propuesto ha sido desarrollado en el entorno de código Google Colaboratory, haciendo uso del lenguaje de programación Python. La totalidad del código generado se encuentra en el Anexo 10.4 para mayor comprensión.

### 5.3.1. Definición de las Variables de Entrada y Salida

El Sistema de Inferencia Difuso (FIS) propuesto busca optimizar la molienda primaria de la unidad minera estudiada. Existe bibliografía de otros autores que ya han realizado FIS para optimizar los procesos de molienda, específicamente para molinos de bolas. La Tabla 12 detalla las principales variables de entrada y salida que otros autores han utilizado en sus investigaciones.

**Tabla 12**

*Variables de Entrada y Salida Consideradas en Lógicas de Control para Molienda*

| <b>Autores</b>        | <b>Variables de entrada</b>            | <b>Variables de salida</b>         |
|-----------------------|----------------------------------------|------------------------------------|
| Zou et al. (2022)     | - Señal de sonido de molienda          | - Alimentación de mineral          |
|                       | - Potencia del molino                  | - Alimentación de agua             |
| Huaman (2019)         | - Densidad de la pulpa                 | - Alimentación de mineral          |
|                       | - Nivel de cajón de descarga           | - Alimentación de agua             |
|                       | - Tonelaje procesado por hora          |                                    |
| Granados (2018)       | - Granulometría                        | - Flujo de alimentación de mineral |
|                       | - Potencia del molino                  |                                    |
|                       | - Amperaje de la bomba del hidrociclón | - Caudal de agua                   |
|                       | - Nivel de cajón de descarga           |                                    |
| Guerrero (2017)       | - Granulometría                        | - RPM                              |
| Modesto y Melo (2017) | - Granulometría                        | - Tasa de alimentación de mineral  |

En relación con las variables de entrada, cada uno de los autores mencionados en la Tabla 12 consideró diferentes variables, sin embargo, existen algunas ligeramente comunes a las investigaciones mencionadas. La granulometría del mineral fresco que ingresa al molino de bolas es tal vez la variable más utilizada; asimismo, el nivel del cajón de descarga que recibe la pulpa y la potencia del motor del molino son mencionados por más de un autor.

Para confirmar cuáles serían las variables empleadas en el FIS de esta investigación fue necesario observar el accionar diario de los operadores, y validar cuáles de las variables

disponibles a la fecha sirven como medida de control. Como se observa en la Tabla 13, el circuito de molienda primario de la unidad estudiada no cuenta con sensores de nivel de cajón, ni tampoco densímetros, lo que descarta esos valores. Sin embargo, cuenta con otras de las variables consideradas por los autores en la Tabla 12.

**Tabla 13**

*Instrumentación Disponible en el Circuito de Molienda de la Unidad Minera*

| <b>Variable de control</b>                    | <b>Disponible</b> | <b>Utilizado</b> |
|-----------------------------------------------|-------------------|------------------|
| Corrientes de bomba de descarga del molino    | Sí                | Sí               |
| Corrientes de bomba de alimentación a las ZAF | Sí                | Sí               |
| Granulometría (F80)                           | Sí                | No               |
| Nivel de cajón                                | No                | No               |
| Densidad                                      | No                | No               |
| Potencia del motor del molino                 | Sí                | No               |
| Presión del molino en el lado carga           | Sí                | No               |
| Presión del molino en el lado descarga        | Sí                | No               |

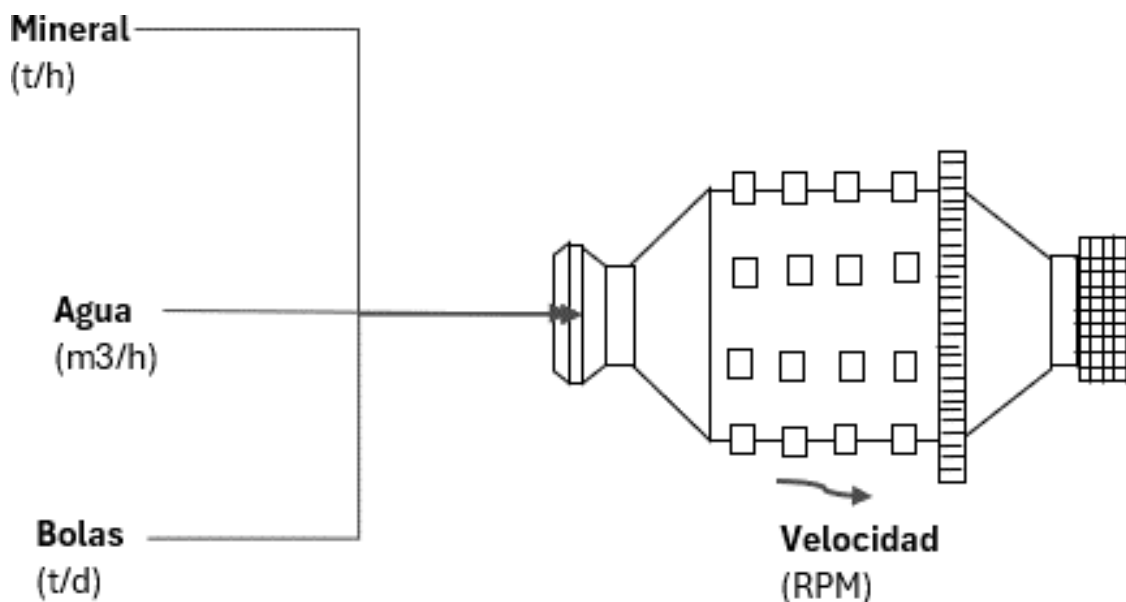
De la Tabla 12, se observa que existe unanimidad en cuánto a las variables de salida de un controlador difuso para molienda de bolas, regulando la alimentación de mineral fresco (t/h) y la alimentación de agua (m<sup>3</sup>/h). Asimismo, Guerrero (2017) también menciona que la modificación de la velocidad del molino (RPM) es posible.

En línea con lo anterior, la Figura 33, detalla las variables comúnmente regulables durante la operación de un molino de bolas. Convencionalmente, el tonelaje de mineral que se alimenta a un molino (t/h) es regulado manualmente o mediante un lazo de control. De la misma forma, la modificación del caudal de agua en el ingreso o la salida del molino es habitualmente regulado mediante un lazo cerrado vinculado al tonelaje. En el caso de la dosificación de las bolas (t/d), salvo se tenga un mecanismo de dosificación automática de bolas, por lo general, se realiza una reposición diaria de una cantidad previamente calculada, por lo que no se puede considerar una variable a regular dentro de un lazo de control. En lo

que respecta a la velocidad (RPM), dependerá del tipo de molino, y si este cuenta con un variador de velocidad, de no ser así, la velocidad tampoco podría ser considerada como una variable a controlar.

**Figura 33**

*Variables Regulables en la Operación de un Molino de Bolas*



En el caso de la unidad de estudio de la presente investigación, se trata de un molino de arranque directo (velocidad constante), sin dosificación automática de bolas, y que actualmente no cuenta con un lazo de control que regule ni el tonelaje de alimentación, ni el caudal de agua. Además, la dosificación de agua es únicamente al ingreso del molino.

Por ello, luego de las encuestas realizadas a los operadores y jefes de guardia, se determinó que a la fecha existe una regulación manual del tonelaje y en algunos casos del caudal de agua. Principalmente estos cambios están sujetos a las tendencias de las corrientes de las bombas de descarga del Metso 1 y Metso 2, así como las de alimentación a las ZAF.

Para los operadores, al no tener un densímetro funcional en la salida de molienda, la tensión de la bomba de descarga del Metso 1, indica indirectamente que tan densa es la pulpa,

generando una respuesta en el tonelaje o en el caudal; asimismo, las corrientes de las bombas del Metso 2 y de las ZAF, son utilizadas como una medida indirecta de la carga circulante en el circuito de molienda primario estudiado, ya que al elevarse indica un incremento en esta, y genera una disminución en el tonelaje. Tanto la presión en los lados carga y descarga, así como la potencia del motor, son valores que son mayormente utilizados por las áreas de Mantenimiento Predictivo de la unidad estudiada, estos valores permiten identificar comportamientos anómalos en el desempeño de los molinos y prevenir paradas no programadas, sin embargo, hablando estrictamente del control operacional, no son consideradas para la modificación del tonelaje de alimentación o caudal de agua. Finalmente, la granulometría es un valor que a la fecha no es utilizado para modificar la cantidad de mineral fresco alimentado, sin embargo, existe interés por parte de los jefes de guardia de poder implementar esta medida en un lazo de control cerrado.

Por lo anteriormente expuesto, y considerando lo mencionado por Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> sobre los FIS tipo Mamdani donde las reglas se crean a partir del conocimiento humano disponible, el FIS propuesto en esta investigación considera como valores entrada a: la granulometría F80, la corriente de la bomba de descarga del Metso 1 (Corr\_BMetso1), la corriente de la bomba de descarga del Metso 2 (Corr\_BMetso2), y la corriente de la bomba de alimentación hacia las ZAF (Corr\_ZAF). Asimismo, se considera como variable de salida/respuesta a la variación del tonelaje de alimentación, denominada (Delta\_Ton).

Una vez defuzzificado el valor de Delta\_Ton, este será sumado o restado al valor actual del tonelaje, para calcular finalmente un valor de “tonelaje sugerido”. Asimismo, el caudal sugerido será calculado a partir de ese tonelaje sugerido, tomando en consideración la relación L/S, como lo hacen actualmente los operadores del proceso.

Es importante mencionar que la salida del FIS propuesto es únicamente la “variación de tonelaje”; tanto el tonelaje sugerido, como el caudal sugerido, son calculados en función de relaciones matemáticas simples. Asimismo, para calcular el impacto en el P80 producto, fue necesario desarrollar otro algoritmo en paralelo, que permitiera usar el Modelo de Bond.

### **5.3.2. Definición de los Antecedentes para cada Regla.**

Una vez definidos los cuatro valores de entrada, se procede a redactar el enunciado del antecedente, quedando de la siguiente forma:

**Si** F80 es (cond.)  $\wedge$  Corr\_BMetso1 es (cond.)  $\wedge$  Corr\_BMetso2 es (cond.)  $\wedge$  Corr\_ZAF es (cond.)

Según mencionan Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup>, los antecedentes tienen forma de “Si A es B”. Por sugerencia de los operadores, cada variable debe tener tres rangos, haciendo referencia a un rango Bajo, Normal y Alto.

### **5.3.3. Definición de los Consecuentes para cada Regla.**

Una vez definido el único valor de salida del FIS (Delta\_Ton), se procede a redactar el enunciado del consecuente, quedando de la siguiente forma:

entonces Delta\_Ton es (cond.)

Por sugerencia de los operadores, la variable de salida/respuesta debe tener cinco rangos, haciendo referencia a condiciones donde Disminuye mucho, Disminuye, Mantiene, Aumenta o Aumenta mucho el tonelaje de alimentación al molino primario.

### **5.3.4. Conversión de la Entrada a un Conjunto Difuso (Fuzzificación).**

Una vez definidos los cuatro valores de entrada que ingresan al Sistema de Inferencia Difuso propuesto (F80, Corr\_BMetso1, Corr\_BMetso2, Corr\_ZAF), según mencionan Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup> es hora de iniciar el proceso de Fuzzificación, es decir, asignar un valor entre 0 y 1 a cada valor de entrada.

Para este FIS, se considera una función de membresía de tipo Trapezoidal, ya que esta facilita la construcción de esta función en base a los límites mínimos y máximos detallados por los operadores del proceso de molienda.

Para la construcción del FIS propuesto, se utilizó el lenguaje de programación Python, así como la librería “fuzzylite”. Esta librería permite el desarrollo de lógicas de control difusas, para poder utilizarla bastará con colocar la siguiente sentencia:

```
import fuzzylite as fl
```

Asimismo, para realizar un proceso de Fuzzificación con Python, es necesario utilizar el comando “engine.input\_variables”. A continuación, se detalla un ejemplo de línea de código:

```
engine.input_variables = [  
    fl.InputVariable(...)  
]
```

Por otro lado, para conseguir visualizar las funciones de membresía en Python, es necesario utilizar la librería “skfuzzy” junto a otras librerías adicionales, a continuación, se detalla el código utilizado:

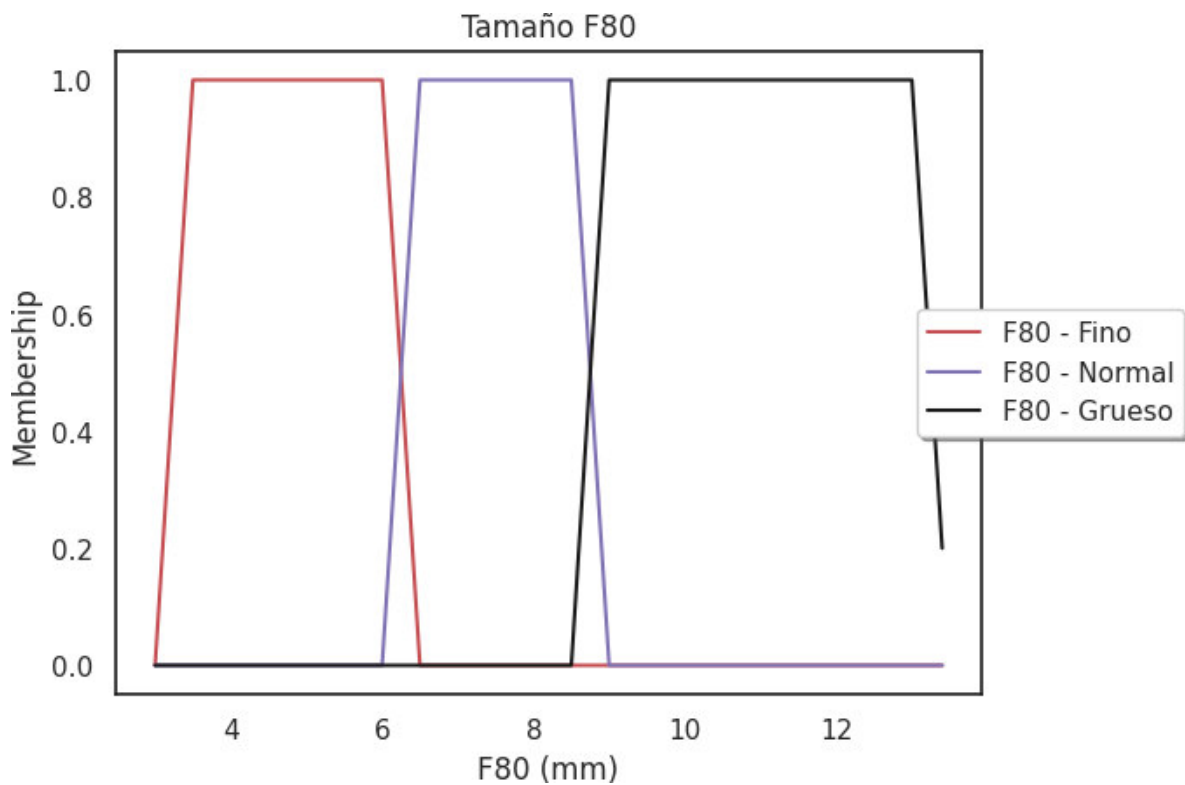
```
import scipy.linalg  
pip install -U scikit-fuzzy  
import numpy as np  
import skfuzzy as fuzz  
import matplotlib.pyplot as plt  
%matplotlib inline
```

#### 5.3.4.1. F80.

Según la información recabada a partir de los operadores y el análisis estadístico de los valores de granulometría durante el periodo 2023, se puede categorizar al F80 en tres rangos: Fino, Normal y Grueso, según se observa en la Figura 34.

**Figura 34**

*Función de Membresía para el F80*



El rango fino consiste en granulometrías que van desde los 3mm hasta los 6.5mm, consecuentemente, el rango normal llega hasta valores iguales a 9mm, y finalmente el rango grueso, consiste en partículas que alcanzan tamaños de hasta 13.5mm.

En la Figura 31, se observa que, entre los rangos fino, normal y grueso, existen zonas intermedias en dónde un mismo valor puedes pertenecer a más de un rango, por ejemplo, una granulometría de 6.2mm puede ser considerada parcialmente fino, y al mismo tiempo normal, estas zonas en común, conocidas como “límites” según Sivanandam et al.(2007)<sup>14</sup>, tienen una

longitud de 0.5mm a cada extremo. Estas zonas fueron intencionalmente diseñadas, para modelar matemáticamente la ambigüedad que existe en los límites de cada tamaño.

A continuación, se detalla el código utilizado para el diseño de las funciones de membresía.

```
fl.InputVariable(  
    name ="F80",  
    description ="Tamaño F80 del alimento a molienda",  
    enabled=True,  
    minimum=2.500,  
    maximum=13.500,  
    lock_range=False  
    terms=[  
        fl.Trapezoid("Fino", 3, 3.5, 6, 6.5),  
        fl.Trapezoid("Normal", 6, 6.5, 8.5, 9.),  
        fl.Trapezoid("Grueso", 8.5, 9., 13, 13.5)  
    ]  
)
```

Asimismo, se detalla el código empleado para la visualización de las funciones de membresía.

```
x = np.arange(3, 13.5, 0.1)  
Fino = fuzz.trapmf(x, [3, 3.5, 6, 6.5])  
Normal = fuzz.trapmf(x, [6, 6.5, 8.5, 9])  
Grueso = fuzz.trapmf(x, [8.5, 9., 13, 13.5])  
plt.figure()  
plt.plot(x, Fino, 'r', linewidth = 1.5, label = 'F80 - Fino')  
plt.plot(x, Normal, 'm', linewidth = 1.5, label = 'F80 - Normal')  
plt.plot(x, Grueso, 'k', linewidth = 1.5, label = 'F80 - Grueso')
```

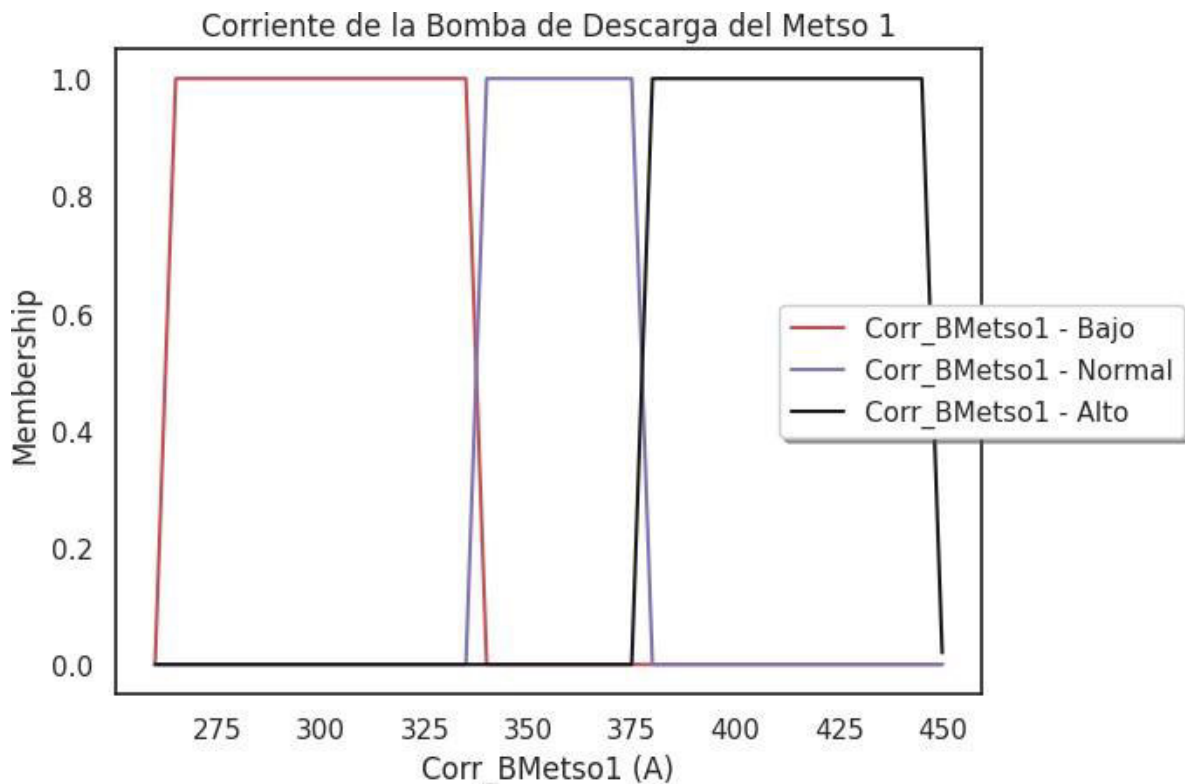
```
plt.title('Tamaño F80')
plt.ylabel('Membership')
plt.xlabel('F80 (mm)')
plt.legend(loc = 'center right', bbox_to_anchor = (1.25, 0.5), ncol = 1,
fancybox = True, shadow = True)
```

#### 5.3.4.2. Corr\_BMetso1.

Según la información recabada a partir de los operadores y el análisis estadístico de los valores de la corriente de la bomba de descarga del molino Metso 1, se puede categorizar a la Corr\_BMetso1 en tres rangos: Bajo, Normal y Alto, según se observa en la Figura 35.

**Figura 35**

*Función de Membresía para la Corr\_BMetso1*



El rango bajo consiste en valores que van desde los 260A hasta los 450A, consecuentemente, el rango normal llega hasta valores iguales a 380A, y finalmente el rango alto, consiste en valores que alcanzan los 450A.

Al igual, que para el caso del F80, existe una zona común a los rangos denominado “límite”, para todos los valores de entrada relacionados con las corrientes de las bombas tiene una longitud de 5A.

A continuación, se detalla el código utilizado para el diseño de las funciones de membresía.

```
fl.InputVariable(  
    name ="Corr_BMetsol", #Corr_BMetsol  
    description="Corriente de las bombas del Metsol",  
    enabled=True,  
    minimum=260.000,  
    maximum=450.000,  
    lock_range=False,  
    terms=[  
        fl.Trapezoid("Bajo", 260, 265, 335, 340),  
        fl.Trapezoid("Normal", 335, 340, 375, 380),  
        fl.Trapezoid("Alto", 375, 380, 445, 450)  
    ]  
)
```

Asimismo, se detalla el código empleado para la visualización de las funciones de membresía.

```
x = np.arange(260, 450, 0.1)  
Bajo = fuzz.trapmf(x, [260, 265, 335, 340])  
Normal = fuzz.trapmf(x, [335, 340, 375, 380])  
Alto = fuzz.trapmf(x, [375, 380, 445, 450])  
plt.figure()  
plt.plot(x, Bajo, 'r', linewidth = 1.5, label = 'Corr_BMetsol - Bajo')  
plt.plot(x, Normal, 'm', linewidth = 1.5, label = 'Corr_BMetsol - Normal')
```

```
plt.plot(x, Alto, 'k', linewidth = 1.5, label = 'Corr_BMetso1 - Alto')

plt.title('Corriente de la Bomba de Descarga del Metso 1')

plt.ylabel('Membership')

plt.xlabel('Corr_BMetso1 (A)')

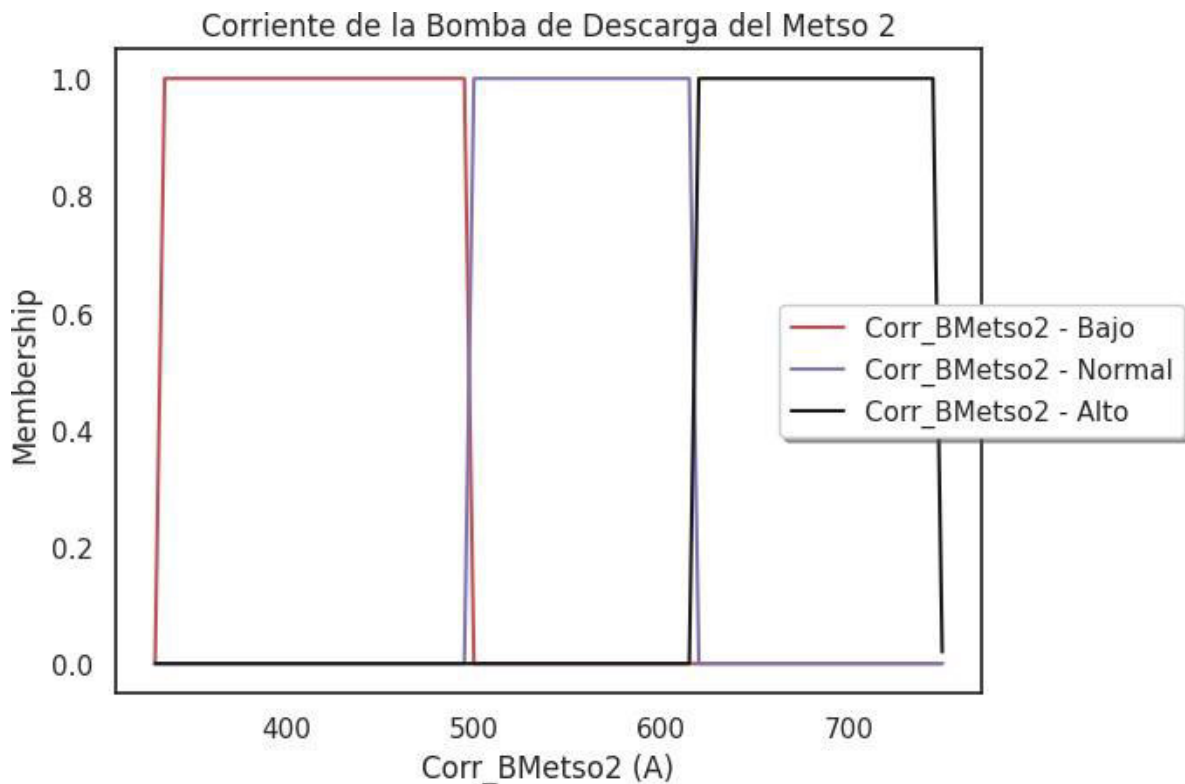
plt.legend(loc = 'center right', bbox_to_anchor = (1.25, 0.5), ncol = 1,
fancybox = True, shadow = True)
```

#### 5.3.4.3. Corr\_BMetso2.

Según la información recabada a partir de los operadores y el análisis estadístico de los valores de la corriente de la bomba de descarga del molino Metso 2, se puede categorizar a la Corr\_BMetso2 en tres rangos: Bajo, Normal y Alto, según se observa en la Figura 36.

**Figura 36**

*Función de Membresía para la Corr\_BMetso2*



El rango bajo consiste en valores que van desde los 330A hasta los 500A, consecuentemente, el rango normal llega hasta valores iguales a 620A, y finalmente el rango alto, consiste en valores que alcanzan los 750A.

A continuación, se detalla el código utilizado para el diseño de las funciones de membresía.

```
fl.InputVariable(  
    name = "Corr_BMetso2", #Corr_BMetso2  
    description="Corriente de las bombas del Metso 2",  
    enabled=True,  
    minimum=330.000,  
    maximum=750.000,  
    lock_range=False,  
    terms=[  
        fl.Trapezoid("Bajo", 330, 335, 495, 500),  
        fl.Trapezoid("Normal", 495, 500, 615, 620),  
        fl.Trapezoid("Alto", 615, 620, 745, 750)  
    ]  
)
```

Asimismo, se detalla el código empleado para la visualización de las funciones de membresía.

```
x = np.arange(330, 750, 0.1)  
Bajo = fuzz.trapmf(x, [330, 335, 495, 500])  
Normal = fuzz.trapmf(x, [495, 500, 615, 620])  
Alto = fuzz.trapmf(x, [615, 620, 745, 750])  
plt.figure()  
plt.plot(x, Bajo, 'r', linewidth = 1.5, label = 'Corr_BMetso2 - Bajo')  
plt.plot(x, Normal, 'm', linewidth = 1.5, label = 'Corr_BMetso2 - Normal')
```

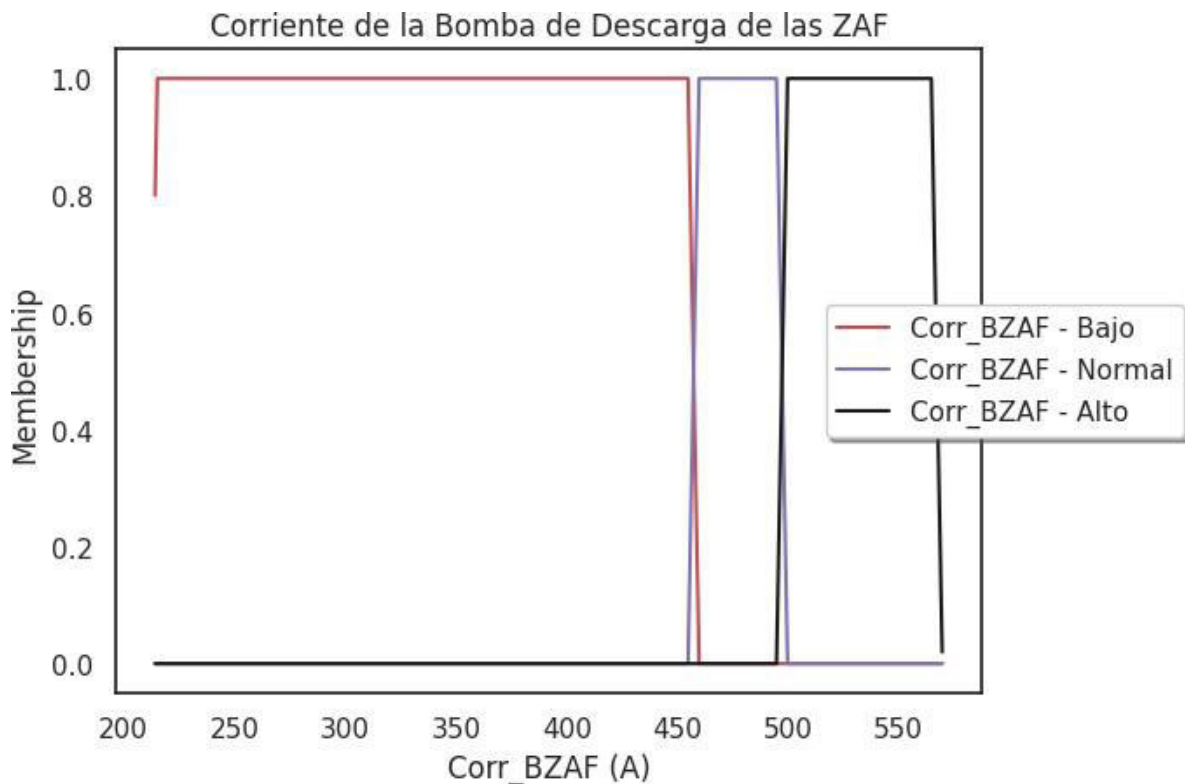
```
plt.plot(x, Alto, 'k', linewidth = 1.5, label = 'Corr_BMetso2 - Alto')
plt.title('Corriente de la Bomba de Descarga del Metso 2')
plt.ylabel('Membership')
plt.xlabel('Corr_BMetso2 (A)')
plt.legend(loc = 'center right', bbox_to_anchor = (1.25, 0.5), ncol = 1,
fancybox = True, shadow = True)
```

#### 5.3.4.4. Corr\_ZAF.

Según la información recabada a partir de los operadores y el análisis estadístico de los valores de la corriente de la bomba de alimentación de las ZAF, se puede categorizar a la Corr\_ZAF en tres rangos: Bajo, Normal y Alto, según se observa en la Figura 37.

**Figura 37**

*Función de Membresía para la Corr\_ZAF*



El rango bajo consiste en valores que van desde los 210A hasta los 460A, consecuentemente, el rango normal llega hasta valores iguales a 500A, y finalmente el rango alto, consiste en valores que alcanzan los 570A.

A continuación, se detalla el código utilizado para el diseño de las funciones de membresía.

```
fl.InputVariable(  
    name = "Corr_BZAF", #Corr_BZAF  
    description="Corriente de las bombas de las ZAF",  
    enabled=True,  
    minimum=214.000,  
    maximum=570.000,  
    lock_range=False,  
    terms=[  
        fl.Trapezoid("Bajo", 210, 215, 455, 460),  
        fl.Trapezoid("Normal", 455, 460, 495, 500),  
        fl.Trapezoid("Alto", 495, 500, 565, 570)  
    ]  
)
```

Asimismo, se detalla el código empleado para la visualización de las funciones de membresía.

```
x = np.arange(214, 570, 0.1)  
Bajo = fuzz.trapmf(x, [210, 215, 455, 460])  
Normal = fuzz.trapmf(x, [455, 460, 495, 500])  
Alto = fuzz.trapmf(x, [495, 500, 565, 570])  
plt.figure()  
plt.plot(x, Bajo, 'r', linewidth = 1.5, label = 'Corr_BZAF - Bajo')  
plt.plot(x, Normal, 'm', linewidth = 1.5, label = 'Corr_BZAF - Normal')
```

```
plt.plot(x, Alto, 'k', linewidth = 1.5, label = 'Corr_BZAF - Alto')
plt.title('Corriente de la Bomba de Descarga de las ZAF')
plt.ylabel('Membership')
plt.xlabel('Corr_BZAF (A)')
plt.legend(loc = 'center right', bbox_to_anchor = (1.25, 0.5), ncol = 1,
fancybox = True, shadow = True)
```

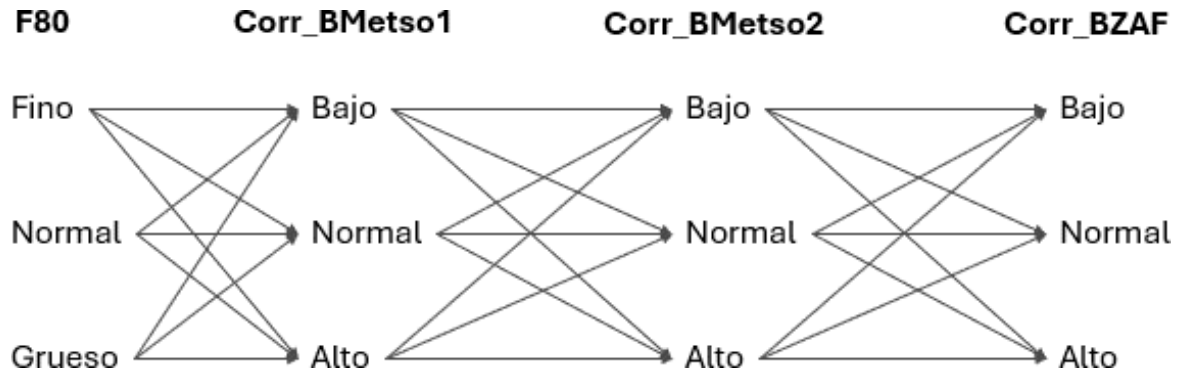
El procedimiento descrito en esta sección permitirá que el Sistema de Inferencia Difusa (FIS) desarrollado asigne un rango específico para cada posición de un vector de entrada con la forma (F80, Corr\_BMetso1, Corr\_BMetso2, Corr\_ZAF). Y, esto permitirá que se puedan aplicar reglas difusas al nuevo conjunto generado, generando un valor de salida para cada conjunto de valores de entrada. Para esta investigación, al tratarse de un FIS tipo Mamdani, se optó por definir los rangos bajo el criterio experto del operador y los jefes de guardia, sin embargo, es posible también definir los límites en base a un análisis estadístico, o inclusive, construir un FIS tipo Sugeno, aprovechando la base de datos adquirida.

### ***5.3.5. Aplicación de Reglas Difusas***

Esta sección detalla un conjunto de 81 reglas que responden a las decisiones operacionales que suceden en la molienda primaria. El Sistema de Inferencia (FIS) tipo Mamdani propuesto en esta investigación considera cuatro valores de entrada: Tamaño F80 del mineral (F80), Corriente de las bombas de descargas del Metso 1 (Corr\_BMetso1), Corriente de las bombas de descargas del Metso 2 (Corr\_BMetso 2) y la Corriente de las bombas de alimentación a las ZAF (Corr\_BZAF). Cada uno de los valores de entrada considera tres rangos: Fino, normal y grueso para el F80; bajo, normal y alto para la corriente de las bombas. Al ser cuatro valores de entrada con tres rangos cada uno, se generan un total de  $3^4$  posibles escenarios (reglas difusas), según se observa en la Figura 38.

**Figura 38**

*Conformación de 3<sup>a</sup> Reglas Difusas*



Con respecto a la salida del conjunto difuso generado para cada regla, se considera la “sugerencia de tonelaje”, denominado  $\Delta_{Ton}$ , esta salida considera cinco valores difusos: Disminuir mucho, Disminuir, Mantener, Aumentar, Aumentar mucho. Luego de un proceso de Defuzzificación cada uno de los valores adopta un valor numérico, este deberá sumarse o restarse al tonelaje respectivo, generando como resultado un “Tonelaje sugerido”, que puede ser mayor o menor. Quedando de la siguiente forma:

$$\text{Tonelaje sugerido} = \text{Tonelaje difuso} \pm \Delta_{Ton}$$

Esta modificación de tonelaje tiene un doble propósito: Maximizar el tonelaje alimentado al molino primario, principalmente en escenarios donde se presenta material fino, y Estabilizar el tamaño P80, principalmente en escenarios donde se presenta material grueso y es necesario disminuir la cantidad de mineral alimentado para no afectarla granulometría de salida.

Adicionalmente, el modelo propuesto considera un lazo de control para modificar el caudal de agua en función del “Tonelaje sugerido”, este cálculo según muestra la ecuación:

$$\text{Caudal sugerido} = \text{Tonelaje sugerido} \times 0.31$$

El valor 0.31 responde a la relación L/S que maneja el área de molienda para obtener una densidad de pulpa apropiada en la salida del molino primario.

Por otro lado, para poder construir reglas difusas con Python, es necesario utilizar el comando “fl.Rule.create”. Se detalla un ejemplo de la aplicación de este comando:

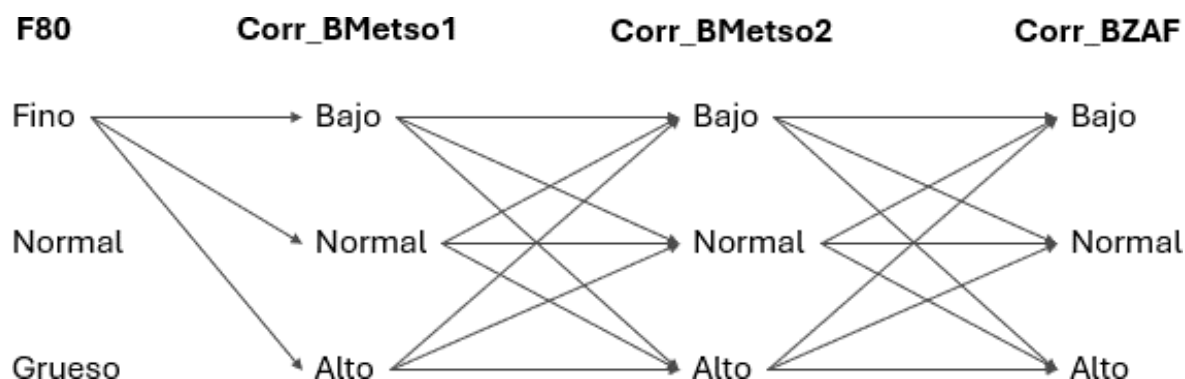
```
fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2  
is Bajo and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is Aumentar_Mucho", engine),
```

#### 5.3.5.1. Reglas Difusas para un F80 Fino.

Para los escenarios en dónde ingresa mineral fino al molino primario, según se observa en la Figura 39 se generan  $3^3$  posibles respuestas operacionales, considerando las cuatro variables antes mencionadas: F80, Corr\_BMetso1, Corr\_BMetso2, Corr\_ZAF.

**Figura 39**

*Conformación de  $3^3$  Reglas Difusas cuando el F80 es Fino*



El criterio principal que siguen este conjunto de reglas es la maximización del tonelaje de alimentación al molino, aprovechando el ingreso de material fino.

A continuación, se detallan uno a uno los criterios que siguen los operadores para las  $3^3$  reglas generadas.

Cuando el mineral que ingresa al molino es fino, y las corrientes de las bombas de descarga se mantienen en los rangos Bajo o Normal, la respuesta validada por los operadores

es “aumentar mucho” el tonelaje, esto significa que el FIS propuesto, incrementará entre 50 t/h a 100 t/h el tonelaje sobre el valor actual, el valor exacto será definido mediante el proceso de Defuzzificación en función de los valores de entrada. En total, la lógica propuesta genera 8 reglas difusas en dónde la respuesta es “aumentar mucho”, cuando el mineral que ingresa es fino. A continuación, se detalla el código generado para cada una de las reglas.

```
a) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Bajo and
    Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
    Aumentar_Mucho", engine),
b) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Bajo and
    Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
    Aumentar_Mucho", engine),
c) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Bajo and
    Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
    Aumentar_Mucho", engine),
d) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Bajo and
    Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
    Aumentar_Mucho", engine),
e) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Normal and
    Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
    Aumentar_Mucho", engine),
f) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Normal and
    Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
    Aumentar_Mucho", engine),
g) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Normal and
    Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
    Aumentar_Mucho", engine),
```

```
h) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Normal and  
Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is  
Aumentar_Mucho", engine),
```

Cuando el mineral que ingresa al molino es fino, y solo una de las corrientes de las bombas de descarga se mantiene en rango Alto, la respuesta validada por los operadores es “mantener” el tonelaje, esto significa que el FIS propuesto, no incrementará el tonelaje sobre el valor actual, esta respuesta da oportunidad a que la corriente de las bombas se normalice, sin embargo, en caso las corrientes sigan aumentando, el FIS propuesto tomará otra decisión. En total, la lógica propuesta genera 12 reglas difusas en dónde la respuesta es “mantener”, cuando el mineral que ingresa es fino. A continuación, se detalla el código generado para cada una de las reglas.

```
a) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Bajo and  
Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is  
Mantener", engine),  
b) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Bajo and  
Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is  
Mantener", engine),  
c) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Bajo and  
Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is  
Mantener", engine),  
d) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Bajo and  
Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is  
Mantener", engine),  
e) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Normal and  
Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is  
Mantener", engine),
```

```

f) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetso1 is Normal and
    Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
    Mantener", engine),
g) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetso1 is Normal and
    Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
    Mantener", engine),
h) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetso1 is Normal and
    Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
    Mantener", engine),
i) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetso1 is Alto and
    Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
    Mantener", engine),
j) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetso1 is Alto and
    Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
    Mantener", engine),
k) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetso1 is Alto and
    Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
    Mantener", engine),
l) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetso1 is Alto and
    Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
    Mantener", engine),

```

Cuando el mineral que ingresa al molino es fino, y dos o inclusive tres de las corrientes de las bombas se mantienen en rango Alto, la respuesta validada por los operadores es “disminuir mucho” el tonelaje, esto significa que el FIS propuesto, disminuirá entre 50 t/h a 100 t/h el tonelaje sobre el valor actual, el valor exacto será definido mediante el proceso de Defuzzificación en función de los valores de entrada. En total, la lógica propuesta genera

7 reglas difusas en dónde la respuesta es “disminuir mucho”, cuando el mineral que ingresa es fino. A continuación, se detalla el código generado para cada una de las reglas.

```
a) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Bajo and
  Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),
b) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Normal and
  Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),
c) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Alto and
  Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),
d) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Alto and
  Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),
e) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Alto and
  Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),
f) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Alto and
  Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),
g) fl.Rule.create("if F80 is Fino and Corr_BMetsol is Alto and
  Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),
```

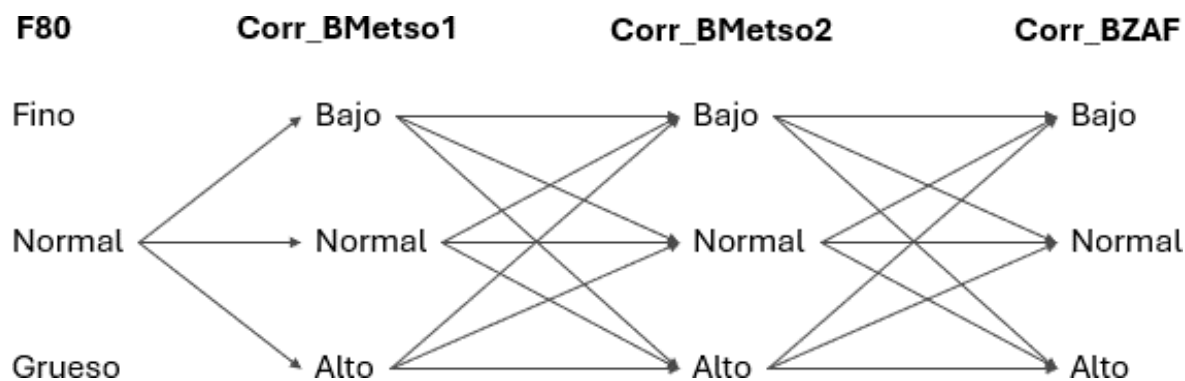
#### **5.3.5.2. Reglas Difusas para un F80 Normal.**

Para los escenarios en dónde ingresa mineral de tamaño normal al molino primario, según se observa en la Figura 40 se generan 3<sup>3</sup> posibles respuestas operacionales,

considerando las cuatro variables antes mencionadas: F80, Corr\_BMetso1, Corr\_BMetso2, Corr\_ZAF.

**Figura 40**

*Conformación de 3<sup>3</sup> Reglas Difusas cuando el F80 es Normal*



A continuación, se detallan uno a uno los criterios que siguen los operadores para las 3<sup>3</sup> reglas generadas.

Cuando el mineral que ingresa al molino es de tamaño normal, y las corrientes de las bombas se mantienen en los rangos Bajo o Normal, la respuesta validada por los operadores es “aumentar” el tonelaje, esto significa que el FIS propuesto, incrementará entre 10 t/h a 60 t/h el tonelaje sobre el valor actual, el valor exacto será definido mediante el proceso de Defuzzificación en función de los valores de entrada. En total, la lógica propuesta genera 8 reglas difusas en dónde la respuesta es “aumentar”, cuando el mineral que ingresa es de tamaño normal. A continuación, se detalla el código generado para cada una de las reglas.

- a) `fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is Aumentar", engine),`
- b) `fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is Aumentar", engine),`

```

c) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and
  Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
  Aumentar", engine),
d) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and
  Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
  Aumentar", engine),
e) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Normal and
  Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
  Aumentar", engine),
f) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Normal and
  Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
  Aumentar", engine),
g) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Normal and
  Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
  Aumentar", engine),
h) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Normal and
  Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
  Aumentar", engine),

```

Cuando el mineral que ingresa al molino es de tamaño normal, y solo una de las corrientes de las bombas se mantiene en rango Alto, y las otras dos se mantienen en rango Bajo, la respuesta validada por los operadores es “mantener” el tonelaje, esto significa que el FIS propuesto, no incrementará el tonelaje sobre el valor actual, esta respuesta da oportunidad a que la corriente de las bombas se normalice, sin embargo, en caso las corrientes sigan aumentando, el FIS propuesto tomará otra decisión. En total, la lógica propuesta genera 3 reglas difusas en dónde la respuesta es “mantener”, cuando el mineral que ingresa es de tamaño normal. A continuación, se detalla el código generado para cada una de las reglas.

```

a) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and
  Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
  Mantener", engine),
b) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and
  Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
  Mantener", engine),
c) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Alto and
  Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
  Mantener", engine),

```

Cuando el mineral que ingresa al molino es de tamaño normal, y más de una de las corrientes de las bombas se mantienen en rango Normal o Alto, la respuesta validada por los operadores es “disminuir” el tonelaje, esto significa que el FIS propuesto, disminuirá entre 10 t/h a 60 t/h el tonelaje sobre el valor actual, el valor exacto será definido mediante el proceso de Defuzzificación en función de los valores de entrada. En total, la lógica propuesta genera 9 reglas difusas en donde la respuesta es “disminuir”, cuando el mineral que ingresa es de tamaño normal. A continuación, se detalla el código generado para cada una de las reglas.

```

a) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Normal and
  Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
  Disminuir", engine),
b) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and
  Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
  Disminuir", engine),
c) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and
  Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
  Disminuir", engine),

```

```

d) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Normal and
    Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
    Disminuir", engine),
e) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Normal and
    Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
    Disminuir", engine),
f) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Normal and
    Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
    Disminuir", engine),
g) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Alto and
    Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
    Disminuir", engine),
h) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Alto and
    Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
    Disminuir", engine),
i) fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Alto and
    Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
    Disminuir", engine),

```

Cuando el mineral que ingresa al molino es de tamaño normal, y dos o inclusive tres de las corrientes de las bombas se mantienen en rango Alto, la respuesta validada por los operadores es “disminuir mucho” el tonelaje, esto significa que el FIS propuesto, disminuirá entre 50 t/h a 100 t/h el tonelaje sobre el valor actual, el valor exacto será definido mediante el proceso de Defuzzificación en función de los valores de entrada. En total, la lógica propuesta genera 7 reglas difusas en dónde la respuesta es “disminuir mucho”, cuando el mineral que ingresa es de tamaño normal. A continuación, se detalla el código generado para cada una de las reglas.

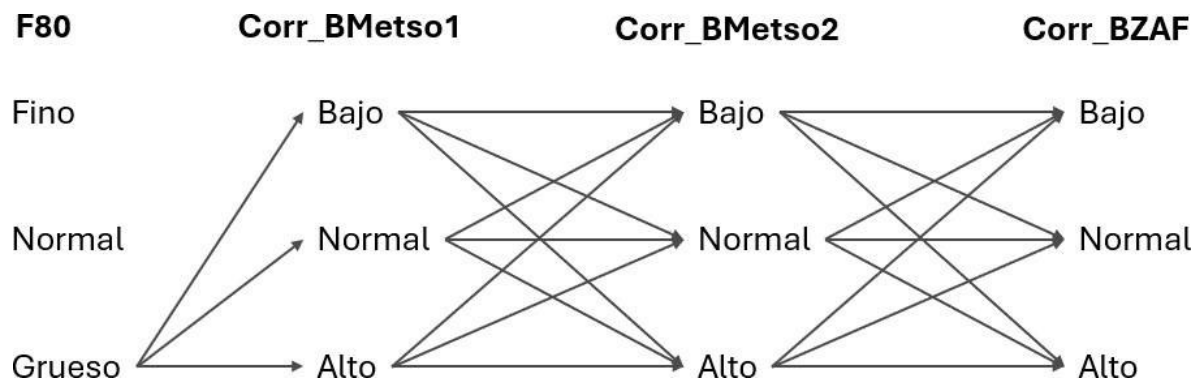
- a) `fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),`
- b) `fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),`
- c) `fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),`
- d) `fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),`
- e) `fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),`
- f) `fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),`
- g) `fl.Rule.create("if F80 is Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),`

### **5.3.5.3. Reglas Difusas para un F80 Grueso.**

Para los escenarios en dónde ingresa mineral grueso al molino primario, según se observa en la Figura 41 se generan 3<sup>3</sup> posibles respuestas operacionales, considerando las cuatro variables antes mencionadas: F80, Corr\_BMetso1, Corr\_BMetso2, Corr\_ZAF.

**Figura 41**

*Conformación de 3<sup>3</sup> Reglas Difusas cuando el F80 es Grueso*



El criterio principal que siguen este conjunto de reglas es la disminución del tonelaje de alimentación al molino con el propósito de mitigar el efecto del mineral grueso en el tamaño de salida del mineral.

A continuación, se detallan uno a uno los criterios que siguen los operadores para las 3<sup>3</sup> reglas generadas.

Cuando el mineral que ingresa al molino es grueso, y las corrientes de las bombas se mantienen en el rango Bajo o Normal, la respuesta validada por los operadores es “disminuir” el tonelaje, esto significa que el FIS propuesto, disminuirá entre 10 t/h a 60 t/h el tonelaje sobre el valor actual, el valor exacto será definido mediante el proceso de Defuzzificación en función de los valores de entrada. En total, la lógica propuesta genera 12 reglas difusas en dónde la respuesta es “disminuir”, cuando el mineral que ingresa es grueso. A continuación, se detalla el código generado para cada una de las reglas.

```
a) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and  
Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is  
Disminuir", engine),
```

b) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Bajo and Corr\_BMetso2 is Bajo and Corr\_BZAF is Normal then Delta\_Ton is Disminuir", engine),

c) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Bajo and Corr\_BMetso2 is Normal and Corr\_BZAF is Bajo then Delta\_Ton is Disminuir", engine),

d) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Bajo and Corr\_BMetso2 is Normal and Corr\_BZAF is Normal then Delta\_Ton is Disminuir", engine),

e) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Normal and Corr\_BMetso2 is Bajo and Corr\_BZAF is Bajo then Delta\_Ton is Disminuir", engine),

f) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Normal and Corr\_BMetso2 is Bajo and Corr\_BZAF is Normal then Delta\_Ton is Disminuir", engine),

g) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Normal and Corr\_BMetso2 is Normal and Corr\_BZAF is Bajo then Delta\_Ton is Disminuir", engine),

h) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Normal and Corr\_BMetso2 is Normal and Corr\_BZAF is Normal then Delta\_Ton is Disminuir", engine),

i) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Alto and Corr\_BMetso2 is Bajo and Corr\_BZAF is Bajo then Delta\_Ton is Disminuir", engine),

j) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Alto and Corr\_BMetso2 is Bajo and Corr\_BZAF is Normal then Delta\_Ton is Disminuir", engine),

```

k) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and
  Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
  Disminuir", engine),
l) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and
  Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
  Disminuir", engine),

```

Cuando el mineral que ingresa al molino es grueso, y al menos una de las corrientes de las bombas se mantienen en rango Alto, la respuesta validada por los operadores es “disminuir mucho” el tonelaje, esto significa que el FIS propuesto, disminuirá entre 50 t/h a 100 t/h el tonelaje sobre el valor actual, el valor exacto será definido mediante el proceso de Defuzzificación en función de los valores de entrada. En total, la lógica propuesta genera 15 reglas difusas en dónde la respuesta es “disminuir mucho”, cuando el mineral que ingresa es grueso. A continuación, se detalla el código generado para cada una de las reglas.

```

a) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and
  Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),
b) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and
  Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),
c) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and
  Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),
d) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and
  Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),

```

e) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Bajo and Corr\_BMetso2 is Alto and Corr\_BZAF is Alto then Delta\_Ton is Disminuir\_Mucho", engine),

f) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Normal and Corr\_BMetso2 is Bajo and Corr\_BZAF is Alto then Delta\_Ton is Disminuir\_Mucho", engine),

g) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Normal and Corr\_BMetso2 is Normal and Corr\_BZAF is Alto then Delta\_Ton is Disminuir\_Mucho", engine),

h) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Normal and Corr\_BMetso2 is Alto and Corr\_BZAF is Bajo then Delta\_Ton is Disminuir\_Mucho", engine),

i) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Normal and Corr\_BMetso2 is Alto and Corr\_BZAF is Normal then Delta\_Ton is Disminuir\_Mucho", engine),

j) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Normal and Corr\_BMetso2 is Alto and Corr\_BZAF is Alto then Delta\_Ton is Disminuir\_Mucho", engine),

k) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Alto and Corr\_BMetso2 is Bajo and Corr\_BZAF is Alto then Delta\_Ton is Disminuir\_Mucho", engine),

l) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Alto and Corr\_BMetso2 is Normal and Corr\_BZAF is Alto then Delta\_Ton is Disminuir\_Mucho", engine),

m) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr\_BMetso1 is Alto and Corr\_BMetso2 is Alto and Corr\_BZAF is Bajo then Delta\_Ton is Disminuir\_Mucho", engine),

```

n) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and
  Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),
o) fl.Rule.create("if F80 is Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and
  Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is
  Disminuir_Mucho", engine),

```

Todas las reglas propuestas en esta investigación utilizan únicamente el operador lógico “AND”, que denota la conjunción entre los valores de entrada. Es decir, todas las premisas descritas en los antecedentes deben cumplirse sí o sí para que este sea verdadero, y se genere la respuesta indicada.

En este punto la salida de las reglas difusas sigue siendo un valor lingüístico: disminuir, disminuir mucho, mantener, aumentar o aumentar mucho. Por ende, es necesario un paso adicional en donde, a cada valor cualitativo, se le asigne un valor numérico. Es importante mencionar que el valor de Delta\_Ton puede ser positivo o negativo, a depender del rango en el que se encuentre.

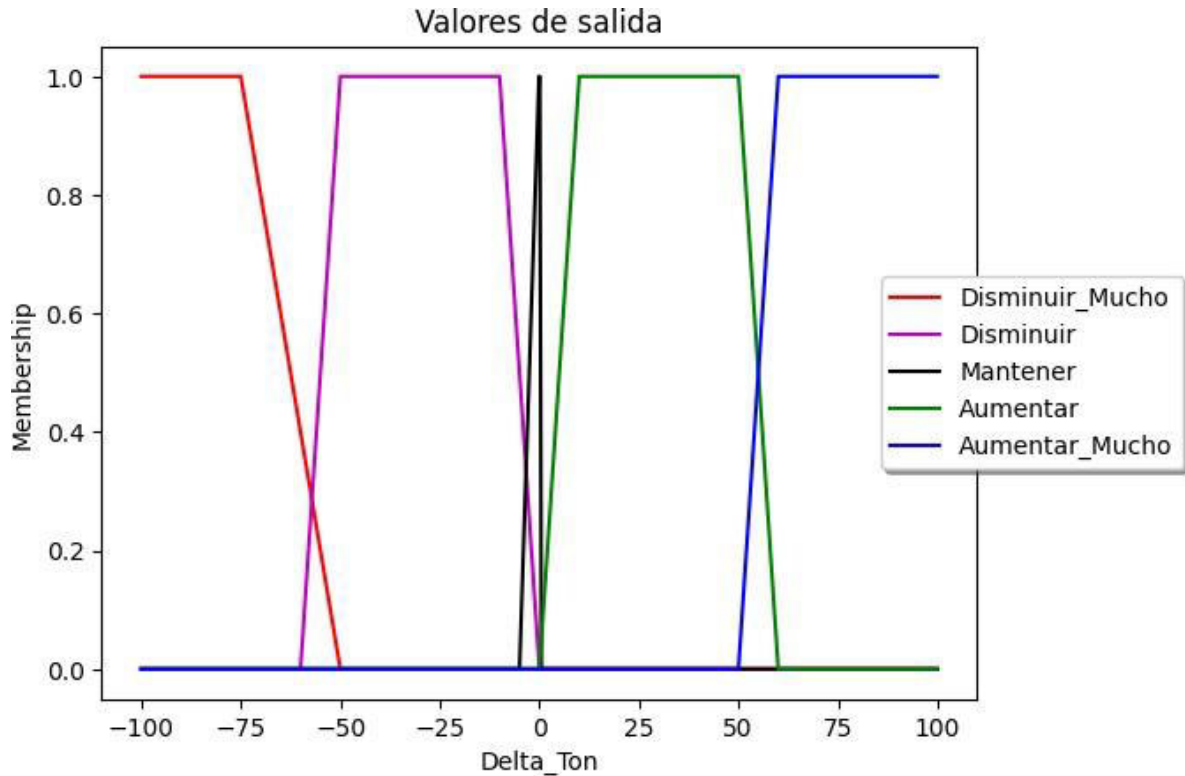
#### **5.3.6. Conversión de la Salida Difusa a una Respuesta Nítida (Defuzzificación)**

El FIS propuesto considera al método del Centroide, como método de defuzzificación, ya que según Singh y Ahmad (2020)<sup>16</sup>, este es uno de los métodos más ampliamente utilizados en el desarrollo de un FIS de tipo Mamdani.

Según se observa en la Figura 42, como conjuntos de salida, se tiene cinco rangos difusos validados por los operadores: disminuir, disminuir mucho, mantener, aumentar o aumentar mucho.

**Figura 42**

*Dufizificación de Delta\_Ton*



En lo que respecta a Disminuir Mucho, esta salida representa una disminución del tonelaje entre 50 t/h a 100 t/h, mientras que Disminuir, está asociada con una disminución del tonelaje más sutil que llega hasta los 60 t/h. En relación con Mantener, realmente no representa una disminución en el tonelaje, sin embargo, debido a la configuración del código utilizado, se le asignaron valores muy próximos a cero. Por otro lado, la salida Aumentar, está asociada un incremento de tonelaje que no supera los 60 t/h, mientras que, Aumentar Mucho, genera un incremento de tonelaje entre 50 t/h a 100 t/h.

Al igual que para las funciones de membresía, existen zonas comunes a los diferentes conjuntos difusos, intencionalmente se consideró que la zona “límite” tenga una holgura de 10 t/h para los valores máximos de cada rango.

Para construir procesos de defuzzificación en Python, es necesario utilizar el comando “engine\_output\_variables”. A continuación, se detalla el código utilizado la da defuzzificación de los valores de salida:

```
engine.output_variables = [  
    fl.OutputVariable(  
        name="Delta_Ton",  
        description="Delta de Tonelaje",  
        enabled=True,  
        minimum=-100.000,  
        maximum=100.000,  
        lock_range=False,  
        aggregation=fl.Maximum(),  
        defuzzifier=fl.Centroid(),  
        lock_previous=False,  
        terms=[  
            fl.Trapezoid("Disminuir_Mucho",  
                          -100, -100, -75, -50),  
            fl.Trapezoid("Disminuir",  
                          -60, -50, -10, 0),  
            fl.Trapezoid("Mantener",  
                          -0.5, -0.1, 0.1, 0.5),  
            fl.Trapezoid("Aumentar",  
                          0, 10, 50, 60),  
            fl.Trapezoid("Aumentar_Mucho",  
                          50, 60, 100, 100)  
        ]  
    )  
]
```

Asimismo, se detalla el código empleado para la visualización de los conjuntos difusos de salida:

```
x = np.arange(-100, 100, 0.1)

Disminuir_Mucho = fuzz.trapmf(x, [-100, -100, -75, -50])
Disminuir = fuzz.trapmf(x, [-60, -50, -10, 0])
Mantener = fuzz.trapmf(x, [-0.5, -0.1, 0.1, 0.5])
Aumentar = fuzz.trapmf(x, [0, 10, 50, 60])
Aumentar_Mucho = fuzz.trapmf(x, [50, 60, 100, 100])

plt.figure()

plt.plot(x, Disminuir_Mucho, 'r', linewidth = 1.5, label =
'Disminuir_Mucho')
plt.plot(x, Disminuir, 'm', linewidth = 1.5, label = 'Disminuir')
plt.plot(x, Mantener, 'k', linewidth = 1.5, label = 'Mantener')
plt.plot(x, Aumentar, 'g', linewidth = 1.5, label = 'Aumentar')
plt.plot(x, Aumentar_Mucho, 'b', linewidth = 1.5, label =
'Aumentar_Mucho')

plt.title('Valores de salida')
plt.ylabel('Membership')
plt.xlabel('Delta_Ton')

plt.legend(loc = 'center right', bbox_to_anchor = (1.25, 0.5), ncol = 1,
fancybox = True, shadow = True)
```

#### **5.4. Ejecución del Sistema de Inferencia Difusa (FIS)**

En la sección anterior se detalló el código generado para realizar la Fuzzificación, Reglas Difusas y Defuzzificación del conjunto de datos que ingresa al FIS. En esta sección, se mencionan algunos algoritmos adicionales que fueron desarrollados, con el propósito de facilitar las pruebas del FIS.

#### **5.4.1. Tiempo de Respuesta del Sistema de Inferencia Difusa (FIS)**

Es importante recalcar que para las pruebas con el Sistema de Inferencia Difuso se utilizó la base de datos (muestra) conformada por los 369,396 registros; correspondientes a previamente información filtrada.

De la base de datos mencionada, se utilizaron únicamente los datos relacionados al F80, Corr\_BMetso1, Corr\_BMetso2 y Corr\_ZAF. Y, si bien esos datos fueron medidos minuto a minuto, a sugerencia de los operadores, fue necesario incluir un tiempo de respuesta del FIS. Es decir, la cantidad de minutos que el FIS analiza la tendencia de las variables de entrada para poder tomar una decisión, ya que tomar decisiones minuto a minuto podría traer inestabilidad al proceso. Para esto, se consideró un tiempo de 10 minutos como plazo de análisis. Esto significa que los valores que ingresan al FIS son el promedio de los últimos 10 minutos. A continuación, se adjunta el código generado:

```
total_filas = len(df3)

filas_por_grupo = 10

resultado_lista = []

    for i in range(0, total_filas, filas_por_grupo):
        grupo = df3.iloc[i:i+filas_por_grupo]
        promedios_grupo = grupo.mean().to_dict()
        resultado_lista.append(promedios_grupo)

df4 = pd.concat([pd.Series(d) for d in resultado_lista], axis=1).T
```

#### **5.4.2. Ingreso y Salida de Valores en el Sistema de Inferencia Difusa (FIS)**

La librería “fuzzylite” utiliza el comando “engine.input\_variable” para ingreso de los valores de forma consecutiva a partir de vector de entrada. De la misma forma, utiliza el comando “engine.output\_variable” para devolver los valores defuzzificados en un vector de salida. A continuación, se adjunta el código generado para el ingreso y salida de valores.

```

engine.input_variable("F80").value = F80
engine.input_variable("Corr_BMetso1").value = Corr_M1
engine.input_variable("Corr_BMetso2").value = Corr_M2
engine.input_variable("Corr_BZAF").value = Corr_ZAF
engine.process()

Resultado_difuso = engine.output_variable("Delta_Ton").value
valores.append(Resultado_difuso)

fuzzy_array = np.array(valores)

df_delta_ton = pd.DataFrame(fuzzy_array, columns = ['Delta_Ton'])

df5 = df4

df5['Delta_Ton'] = df_delta_ton['Delta_Ton']

```

Como se mencionó en secciones anteriores, el valor de salida del FIS corresponde a un incremento o disminución de tonelaje, denominado Delta\_Ton. A continuación, se adjunta el código utilizado para calcular el “Tonelaje Sugerido” y el “Agua Sugerida” a partir de la relación S/L indicada por los operadores.

```

df_Tonf = pd.DataFrame(df5 ['Tonelaje'] + df5['Delta_Ton'], columns
= ['Tonelaje_Sugerido'])

df5['Tonelaje_Sugerido'] = df_Tonf['Tonelaje_Sugerido']

df5['Agua_Sugerida'] = df5['Tonelaje_Sugerido'] * 0.31

```

Asimismo, se adjunta el código empleado para el cálculo del tamaño P80 generado a partir del “Tonelaje Sugerido”, para esto se utiliza nuevamente el modelo de los Índices de Trabajo de Bond.

```

df5['P80_pred'] = 1/(((1000*df5['F80']) ** -0.5 +
(df5['Potencia']/df5['Tonelaje_Sugerido'])/(10*Wi)) ** 2)

```

**Tabla 14***Lista de Campos Presentes en la Tabla de Salida*

| Valores           |
|-------------------|
| Corr_M1           |
| Corr_M2           |
| Corr_ZAF          |
| F80               |
| Tonelaje          |
| Agua              |
| Potencia          |
| Presión_Carga     |
| Presión_Descarga  |
| W                 |
| P80               |
| Delta_Ton         |
| Tonelaje_Sugerido |
| Agua_Sugerida     |
| P80_pred          |

Finalmente, según se muestra en la Tabla 14, se añaden 4 campos adicionales: Delta\_Ton, Tonelaje\_Sugerido, Agua\_Sugerida y P80\_pred. Estos valores permiten realizar la comparación respectiva con el Tonelaje, Agua y P80 respectivamente.

#### **5.4.3. Impacto del FIS en los Valores Sugeridos**

En relación con el impacto del FIS en el tonelaje de alimentación al Metso1, se describe el algoritmo generado, en dónde la mejora en tonelaje es calculada mediante la resta del tonelaje sugerido y el tonelaje registrado. La hipótesis postulada sugiere que el FIS maximizará el tonelaje de alimentación, por ello, si la respuesta tiene signo positivo significa que el tonelaje incrementó, mientras que, si el signo es negativo significa que disminuyó.

```

Ton = df5_Ene_fino['Tonelaje'].mean()

Ton_sug = df5_Ene_fino['Tonelaje_Sugerido'].mean()

Impacto_Ton = (Ton_sug - Ton)/Ton * 100

Impacto_Ton

```

Con respecto al impacto del FIS en el caudal de agua que ingresa al Metso1, a continuación, se detalla el algoritmo generado, dónde el impacto es calculado mediante la resta del caudal de agua sugerido y el caudal de agua registrado en la base de datos. La hipótesis propuesta supone que el FIS minimizará el consumo de agua, por lo que el “Agua\_sug” deberá ser menor que el “Agua”, entonces, si el resultado tiene signo positivo significa que el consumo de agua aumentó, mientras que, si tiene signo negativo, hace referencia a un ahorro en el consumo de agua.

```
Agua = df5 ['Agua'].mean()

Agua_sug = df5 ['Agua_Sugerida'].mean()

Impacto_Agua = (Agua_sug - Agua)/Agua * 100

Impacto_Agua
```

Finalmente, el impacto del FIS en el tamaño de partícula P80 en la salida del Metso1 se calcula con el código adjunto. La hipótesis postulada supone que el FIS minimizará la variabilidad del P80, por lo que el “P80\_pred” deberá ser más pequeño que el “P80”. Entonces, si el resultado tiene signo positivo, significa que el FIS contribuyó a que sea más fino; mientras que, si es negativo, significa que engrosó el P80.

```
P80_Ene = df5_Ene_fino['P80'].mean()

P80_pred_Ene = df5_Ene_fino['P80_pred'].mean()

Impacto_P80_Ene_fino = (P80_Ene - P80_pred_Ene)/P80_Ene * 100

Impacto_P80_Ene_fino
```

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Impacto Mensual del FIS durante el 2023 (Simulado)

#### 6.1.1. Enero

Se observa que, en este mes, el tonelaje promedio de alimentación al molino primario fue de 475 t/h, con un consumo promedio de 184.19 m<sup>3</sup>/h y con una granulometría aproximada de 7.3mm. Según se observa en la Tabla 15, el FIS no sugirió mayores cambios en cuanto a la modificación el tonelaje, sin embargo, sugirió una disminución del caudal de agua 36.93 m<sup>3</sup>/h, generando un consumo promedio de 147.26 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 15**

*Impacto del FIS durante Enero*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 475.07          | -0.02            | 475.05                   | 184.19      | 147.26               | 7.30       | 521.30     | 521.93      |
| Min  | 400.53          | -80.56           | 372.40                   | 145.35      | 115.45               | 4.64       | 362.81     | 339.36      |
| Max  | 532.70          | 77.41            | 590.97                   | 269.92      | 183.20               | 11.28      | 662.95     | 707.31      |

Según lo propuesto por Modesto y Melo (2017)<sup>8</sup>, es posible maximizar la tasa de alimentación de mineral que ingresa a un molino, considerando como variable crítica el rango del tamaño de partícula. Con base en ese criterio, se analizará el efecto del FIS según los rangos de tamaño de partícula F80 del alimento, considerando un F80 fino, normal y grueso.

La Tabla 16, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 6.12 mm, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 14.57 t/h y garantizó un ahorro en consumo de agua de 24.9 m<sup>3</sup>/h, sin embargo, evidenció un engrosamiento del P80, llevándolo hasta 530 µm.

**Tabla 16**

*Impacto del FIS durante Enero cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 475.87          | 14.57            | 490.43                   | 176.83      | 152.03               | 6.12       | 506.89     | 530.42      |
| Min  | 400.53          | -80.56           | 373.54                   | 149.15      | 115.80               | 4.64       | 362.81     | 339.45      |
| Max  | 529.74          | 77.41            | 590.97                   | 210.35      | 183.20               | 6.50       | 621.12     | 699.51      |

Asimismo, la Tabla 17, muestra como en un escenario de mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.46 mm, el FIS no sugirió un incremento o disminución considerable en función al valor medido; sin embargo, garantizó un ahorro en consumo de agua de 39.09 m3/h, y, en relación con el P80, lo mantuvo casi constante.

**Tabla 17**

*Impacto del FIS durante Enero cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 474.03          | -0.87            | 473.16                   | 185.77      | 146.68               | 7.46       | 521.52     | 521.34      |
| Min  | 400.99          | -80.56           | 372.40                   | 145.35      | 115.45               | 6.50       | 372.51     | 339.36      |
| Max  | 532.70          | 30.00            | 559.97                   | 269.92      | 173.59               | 9.00       | 654.69     | 707.31      |

Finalmente, la Tabla 18, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 9.53 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 46.86 t/h, en promedio, y, aun así, garantizó un ahorro en consumo de agua de 50.64 m3/h. Según se observa, el FIS tiene un efecto en el tamaño del producto, ya que garantizó un tamaño de 496.36  $\mu$ m, en relación con los 578.12  $\mu$ m registrados.

**Tabla 18**

*Impacto del FIS durante Enero cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 489.61          | -46.86           | 442.75                   | 187.89      | 137.25               | 9.53       | 578.12     | 496.36      |
| Min  | 430.51          | -80.56           | 386.88                   | 153.42      | 119.93               | 9.00       | 478.29     | 405.60      |
| Max  | 512.47          | -30.00           | 482.29                   | 224.87      | 149.51               | 11.28      | 662.95     | 606.42      |

### **6.1.2. Febrero**

Durante este mes, el tonelaje promedio de alimentación al molino primario fue de 501.13 t/h, con un consumo promedio de 185.05 m3/h y con una granulometría aproximada de 7.02 mm. Según se observa en la Tabla 19, el FIS no sugirió mayores cambios en cuanto a la modificación el tonelaje, sin embargo, sugirió una disminución del caudal de agua 30.26 m3/h, generando un consumo promedio de 154.79 m3/h.

**Tabla 19***Impacto del FIS durante Febrero*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 501.13          | -1.84            | 499.31                   | 185.05      | 154.79               | 7.02       | 555.49     | 552.03      |
| Min  | 401.40          | -80.56           | 382.15                   | 157.20      | 118.47               | 4.62       | 367.99     | 368.72      |
| Max  | 549.27          | 77.41            | 610.11                   | 230.37      | 189.13               | 12.61      | 698.10     | 716.12      |

La Tabla 20, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 6.06 mm, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 21.77 t/h y garantizó un ahorro en consumo de agua de 19.34 m<sup>3</sup>/h, sin embargo, evidenció un engrosamiento del P80, llevándolo hasta 571.82 µm.

**Tabla 20***Impacto del FIS durante Febrero cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 503.21          | 21.77            | 525.05                   | 182.11      | 162.77               | 6.06       | 538.57     | 571.82      |
| Min  | 401.63          | -80.56           | 406.10                   | 157.20      | 125.89               | 4.62       | 367.99     | 368.72      |
| Max  | 536.23          | 77.41            | 610.11                   | 226.33      | 189.13               | 6.50       | 611.81     | 716.12      |

Asimismo, la Tabla 21, muestra como en un escenario de mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.25 mm, el FIS sugirió una disminución promedio de 11.66 t/h; sin embargo, garantizó un ahorro en consumo de agua de 34.8 m<sup>3</sup>/h, y, en relación con el P80, generó un tamaño de partícula más fino, garantizando 542.74 µm, en relación con los 560.69 µm registrados.

**Tabla 21***Impacto del FIS durante Febrero cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 500.56          | -11.66           | 488.90                   | 186.36      | 151.56               | 7.25       | 560.69     | 542.74      |
| Min  | 401.40          | -80.56           | 382.15                   | 157.39      | 118.47               | 6.50       | 387.88     | 377.12      |
| Max  | 549.27          | 30.00            | 579.27                   | 230.37      | 179.57               | 8.99       | 666.95     | 686.49      |

Finalmente, la Tabla 22, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 10.43 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 38.91 t/h, en promedio, y, aun así, garantizó un ahorro en consumo de agua de 47.54 m<sup>3</sup>/h. Según se

observa, el FIS tiene un efecto en el tamaño del producto, ya que, garantizó un tamaño de 532.84  $\mu\text{m}$ , en relación con los 602.65  $\mu\text{m}$  registrados.

**Tabla 22**

*Impacto del FIS durante Febrero cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 494.50          | -38.91           | 455.59                   | 188.77      | 141.23               | 10.43      | 602.65     | 532.84      |
| Min  | 442.24          | -80.56           | 412.24                   | 161.86      | 127.79               | 9.02       | 487.27     | 441.29      |
| Max  | 533.35          | -30.00           | 496.30                   | 226.83      | 153.85               | 12.61      | 698.10     | 612.19      |

### 6.1.3. Marzo

Durante este mes, el tonelaje promedio de alimentación al molino primario fue de 502.15 t/h, con un consumo promedio de 168.95 m<sup>3</sup>/h y con una granulometría aproximada de 7.14 mm. Según se observa en la Tabla 23, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 25.31 t/h, y, una disminución pequeña del caudal de agua de 5.44 m<sup>3</sup>/h, generando un consumo promedio de 163.95 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 23**

*Impacto del FIS durante Marzo*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 502.15          | 25.31            | 527.46                   | 168.95      | 163.51               | 7.14       | 559.93     | 599.47      |
| Min  | 401.30          | -80.56           | 373.43                   | 146.61      | 115.76               | 4.39       | 387.76     | 373.93      |
| Max  | 563.81          | 77.41            | 637.84                   | 195.02      | 197.73               | 12.02      | 703.42     | 738.91      |

La Tabla 24, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 5.97 mm, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 49.28 t/h y generó un incremento en el consumo de agua de 4.85 m<sup>3</sup>/h, y además, evidenció un engrosamiento del P80, llevándolo hasta 618.91  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 24**

*Impacto del FIS durante Marzo cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 504.90          | 49.28            | 554.18                   | 166.95      | 171.80               | 5.97       | 543.99     | 618.91      |
| Min  | 401.30          | -30.00           | 438.24                   | 146.61      | 135.85               | 4.39       | 387.76     | 459.29      |
| Max  | 561.28          | 77.41            | 637.84                   | 195.02      | 197.73               | 6.50       | 646.32     | 738.91      |

Asimismo, la Tabla 25, muestra como en un escenario de mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.39 mm, el FIS sugirió un incremento promedio de 20.66 t/h; y garantizó un leve ahorro en consumo de agua de 7.59 m<sup>3</sup>/h, y, en relación con el P80, generó un tamaño de partícula más grueso, llevándolo hasta 599.22  $\mu$ m.

**Tabla 25**

*Impacto del FIS durante Marzo cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 501.42          | 20.66            | 522.07                   | 169.43      | 161.84               | 7.39       | 564.67     | 599.22      |
| Min  | 402.77          | -69.78           | 387.55                   | 148.13      | 120.14               | 6.50       | 406.69     | 373.93      |
| Max  | 563.81          | 30.00            | 592.05                   | 190.89      | 183.54               | 9.00       | 703.42     | 737.20      |

Finalmente, la Tabla 26, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 9.8 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 32.11 t/h, en promedio, y, aun así, garantizó un ahorro en consumo de agua de 29.12 m<sup>3</sup>/h. Según se observa, el FIS tiene un efecto en el tamaño del producto, ya que, garantizó un tamaño de 532.85  $\mu$ m, en relación con los 588.74  $\mu$ m registrados.

**Tabla 26**

*Impacto del FIS durante Marzo cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 496.67          | -32.11           | 464.55                   | 173.13      | 144.01               | 9.80       | 588.74     | 532.85      |
| Min  | 403.43          | -80.56           | 373.43                   | 158.58      | 115.76               | 9.00       | 424.20     | 375.84      |
| Max  | 553.33          | -30.00           | 523.33                   | 190.22      | 162.23               | 12.02      | 685.05     | 633.31      |

#### **6.1.4. Abril**

Durante este mes, el tonelaje promedio de alimentación al molino primario fue de 498.47 t/h, con un consumo promedio de 188.67 m<sup>3</sup>/h y con una granulometría aproximada de 7.99 mm. Según se observa en la Tabla 27, el FIS sugirió un leve incremento de tonelaje de 3.63 t/h, y, una disminución del caudal de agua 33.02 m<sup>3</sup>/h, generando un consumo promedio de 155.65 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 27***Impacto del FIS durante Abril*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 498.47          | 3.63             | 502.09                   | 188.67      | 155.65               | 7.99       | 574.12     | 579.13      |
| Min  | 447.47          | -80.56           | 397.28                   | 159.28      | 123.16               | 4.47       | 473.47     | 387.95      |
| Max  | 544.85          | 77.41            | 579.61                   | 212.65      | 179.68               | 12.93      | 725.20     | 716.42      |

La Tabla 28, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 5.87 mm, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 34.01 t/h y garantizó un ahorro en consumo de agua de 23.85 m<sup>3</sup>/h, sin embargo, evidenció un engrosamiento del P80, llevándolo hasta 576.86  $\mu$ m.

**Tabla 28***Impacto del FIS durante Abril cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 492.21          | 34.01            | 525.90                   | 186.88      | 163.03               | 5.87       | 523.74     | 576.86      |
| Min  | 448.46          | -80.56           | 400.50                   | 159.28      | 124.16               | 4.47       | 473.47     | 387.95      |
| Max  | 532.53          | 77.41            | 579.61                   | 196.00      | 179.68               | 6.50       | 578.43     | 679.50      |

Asimismo, la Tabla 29, muestra como en un escenario de mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.53 mm, el FIS sugirió un incremento promedio de 11.36 t/h; y, garantizó un ahorro en consumo de agua de 31.77 m<sup>3</sup>/h, y, en relación con el P80, generó un tamaño de partícula más grueso, llevándolo hasta 586.15  $\mu$ m, en relación con los 566.16  $\mu$ m registrados.

**Tabla 29***Impacto del FIS durante Abril cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 496.07          | 11.36            | 507.41                   | 189.07      | 157.30               | 7.53       | 566.16     | 586.15      |
| Min  | 447.47          | -80.56           | 397.28                   | 159.34      | 123.16               | 6.50       | 486.88     | 391.29      |
| Max  | 544.85          | 30.00            | 574.85                   | 212.65      | 178.20               | 9.00       | 674.70     | 716.42      |

Finalmente, la Tabla 30, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 10.57 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 35.02 t/h, en promedio, y, aun así, garantizó un ahorro en consumo de agua de 42.34 m<sup>3</sup>/h. Según se

observa, el FIS tiene un efecto en el tamaño del producto, ya que, garantizó un tamaño de 565.21  $\mu\text{m}$ , en relación con los 629.03  $\mu\text{m}$  registrados.

**Tabla 30**

*Impacto del FIS durante Abril cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 508.44          | -35.02           | 473.42                   | 189.10      | 146.76               | 10.57      | 629.03     | 565.21      |
| Min  | 451.18          | -80.56           | 413.33                   | 179.31      | 128.13               | 9.01       | 515.88     | 442.46      |
| Max  | 543.65          | -30.00           | 513.65                   | 209.74      | 159.23               | 12.93      | 725.20     | 666.42      |

### 6.1.5. Mayo

En este mes, el tonelaje promedio de alimentación al molino primario fue de 532.63 t/h, con un consumo promedio de 176.29 m<sup>3</sup>/h y con una granulometría aproximada de 6.60 mm. Según se observa en la Tabla 31, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 15.16 t/h, y, una leve disminución en el caudal de agua de 6.48 m<sup>3</sup>/h, generando un consumo promedio de 169.81 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 31**

*Impacto del FIS durante Mayo*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 532.63          | 15.16            | 547.78                   | 176.29      | 169.81               | 6.60       | 592.57     | 615.66      |
| Min  | 446.56          | -80.56           | 369.70                   | 166.51      | 114.61               | 4.34       | 455.63     | 344.63      |
| Max  | 576.19          | 77.41            | 653.59                   | 274.76      | 202.61               | 11.38      | 731.94     | 762.15      |

La Tabla 32, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 5.84 mm, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 31.56 t/h, sin embargo, incrementó el consumo de agua en 2.88 m<sup>3</sup>/h, además, engrosó el P80, llevándolo hasta 636.31  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 32**

*Impacto del FIS durante Mayo cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 542.23          | 31.56            | 573.76                   | 174.99      | 177.87               | 5.84       | 588.49     | 636.31      |
| Min  | 446.56          | -80.56           | 369.70                   | 168.51      | 114.61               | 4.34       | 455.63     | 344.63      |
| Max  | 576.19          | 77.41            | 653.59                   | 274.76      | 202.61               | 6.50       | 668.59     | 762.15      |

Asimismo, la Tabla 33, muestra como en un escenario de mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.28 mm, el FIS no sugirió un incremento o disminución considerable; y,

garantizó un ahorro en consumo de agua de 15.3 m<sup>3</sup>/h, y, en relación con el P80, no evidenció una variación considerable.

**Tabla 33**

*Impacto del FIS durante Mayo cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 523.38          | 0.82             | 524.21                   | 177.80      | 162.50               | 7.28       | 596.04     | 598.35      |
| Min  | 447.16          | -80.56           | 407.61                   | 166.51      | 126.36               | 6.50       | 459.92     | 418.94      |
| Max  | 576.04          | 30.00            | 604.81                   | 220.85      | 187.49               | 9.00       | 717.17     | 761.90      |

Finalmente, la Tabla 34, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 9.76 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 56.93 t/h, en promedio, y, aun así, garantizó un ahorro en consumo de agua de 36.33 m<sup>3</sup>/h. También influyó en el tamaño del producto, ya que, garantizó un tamaño de 511.60  $\mu$ m, en relación con los 612.13  $\mu$ m registrados.

**Tabla 34**

*Impacto del FIS durante Mayo cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 505.48          | -56.93           | 448.56                   | 175.38      | 139.05               | 9.76       | 612.13     | 511.60      |
| Min  | 486.70          | -80.56           | 406.14                   | 168.68      | 125.90               | 9.01       | 566.85     | 431.66      |
| Max  | 571.85          | -30.00           | 541.85                   | 191.20      | 167.97               | 11.38      | 731.94     | 682.28      |

#### 6.1.6. Junio

En este mes, el tonelaje promedio de alimentación al molino primario fue de 503.51 t/h, con un consumo promedio de 183.52 m<sup>3</sup>/h y con una granulometría aproximada de 7.03 mm. Según se observa en la Tabla 35, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 16.43 t/h, y, una disminución en el caudal de agua de 22.32 m<sup>3</sup>/h, generando un consumo promedio de 161.20 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 35**

*Impacto del FIS durante Junio*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 503.51          | 16.43            | 519.99                   | 183.52      | 161.20               | 7.03       | 549.11     | 575.04      |
| Min  | 402.26          | -80.56           | 332.78                   | 158.60      | 103.16               | 4.53       | 395.02     | 308.37      |
| Max  | 569.90          | 77.41            | 630.08                   | 222.25      | 195.33               | 12.28      | 685.73     | 730.92      |

La Tabla 36, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 6.02 mm, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 36.55 t/h, y garantizó un ahorro en el consumo de agua de 13.02 m3/h, además, engrosó el P80, llevándolo hasta 596.48  $\mu$ m.

**Tabla 36**

*Impacto del FIS durante Junio cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 511.82          | 36.55            | 548.37                   | 183.01      | 169.99               | 6.02       | 541.10     | 596.48      |
| Min  | 439.58          | -80.56           | 449.87                   | 159.69      | 139.46               | 4.53       | 435.62     | 446.80      |
| Max  | 553.50          | 77.41            | 630.08                   | 221.01      | 195.33               | 6.50       | 631.54     | 730.92      |

Asimismo, la Tabla 37, muestra como cuando hay mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.30 mm, el FIS sugirió un incremento de 11.53 t/h sobre el tonelaje registrado; y, garantizó un ahorro en consumo de agua de 24.97 m3/h, y, en relación con el P80, engrosó el tamaño de salida, llevándolo hasta 569.77  $\mu$ m, en relación, con las 550.28  $\mu$ m registradas.

**Tabla 37**

*Impacto del FIS durante Junio cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 500.28          | 11.53            | 511.87                   | 183.65      | 158.68               | 7.30       | 550.28     | 569.77      |
| Min  | 402.26          | -80.56           | 332.78                   | 158.60      | 103.16               | 6.50       | 395.02     | 308.37      |
| Max  | 569.90          | 30.00            | 585.92                   | 222.25      | 181.64               | 8.98       | 675.71     | 706.89      |

Finalmente, la Tabla 38, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 9.83 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 47.85 t/h, en promedio, y, aun así, garantizó un ahorro en consumo de agua de 44.42 m3/h. También influyó en el tamaño del producto, ya que, garantizó un tamaño de 507.60  $\mu$ m, en relación con las 590.26  $\mu$ m registradas.

**Tabla 38**

*Impacto del FIS durante Junio cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 501.38          | -47.85           | 453.52                   | 185.01      | 140.59               | 9.83       | 590.26     | 507.60      |
| Min  | 448.45          | -80.56           | 385.92                   | 167.06      | 119.64               | 9.00       | 489.84     | 394.93      |
| Max  | 551.33          | -30.00           | 519.34                   | 220.67      | 160.99               | 12.28      | 685.73     | 631.30      |

### 6.1.7. Julio

Durante este mes, el tonelaje promedio de alimentación al molino primario fue de 497.03 t/h, con un consumo promedio de 181.67 m<sup>3</sup>/h y con una granulometría aproximada de 7.18 mm. Según se observa en la Tabla 39, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 20.97 t/h, y, una disminución en el caudal de agua de 21.09 m<sup>3</sup>/h, generando un consumo promedio de 160.58 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 39**

*Impacto del FIS durante Julio*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 497.03          | 20.97            | 518.01                   | 181.67      | 160.58               | 7.18       | 537.05     | 570.49      |
| Min  | 401.85          | -80.56           | 369.02                   | 168.13      | 114.40               | 5.01       | 368.71     | 352.37      |
| Max  | 557.24          | 77.41            | 613.22                   | 203.30      | 190.10               | 11.59      | 675.30     | 727.00      |

La Tabla 40, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 6.16 mm, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 45.74 t/h, y garantizó un ahorro en el consumo de agua de 11.48 m<sup>3</sup>/h, sin embargo, engrosó el P80, llevándolo hasta 598.58 µm.

**Tabla 40**

*Impacto del FIS durante Julio cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 501.06          | 45.74            | 546.80                   | 180.99      | 169.51               | 6.16       | 528.80     | 598.58      |
| Min  | 448.31          | -80.44           | 428.48                   | 168.13      | 132.83               | 5.01       | 413.72     | 419.18      |
| Max  | 537.13          | 77.41            | 613.22                   | 203.30      | 190.10               | 6.50       | 611.89     | 715.96      |

Asimismo, la Tabla 41, muestra como en un escenario de mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.33 mm, el FIS sugirió un incremento de 17.56 t/h sobre el tonelaje registrado; y, garantizó un ahorro en consumo de agua de 22.15 m<sup>3</sup>/h, y, en relación con el P80, engrosó el tamaño de salida, llevándolo hasta 567.16 µm, en relación, con las 538.35 µm registradas.

**Tabla 41***Impacto del FIS durante Julio cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 496.53          | 17.56            | 514.10                   | 181.52      | 159.37               | 7.33       | 538.35     | 567.16      |
| Min  | 401.85          | -80.56           | 388.94                   | 168.17      | 120.57               | 6.50       | 368.71     | 378.67      |
| Max  | 557.24          | 30.00            | 587.24                   | 202.03      | 182.04               | 8.99       | 668.98     | 727.00      |

Finalmente, la Tabla 42, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 9.61 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 37.38 t/h, en promedio, y, aun así, garantizó un ahorro en consumo de agua de 50.78 m<sup>3</sup>/h. También influyó en el tamaño del producto, ya que, garantizó un tamaño de 489.42  $\mu$ m, en relación con las 551.81  $\mu$ m registradas.

**Tabla 42***Impacto del FIS durante Julio cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 485.95          | -37.38           | 448.56                   | 189.83      | 139.05               | 9.61       | 551.81     | 489.42      |
| Min  | 402.40          | -80.56           | 369.02                   | 168.94      | 114.40               | 9.01       | 398.30     | 352.37      |
| Max  | 542.27          | -30.00           | 512.27                   | 201.78      | 158.80               | 11.59      | 675.30     | 620.69      |

**6.1.8. Agosto**

Durante este mes, el tonelaje promedio de alimentación al molino primario fue de 545.09 t/h, con un consumo promedio de 175.2 m<sup>3</sup>/h y con una granulometría aproximada de 7.37 mm. Según se observa en la Tabla 43, el FIS sugirió una disminución promedio de tonelaje de 10.44 t/h, y, una leve disminución en el caudal de agua de 9.47 m<sup>3</sup>/h, generando un consumo promedio de 165.78 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 43***Impacto de FIS durante Agosto*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 545.09          | -10.44           | 534.77                   | 175.25      | 165.78               | 7.37       | 620.09     | 603.43      |
| Min  | 403.23          | -80.56           | 364.56                   | 136.20      | 113.01               | 4.52       | 382.11     | 349.72      |
| Max  | 620.98          | 77.41            | 679.75                   | 240.86      | 210.72               | 11.99      | 778.03     | 830.66      |

La Tabla 44, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 6.11 mm, el FIS sugirió un leve incremento de tonelaje de 5.09 t/h, y un leve incremento

en el consumo de agua de 1.16 m<sup>3</sup>/h, además, engrosó levemente el P80, llevándolo hasta 606.69 µm.

**Tabla 44**

*Impacto del FIS durante Agosto cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 549.64          | 5.09             | 555.06                   | 170.91      | 172.07               | 6.11       | 597.49     | 606.69      |
| Min  | 417.11          | -80.56           | 418.88                   | 150.30      | 129.85               | 4.52       | 397.54     | 398.77      |
| Max  | 610.61          | 77.41            | 679.75                   | 210.78      | 210.72               | 6.50       | 686.69     | 776.38      |

Asimismo, la Tabla 45, muestra como en un escenario de mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.39 mm, el FIS sugirió una disminución promedio de 9.58 t/h sobre el tonelaje registrado; y, garantizó un leve ahorro en consumo de agua de 8.88 m<sup>3</sup>/h, y, en relación con el P80, disminuyó el tamaño de salida, llevándolo hasta 610.41 µm, en relación, con las 624.95 µm registradas.

**Tabla 45**

*Impacto del FIS durante Agosto cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 546.71          | -9.58            | 537.22                   | 175.42      | 166.54               | 7.39       | 624.95     | 610.41      |
| Min  | 403.23          | -80.56           | 411.59                   | 137.79      | 127.59               | 6.50       | 382.11     | 397.25      |
| Max  | 620.98          | 30.00            | 650.62                   | 240.86      | 201.69               | 9.00       | 778.03     | 830.66      |

Finalmente, la Tabla 46, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 9.92 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 51.38 t/h, en promedio, y garantizó un ahorro en consumo de agua de 37.54 m<sup>3</sup>/h. También influyó en el tamaño del producto, ya que, garantizó un tamaño de 540.07 µm, en relación con las 630.48 µm registradas.

**Tabla 46**

*Impacto del FIS durante Agosto cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 522.04          | -51.38           | 470.65                   | 183.44      | 145.90               | 9.92       | 630.48     | 540.07      |
| Min  | 444.38          | -80.56           | 364.56                   | 136.20      | 113.01               | 9.01       | 469.32     | 349.72      |
| Max  | 594.86          | -30.00           | 564.86                   | 211.87      | 175.11               | 11.99      | 768.51     | 710.67      |

### 6.1.9. Septiembre

Durante este mes, el tonelaje promedio de alimentación al molino primario fue de 537.66 t/h, con un consumo promedio de 171.43 m<sup>3</sup>/h y con una granulometría aproximada de 8.17 mm. Según se observa en la Tabla 47, el FIS sugirió una disminución promedio de tonelaje de 13.04 t/h, y, una leve disminución en el caudal de agua de 8.79 m<sup>3</sup>/h, generando un consumo promedio de 162.64 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 47**

*Impacto del FIS durante Septiembre*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 537.66          | -13.04           | 524.64                   | 171.43      | 162.64               | 8.17       | 635.13     | 612.37      |
| Min  | 420.12          | -80.56           | 388.23                   | 135.07      | 120.35               | 4.85       | 429.70     | 390.05      |
| Max  | 591.27          | 77.41            | 648.07                   | 236.03      | 200.90               | 12.57      | 808.90     | 788.73      |

La Tabla 48, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 6.16 mm, el FIS sugirió un leve incremento de tonelaje de 40.24 t/h, y un incremento en el consumo de agua de 4.73 m<sup>3</sup>/h, además, engrosó levemente el P80, llevándolo hasta 662.39  $\mu$ m.

**Tabla 48**

*Impacto del FIS durante Septiembre cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 545.87          | 40.24            | 586.11                   | 176.96      | 181.69               | 6.16       | 600.36     | 662.39      |
| Min  | 479.58          | -80.22           | 450.02                   | 143.75      | 139.51               | 4.85       | 499.44     | 464.09      |
| Max  | 579.98          | 77.41            | 648.07                   | 215.40      | 200.90               | 6.50       | 652.53     | 744.71      |

Asimismo, la Tabla 49, muestra como en un escenario de mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.85 mm, el FIS sugirió una leve disminución promedio de 7.20 t/h sobre el tonelaje registrado; y, garantizó un leve ahorro en consumo de agua de 6.71 m<sup>3</sup>/h, y, en relación con el P80, disminuyó el tamaño de salida, llevándolo hasta 616.75  $\mu$ m, en relación, con las 628.08  $\mu$ m registradas.

**Tabla 49***Impacto del FIS durante Septiembre cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 537.00          | -7.20            | 529.82                   | 170.95      | 164.24               | 7.85       | 628.08     | 616.75      |
| Min  | 420.12          | -80.56           | 388.23                   | 135.07      | 120.35               | 6.50       | 429.70     | 390.05      |
| Max  | 591.27          | 30.00            | 619.05                   | 236.03      | 191.91               | 9.00       | 747.62     | 788.73      |

Finalmente, la Tabla 50, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 9.85 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 48.10 t/h, en promedio, y garantizó un ahorro en consumo de agua de 20.05 m<sup>3</sup>/h. También influyó en el tamaño del producto, ya que, garantizó un tamaño de 583.71  $\mu$ m, en relación con las 670.61  $\mu$ m registradas.

**Tabla 50***Impacto del FIS durante Septiembre cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 538.32          | -48.10           | 490.22                   | 172.02      | 151.97               | 9.85       | 670.61     | 583.71      |
| Min  | 448.62          | -80.56           | 415.68                   | 135.81      | 128.86               | 9.00       | 496.48     | 427.07      |
| Max  | 590.48          | -30.00           | 560.48                   | 226.65      | 173.75               | 12.57      | 808.90     | 737.32      |

**6.1.10. Octubre**

Durante este mes, el tonelaje promedio de alimentación al molino primario fue de 540.49 t/h, con un consumo promedio de 177.26 m<sup>3</sup>/h y con una granulometría aproximada de 7.66 mm. Según se observa en la Tabla 51, el FIS sugirió no sugirió mayores cambios respecto al tonelaje, sin embargo, generó una leve disminución en el caudal de agua de 9.61 m<sup>3</sup>/h, generando un consumo promedio de 167.65 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 51***Impacto del FIS durante Octubre*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 540.49          | 0.45             | 540.81                   | 177.26      | 167.65               | 7.66       | 626.57     | 626.33      |
| Min  | 400.85          | -80.56           | 371.34                   | 135.62      | 115.11               | 4.72       | 374.94     | 342.26      |
| Max  | 642.65          | 77.41            | 707.89                   | 305.36      | 219.45               | 12.21      | 899.72     | 909.53      |

La Tabla 52, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 6.10 mm, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 21.13 t/h, y un leve incremento en el consumo de agua de 2.01 m<sup>3</sup>/h, además, engrosó el P80, llevándolo hasta 662.93  $\mu$ m.

**Tabla 52**

*Impacto del FIS durante Octubre cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 561.10          | 21.13            | 582.23                   | 178.48      | 180.49               | 6.10       | 630.72     | 662.93      |
| Min  | 448.11          | -80.56           | 477.73                   | 137.55      | 148.10               | 4.72       | 424.31     | 487.86      |
| Max  | 642.17          | 77.41            | 707.89                   | 305.36      | 219.45               | 6.50       | 799.87     | 895.24      |

Asimismo, la Tabla 53, muestra como en un escenario de mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.59 mm, el FIS sugirió un leve incremento de 4.47 t/h sobre el tonelaje registrado; y, garantizó un leve ahorro en consumo de agua de 8.27 m<sup>3</sup>/h, sin embargo, engrosó el P80 llevándolo hasta 641.48  $\mu$ m, en relación, con las 634.47  $\mu$ m registradas.

**Tabla 53**

*Impacto del FIS durante Octubre cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 544.52          | 4.47             | 548.83                   | 178.41      | 170.14               | 7.49       | 634.47     | 641.48      |
| Min  | 400.85          | -80.56           | 375.09                   | 135.62      | 116.28               | 6.50       | 374.94     | 352.76      |
| Max  | 642.65          | 30.00            | 662.25                   | 305.35      | 205.30               | 9.00       | 899.72     | 909.53      |

Finalmente, la Tabla 54, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 9.84 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 37.77 t/h, en promedio, y garantizó un ahorro en consumo de agua de 26.29 m<sup>3</sup>/h. También influyó en el tamaño del producto, ya que, garantizó un tamaño de 517.21  $\mu$ m, en relación con las 582.16  $\mu$ m registradas.

**Tabla 54**

*Impacto del FIS durante Octubre cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 502.23          | -37.77           | 464.40                   | 170.25      | 143.96               | 9.84       | 582.16     | 517.21      |
| Min  | 401.34          | -80.56           | 371.34                   | 138.01      | 115.11               | 9.00       | 387.44     | 342.26      |
| Max  | 604.95          | -30.00           | 574.95                   | 247.28      | 178.24               | 12.21      | 839.80     | 784.54      |

### 6.1.11. Noviembre

Durante este mes, el tonelaje promedio de alimentación fue de 531.18 t/h, con un consumo promedio de 166.74 m<sup>3</sup>/h y con una granulometría aproximada de 7.59 mm. Según se observa en la Tabla 55, el FIS sugirió una leve disminución de 2.88 t/h, y también generó una leve disminución en el caudal de agua de 2.94 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 55**

*Impacto del FIS durante Noviembre*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 531.18          | -2.88            | 528.38                   | 166.74      | 163.80               | 7.59       | 628.36     | 623.24      |
| Min  | 445.97          | -80.56           | 410.76                   | 146.93      | 127.34               | 4.73       | 438.15     | 415.33      |
| Max  | 661.17          | 77.41            | 736.29                   | 208.95      | 228.25               | 11.51      | 829.64     | 877.62      |

La Tabla 56, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 6.17 mm, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 19.18 t/h, y un leve incremento en el consumo de agua de 7.23 m<sup>3</sup>/h, además, engrosó el P80, llevándolo hasta 628.56  $\mu$ m.

**Tabla 56**

*Impacto del FIS durante Noviembre cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 535.49          | 19.18            | 554.49                   | 164.66      | 171.89               | 6.17       | 599.34     | 628.56      |
| Min  | 448.29          | -80.56           | 419.63                   | 147.55      | 130.09               | 4.73       | 438.15     | 415.33      |
| Max  | 661.17          | 77.41            | 736.29                   | 183.42      | 228.25               | 6.50       | 829.64     | 877.62      |

Asimismo, la Tabla 57, muestra como cuando hubo mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.61 mm, el FIS sugirió una leve disminución de 1.62 t/h; y, garantizó un leve ahorro en consumo de agua de 2.78 m<sup>3</sup>/h, además de disminuir levemente el tamaño del P80 llevándolo hasta 627.73  $\mu$ m, respecto a las 629.87  $\mu$ m registradas.

**Tabla 57**

*Impacto del FIS durante Noviembre cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 531.07          | -1.62            | 529.56                   | 166.94      | 164.16               | 7.61       | 629.87     | 627.73      |
| Min  | 445.97          | -80.56           | 410.76                   | 146.93      | 127.34               | 6.50       | 472.78     | 445.47      |
| Max  | 619.23          | 30.00            | 649.23                   | 208.95      | 201.26               | 9.00       | 813.88     | 868.95      |

Finalmente, la Tabla 58, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 9.51 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 50.27 t/h y garantizó un ahorro en consumo de agua de 20.04 m<sup>3</sup>/h. También influyó en el tamaño del producto, ya que, garantizó un tamaño de 564.17  $\mu$ m, en relación con las 654.47  $\mu$ m registradas.

**Tabla 58**

*Impacto del FIS durante Noviembre cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 525.96          | -50.27           | 475.89                   | 167.57      | 147.53               | 9.51       | 654.47     | 564.17      |
| Min  | 451.27          | -80.56           | 417.49                   | 155.72      | 129.42               | 9.00       | 518.88     | 450.10      |
| Max  | 612.49          | -30.00           | 582.49                   | 182.85      | 180.57               | 11.51      | 821.28     | 765.21      |

#### **6.1.12. Diciembre**

Durante este mes, el tonelaje promedio de alimentación al molino primario fue de 516.29 t/h, con un consumo promedio de 159.53 m<sup>3</sup>/h y con una granulometría aproximada de 7.50 mm. Según se observa en la Tabla 59, el FIS no sugirió cambios relevantes respecto al tonelaje o al caudal de agua, y mantuvo un caudal de 159.53 m<sup>3</sup>/h en promedio.

**Tabla 59**

*Impacto del FIS durante Diciembre*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 516.29          | 0.18             | 516.50                   | 159.53      | 160.12               | 7.50       | 571.64     | 570.14      |
| Min  | 401.43          | -80.56           | 371.78                   | 137.36      | 115.25               | 3.85       | 384.93     | 361.14      |
| Max  | 602.11          | 77.41            | 648.42                   | 186.26      | 201.01               | 11.96      | 802.97     | 750.78      |

La Tabla 60, muestra como en un escenario de mineral “fino”, con un F80 promedio de 5.99 mm, el FIS sugirió un incremento de tonelaje de 32.11 t/h, y un incremento en el consumo de agua de 10.31 m<sup>3</sup>/h, además, engrosó el P80, llevándolo hasta 594.65  $\mu$ m.

**Tabla 60**

*Impacto del FIS durante Diciembre cuando el Mineral tenía un F80 Fino*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 521.99          | 32.11            | 554.13                   | 160.97      | 171.78               | 5.99       | 547.93     | 594.65      |
| Min  | 420.56          | -30.35           | 419.13                   | 138.95      | 129.93               | 3.85       | 386.98     | 398.02      |
| Max  | 574.42          | 77.41            | 648.42                   | 186.26      | 201.01               | 6.50       | 652.56     | 748.19      |

Asimismo, la Tabla 61, muestra como en un escenario de mineral “normal”, con un F80 promedio de 7.56 mm, el FIS no sugirió mayores cambios respecto al tonelaje o al consumo de agua, y además mantuvo casi el mismo tamaño P80 en el producto.

**Tabla 61**

*Impacto del FIS durante Diciembre cuando el Mineral tenía un F80 Normal*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 513.21          | 0.12             | 513.32                   | 159.07      | 159.13               | 7.56       | 568.28     | 568.39      |
| Min  | 401.43          | -80.56           | 374.05                   | 137.36      | 115.96               | 6.50       | 384.93     | 361.14      |
| Max  | 576.30          | 30.00            | 604.95                   | 179.14      | 187.53               | 9.00       | 698.37     | 750.78      |

Finalmente, la Tabla 62, muestra como en un escenario de mineral “grueso”, con un F80 promedio de 9.76 mm, el FIS sugirió una disminución de tonelaje de 57.93 t/h y garantizó un ahorro en consumo de agua de 13.95 m<sup>3</sup>/h. También influyó en el tamaño del producto, ya que, garantizó un tamaño de 539.14 µm, en relación con las 640.54 µm registradas.

**Tabla 62**

*Impacto del FIS durante Diciembre cuando el Mineral tenía un F80 Grueso*

|      | <i>Tonelaje</i> | <i>Delta Ton</i> | <i>Tonelaje Sugerido</i> | <i>Agua</i> | <i>Agua Sugerida</i> | <i>F80</i> | <i>P80</i> | <i>P80*</i> |
|------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| Prom | 530.19          | -57.93           | 472.86                   | 160.54      | 146.59               | 9.76       | 640.54     | 539.14      |
| Min  | 411.23          | -80.56           | 371.78                   | 142.43      | 115.25               | 9.00       | 430.57     | 377.63      |
| Max  | 602.11          | -30.00           | 570.36                   | 185.64      | 176.81               | 11.96      | 802.97     | 744.93      |

## 6.2. Contrastación de las Hipótesis Específicas

Es importante considerar que según el diagrama de flujo del proceso de la unidad minera (Figura 28), el flujo de mineral procesado en molienda primaria está determinado por:

$$\text{Mineral Procesado}_{\text{Molienda primaria}} = \text{Mineral alimentado}_{\text{Metso 1}}$$

Asimismo, el flujo de agua consumida en molienda primaria está determinado por:

$$\text{Agua consumida}_{\text{Molienda primaria}} = \text{Agua consumida}_{\text{Metso 1}}$$

$$\text{Agua consumida}_{\text{Metso 1}} = \text{Agua}_{\text{alimentación}} + \text{Agua}_{\text{dilución}}$$

Respecto al molino Metso 1, el agua consumida total consiste en el agua que ingresa en el alimento y en el agua añadida a la salida del molino.

Con respecto al FIS propuesto, este impacta directa y únicamente en el agua consumida en la alimentación al Metso 1, entonces, sí tiene un impacto en el flujo de agua consumida en la molienda primaria de la unidad minera.

#### **6.2.1. Contrastación de la Hipótesis Específica 1**

La investigación formuló la hipótesis: “El FIS permitirá maximizar el tonelaje procesado en la molienda primaria de la U.M”.

Al respecto, la investigación determinó que el FIS sí maximiza el flujo de mineral procesado en molienda primaria, sin embargo, esto ocurre principalmente cuando el F80 del mineral alimentado es “fino”, según se observa en la Tabla 63. En este escenario, el FIS sugirió aumentar en promedio 29.27 t/h la cantidad de mineral alimentado al Metso 1, generando una alimentación promedio de 549.71 t/h, en comparación a las 520.45 t/h registradas.

**Tabla 63**

*Impacto Promedio en el Tonelaje cuando Ingresas Mineral Fino*

| <b>Mes</b> | <b><i>Tonelaje</i></b> | <b><i>Delta Ton</i></b> | <b><i>Tonelaje Sugerido</i></b> |
|------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Enero      | 475.87                 | 14.57                   | 490.43                          |
| Febrero    | 503.21                 | 21.77                   | 525.05                          |
| Marzo      | 504.9                  | 49.28                   | 554.18                          |
| Abril      | 492.21                 | 34.01                   | 525.9                           |
| Mayo       | 542.23                 | 31.56                   | 573.76                          |
| Junio      | 511.82                 | 36.55                   | 548.37                          |
| Julio      | 501.06                 | 45.74                   | 546.8                           |
| Agosto     | 549.64                 | 5.09                    | 555.06                          |
| Septiembre | 545.87                 | 40.24                   | 586.11                          |
| Octubre    | 561.1                  | 21.13                   | 582.23                          |
| Noviembre  | 535.49                 | 19.18                   | 554.49                          |
| Diciembre  | 521.99                 | 32.11                   | 554.13                          |
| Promedio   | 520.45                 | 29.27                   | 549.71                          |

**Figura 43**

*Comparación entre el Tonelaje Registrado y el Tonelaje Sugerido cuando el Mineral es Fino*

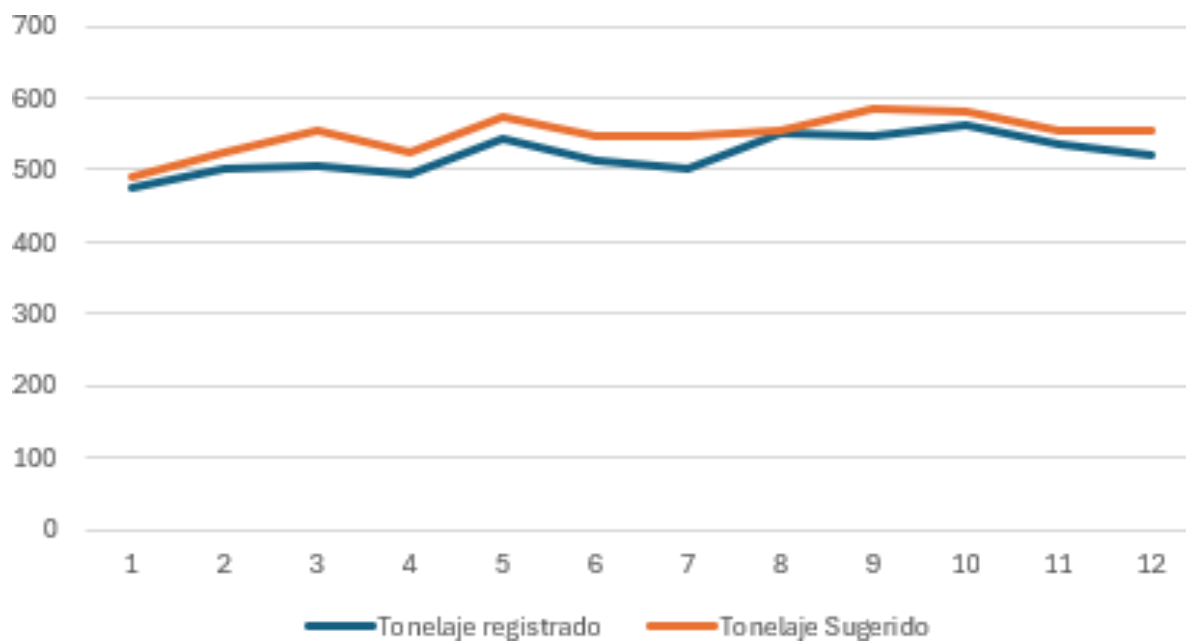
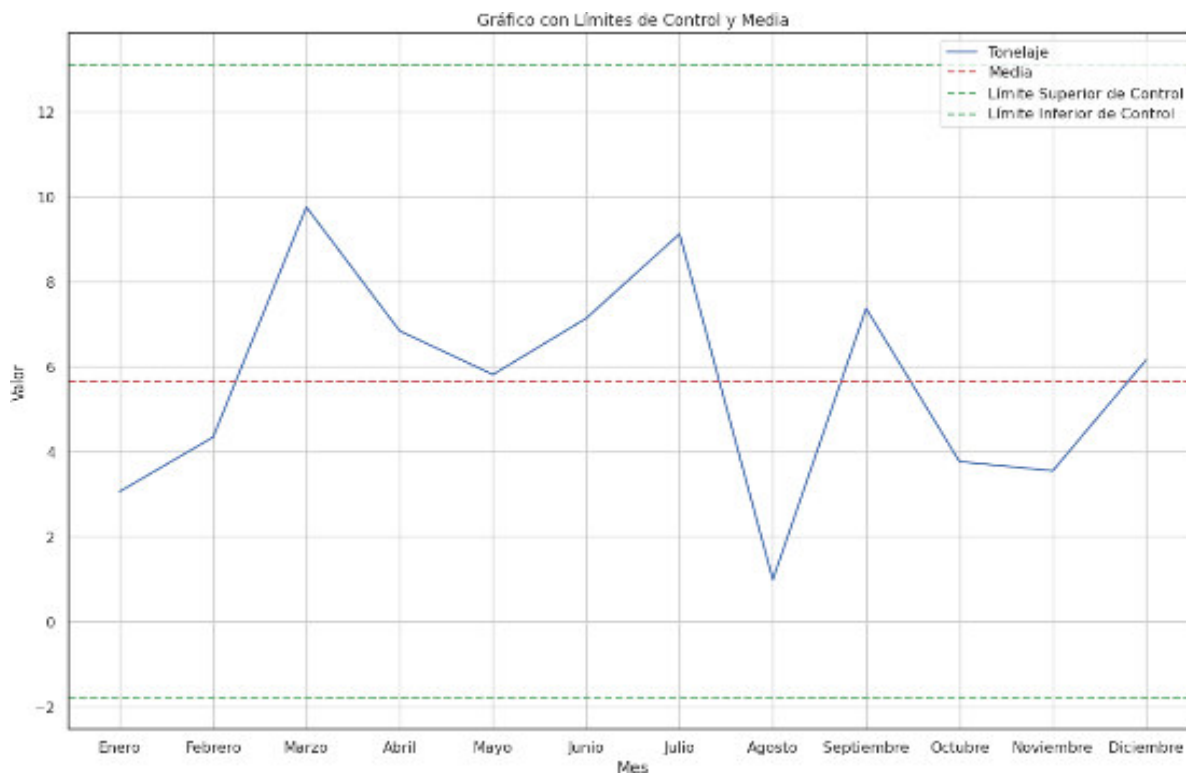


**Figura 44**

*Impacto Porcentual del FIS en el Tonelaje cuando el Mineral es Fino*



En la Figura 43, se observa que, durante todos los meses del 2023, la respuesta del FIS siempre fue aumentar el tonelaje de alimentación, llegando a aumentar hasta 45.74 t/h en los escenarios más favorables. En la Figura 40, se observa también, que la línea de color anaranjada, que indica el tonelaje sugerido (simulado por el FIS), siempre se mantuvo por encima de la de color azul, que indica el tonelaje de alimentación al Metso 1 que realmente se registró durante ese periodo.

Asimismo, la Figura 44 muestra el impacto porcentual del FIS respecto al flujo de mineral procesado, se observa una mejora promedio del 5.66%.

La maximización de tonelaje también ocurre, pero en menor medida, cuando el F80 se encuentra en un rango “normal”. Según se observa en la Tabla 64, el FIS propuesto solo sugirió aumentar, en promedio 2.97 t/h, generando una alimentación promedio de 516.71 t/h, en comparación a las 513.73 t/h registradas.

**Tabla 64**

*Impacto Promedio en el Tonelaje cuando Ingresa Mineral Normal*

| Mes        | Tonelaje | Delta Ton | Tonelaje Sugerido |
|------------|----------|-----------|-------------------|
| Enero      | 474.03   | -0.87     | 473.16            |
| Febrero    | 500.56   | -11.66    | 488.9             |
| Marzo      | 501.42   | 20.66     | 522.07            |
| Abril      | 496.07   | 11.36     | 507.41            |
| Mayo       | 523.38   | 0.82      | 524.21            |
| Junio      | 500.28   | 11.53     | 511.87            |
| Julio      | 496.53   | 17.56     | 514.1             |
| Agosto     | 546.71   | -9.58     | 537.22            |
| Septiembre | 537      | -7.2      | 529.82            |
| Octubre    | 544.52   | 4.47      | 548.83            |
| Noviembre  | 531.07   | -1.62     | 529.56            |
| Diciembre  | 513.21   | 0.12      | 513.32            |
| Promedio   | 513.73   | 2.97      | 516.71            |

**Figura 45**

*Comparación entre el Tonelaje Registrado y el Tonelaje Sugerido cuando el Mineral es Normal*

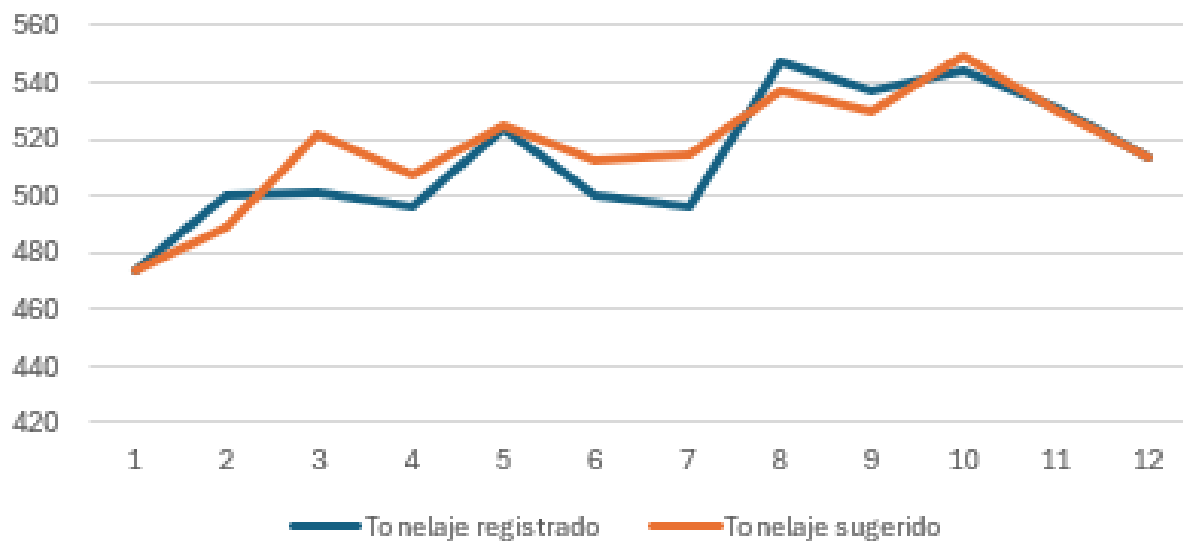
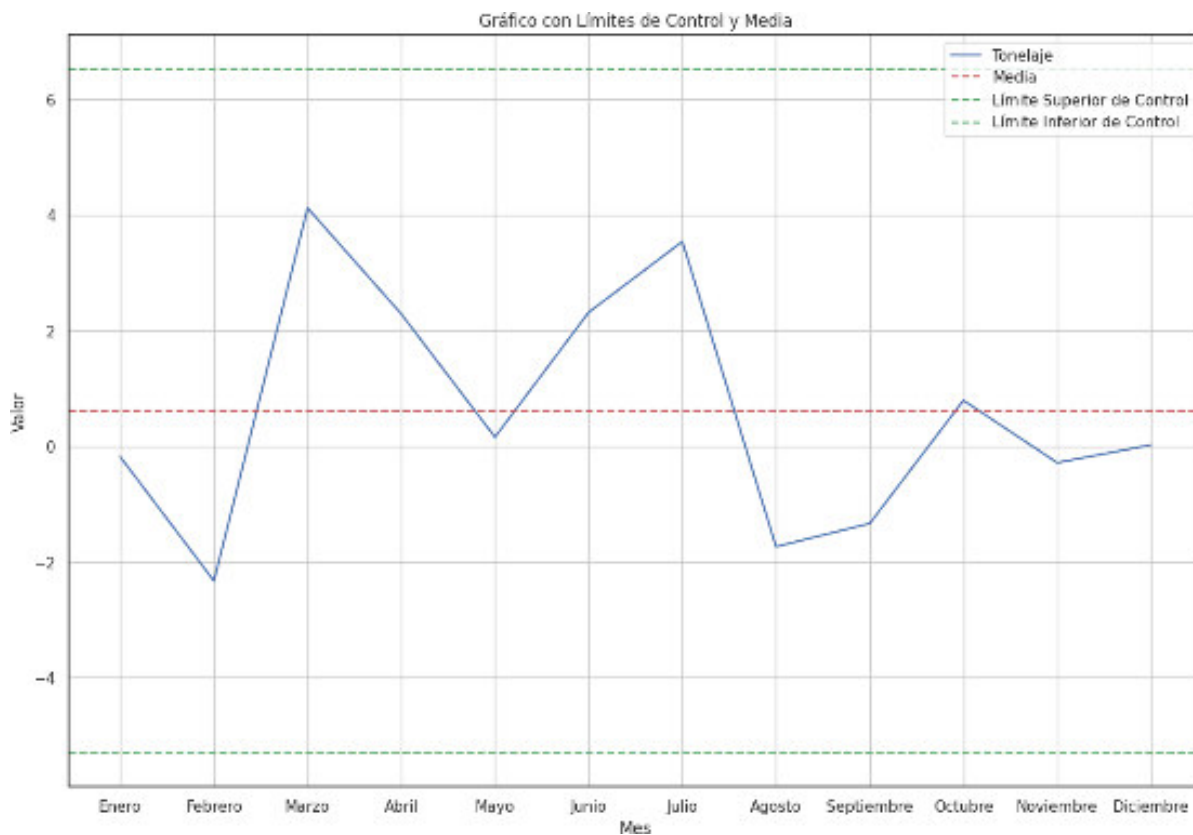


**Figura 46**

*Impacto Porcentual del FIS en el Tonelaje cuando el Mineral es Normal*



En la Figura 45, se observa que, a diferencia del escenario “fino”, para algunos meses el FIS propuesto sugirió una disminución de tonelaje de hasta 11.66 t/h, sin embargo, hubo meses también en dónde la sugerencia fue de incrementar la alimentación hasta un máximo de 20.66 t/h, esto se aprecia visualmente en el traslape de las líneas de color naranja y azul. Asimismo, la Figura 46 muestra el impacto porcentual del FIS respecto al flujo de mineral procesado, se observa una mejora promedio del 0.61%.

Contrario a los anteriores escenarios, cuando el F80 que ingresa a molienda primaria es grueso, el FIS propuesto sugirió disminuir la cantidad de mineral alimentado. En la Tabla 65, se observa que sugiere en promedio una disminución de 45.04 t/h, con picos máximos de hasta 56.96 t/h. Generando una alimentación promedio de 463.41 t/h, en comparación a las 508.40 t/h registradas.

**Tabla 65**

*Impacto Promedio en el Tonelaje cuando Ingresa Mineral Grueso*

| Mes        | Tonelaje | Delta Ton | Tonelaje Sugerido |
|------------|----------|-----------|-------------------|
| Enero      | 489.61   | -46.86    | 442.75            |
| Febrero    | 494.5    | -38.91    | 455.59            |
| Marzo      | 496.67   | -32.11    | 464.55            |
| Abril      | 508.44   | -35.02    | 473.42            |
| Mayo       | 505.48   | -56.93    | 448.56            |
| Junio      | 501.38   | -47.85    | 453.52            |
| Julio      | 485.95   | -37.38    | 448.56            |
| Agosto     | 522.04   | -51.38    | 470.65            |
| Septiembre | 538.32   | -48.1     | 490.22            |
| Octubre    | 502.23   | -37.77    | 464.4             |
| Noviembre  | 525.96   | -50.27    | 475.89            |
| Diciembre  | 530.19   | -57.93    | 472.86            |
| Promedio   | 508.40   | -45.04    | 463.41            |

**Figura 47**

*Comparación entre el Tonelaje Registrado y el Tonelaje Sugerido cuando el Mineral es Grueso*

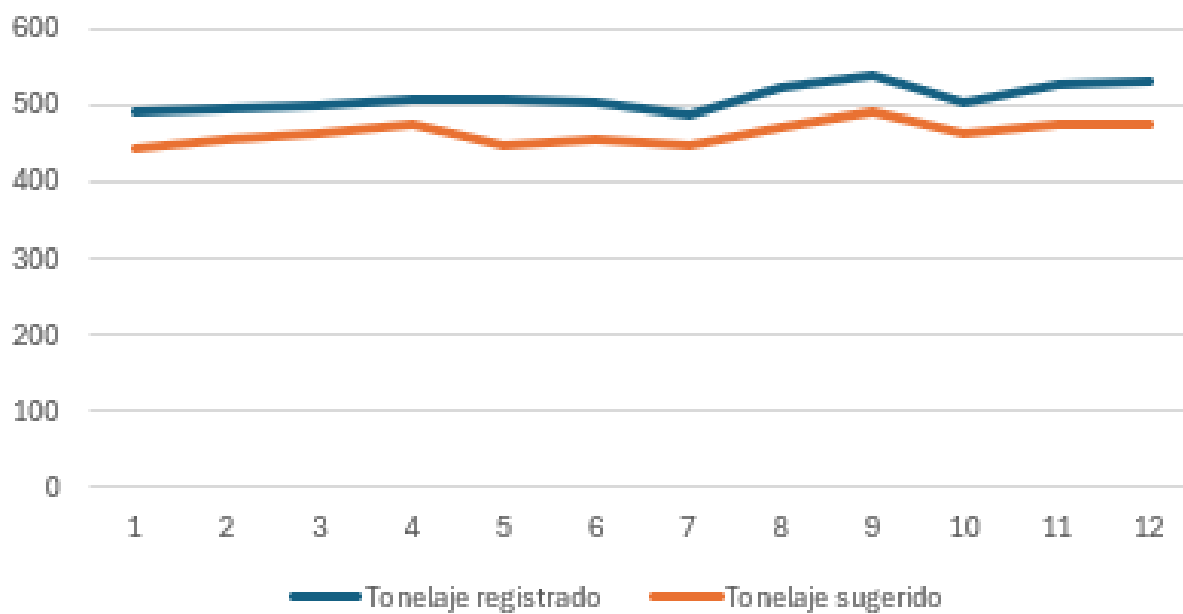
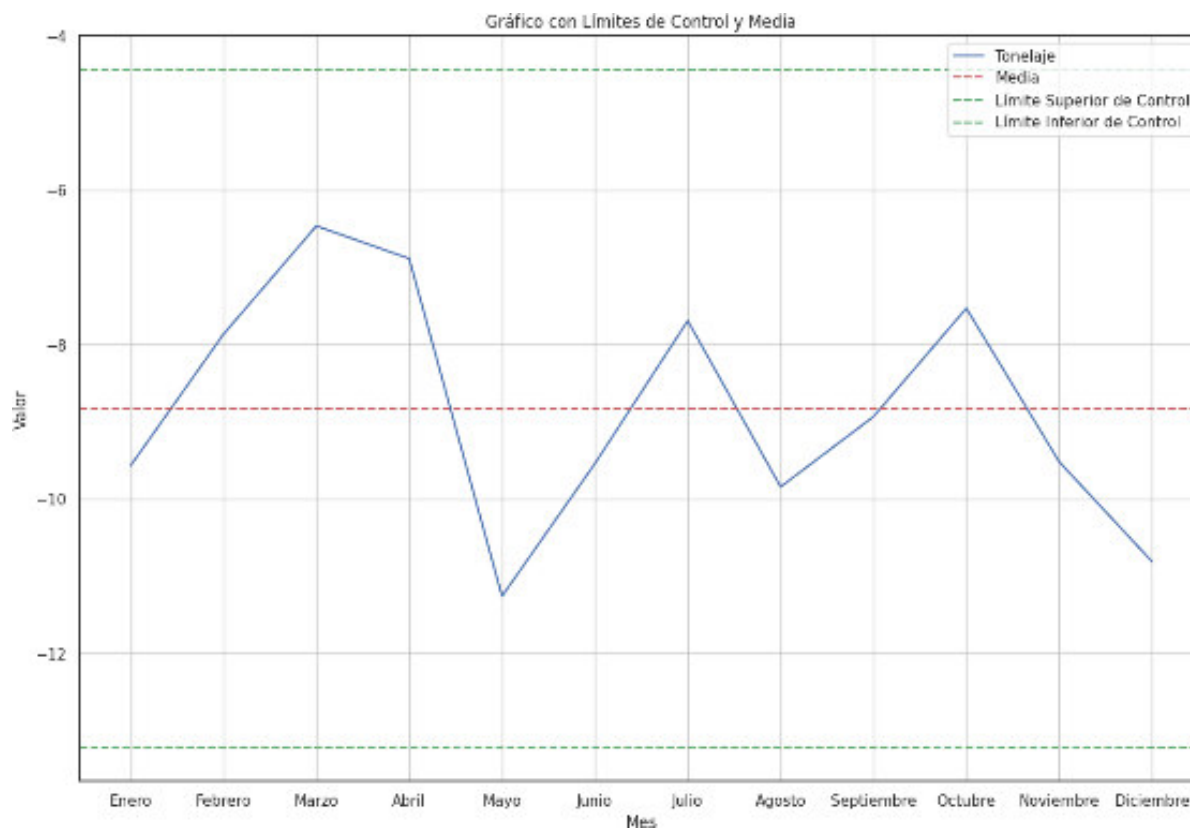


**Figura 48**

*Impacto Porcentual del FIS en el Tonelaje cuando el Mineral es Grueso*



En la Figura 47, se observa que la línea azul, que indica el tonelaje registrado, para todos los escenarios simulados se muestran por encima de la línea anaranjada, que indica el tonelaje sugerido por el FIS, esto indica que, para la totalidad de escenarios del 2023, el FIS ordenó una disminución del flujo del mineral alimentado, debido al engrosamiento del P80. Asimismo, la Figura 48 muestra el impacto porcentual del FIS respecto al flujo de mineral procesado, generando una disminución promedio del 8.83%.

### 6.2.2. *Contrastación de la Hipótesis Específica 2*

La investigación formuló la hipótesis: “El FIS permitirá reducir la cantidad de agua consumida en la molienda primaria de la U.M”.

Al respecto, la investigación determinó que el FIS sí minimiza el flujo de agua consumida en molienda primaria. Sin embargo, a diferencia de los escenarios para el tonelaje, en la totalidad de escenarios (fino, normal y grueso), el FIS evidenció una disminución en el consumo de agua.

**Tabla 66**

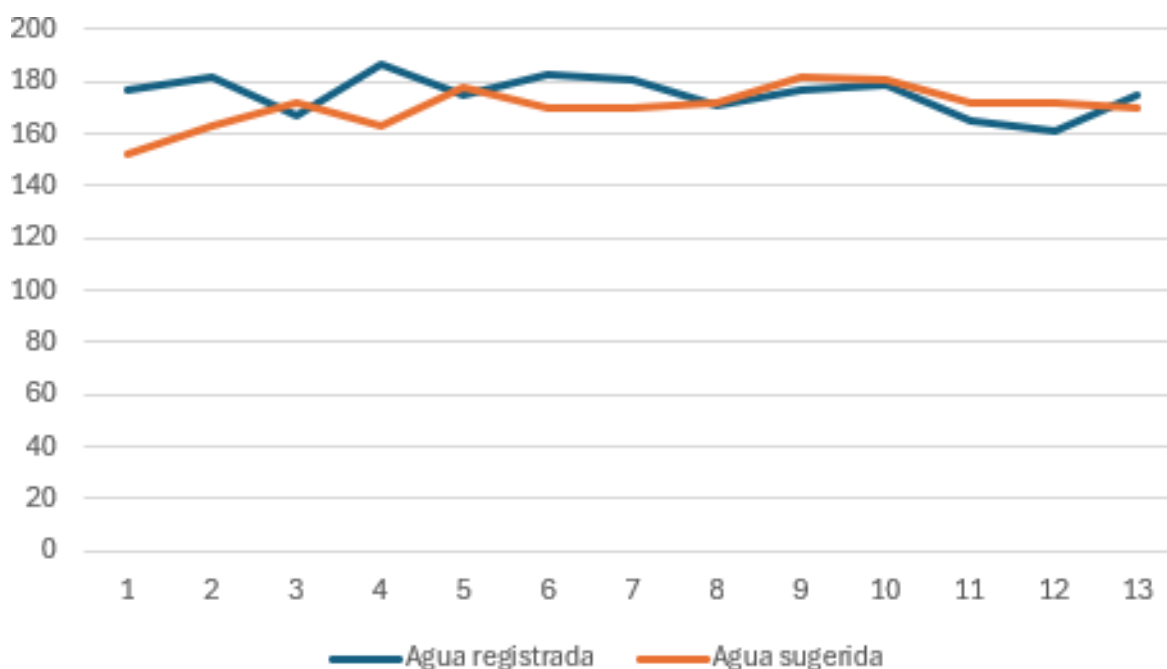
*Impacto Promedio en el Caudal de Agua cuando Ingresas Mineral Fino*

| Mes        | Agua   | Agua Sugerida | Ahorro agua |
|------------|--------|---------------|-------------|
| Enero      | 176.83 | 152.03        | 24.8        |
| Febrero    | 182.11 | 162.77        | 19.34       |
| Marzo      | 166.95 | 171.8         | -4.85       |
| Abril      | 186.88 | 163.03        | 23.85       |
| Mayo       | 174.99 | 177.87        | -2.88       |
| Junio      | 183.01 | 169.99        | 13.02       |
| Julio      | 180.99 | 169.51        | 11.48       |
| Agosto     | 170.91 | 172.07        | -1.16       |
| Septiembre | 176.96 | 181.69        | -4.73       |
| Octubre    | 178.48 | 180.49        | -2.01       |
| Noviembre  | 164.66 | 171.89        | -7.23       |
| Diciembre  | 160.97 | 171.78        | -10.81      |
| Promedio   | 175.31 | 170.41        | 4.90        |

En lo que respecta al escenario dónde ingresa mineral de tamaño fino, según muestra la Tabla 66, el FIS propuesto sugirió disminuir en promedio 4.90 m<sup>3</sup>/h a la cantidad de agua registrada durante el periodo de análisis, generando un flujo de agua alimentado de 170.41 m<sup>3</sup>/h, en comparación a los 175.31 m<sup>3</sup>/h.

**Figura 49**

*Comparación entre el Agua Registrada y el Agua Sugerida cuando el Mineral es Fino*



En la Figura 49, se observa que la línea azul muestra traslapes con la línea anaranjada, esto indica que el FIS propuesto ordenó incrementar y a la vez de disminuir el flujo de agua alimentada para los escenarios de mineral fino, ya que, se observan picos de disminución de hasta 23.85 m<sup>3</sup>/h y a su vez picos de incremento de hasta 10.81 m<sup>3</sup>/h. Asimismo, la Figura 50 muestra el impacto porcentual del FIS en el flujo de agua alimentada a molienda primaria, resultando en una disminución promedio de 2.56 %.

**Figura 50**

*Impacto Porcentual del FIS en el Caudal de Agua cuando el Mineral es Fino*

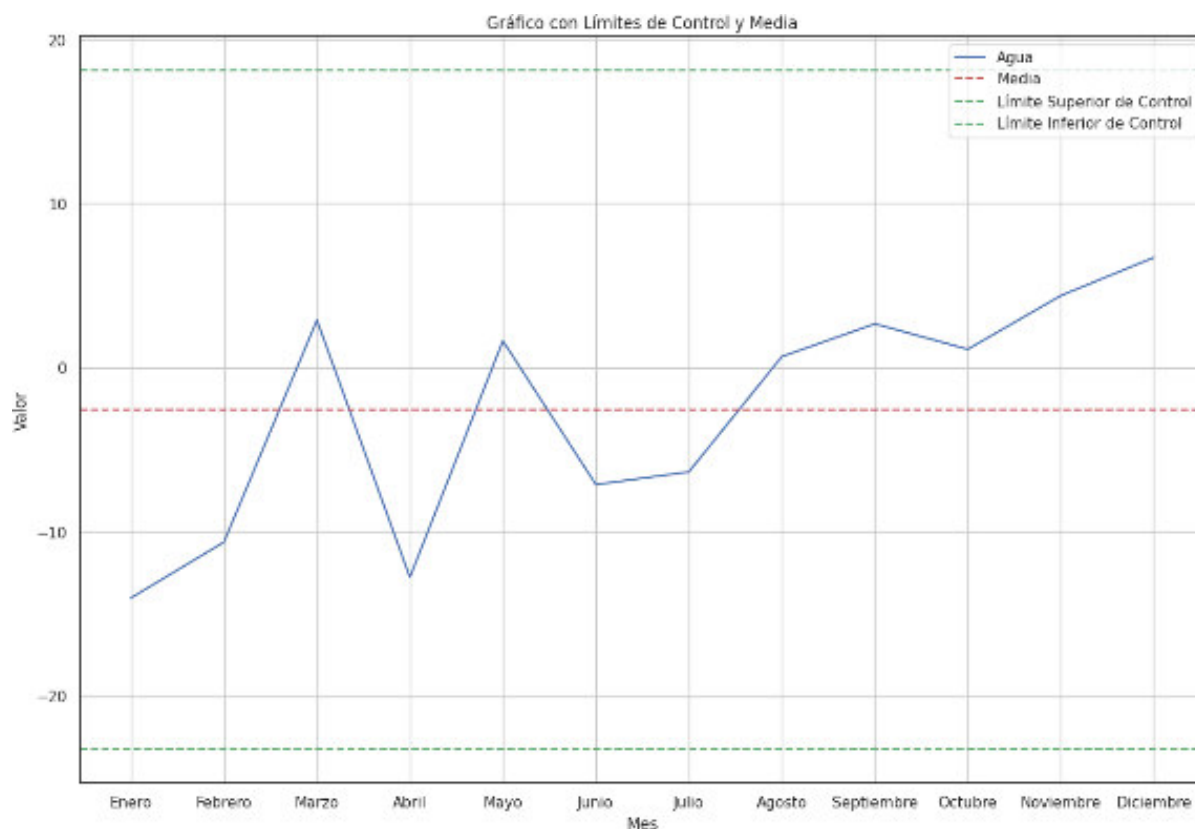
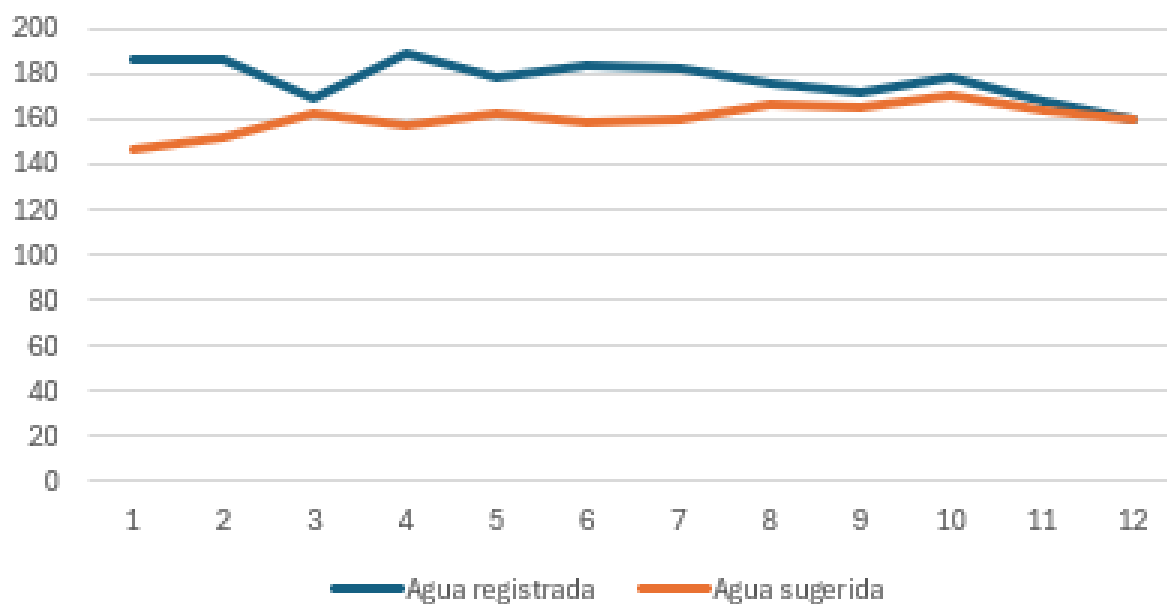


**Figura 51**

*Comparación entre el Agua Registrada y el Agua Sugerida cuando el Mineral es Normal*



En lo que respecta al escenario dónde ingresa mineral de tamaño normal, según muestra la Tabla 67, el FIS propuesto sugirió disminuir en promedio 16.85 m<sup>3</sup>/h a la cantidad de agua registrada, generando un flujo de agua alimentado de 160.18 m<sup>3</sup>/h.

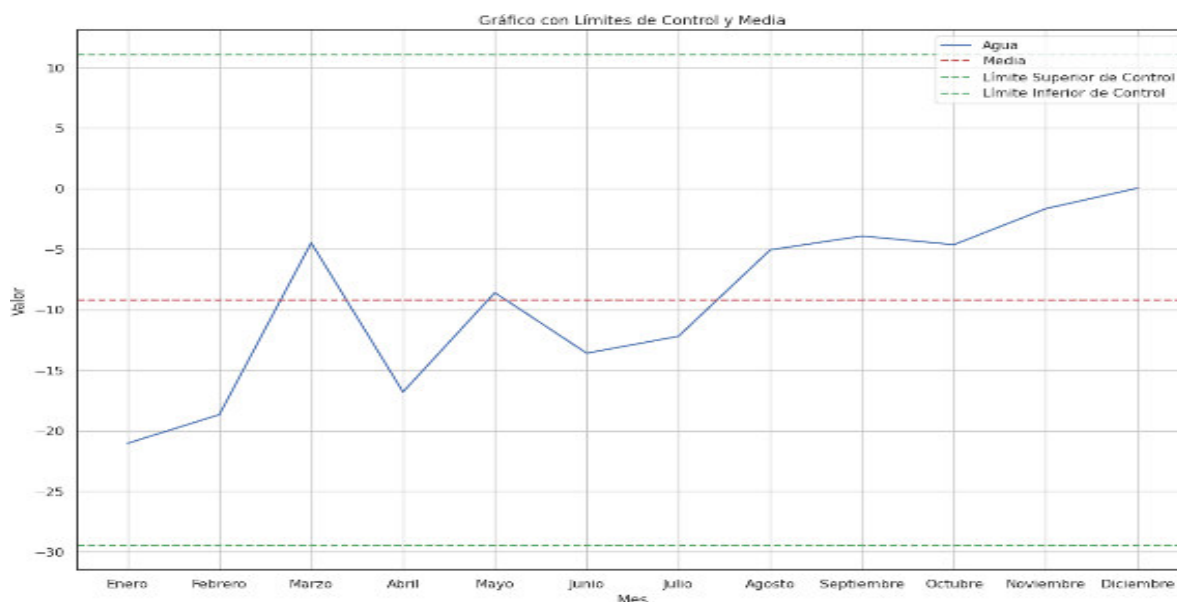
**Tabla 67**

*Impacto Promedio en el Caudal de Agua cuando Ingresar Mineral Normal*

| Mes        | Agua   | Agua Sugerida | Ahorro agua |
|------------|--------|---------------|-------------|
| Enero      | 185.77 | 146.68        | 39.09       |
| Febrero    | 186.36 | 151.56        | 34.8        |
| Marzo      | 169.43 | 161.84        | 7.59        |
| Abril      | 189.07 | 157.3         | 31.77       |
| Mayo       | 177.8  | 162.5         | 15.3        |
| Junio      | 183.65 | 158.68        | 24.97       |
| Julio      | 181.52 | 159.37        | 22.15       |
| Agosto     | 175.42 | 166.54        | 8.88        |
| Septiembre | 170.95 | 164.24        | 6.71        |
| Octubre    | 178.41 | 170.14        | 8.27        |
| Noviembre  | 166.94 | 164.16        | 2.78        |
| Diciembre  | 159.07 | 159.13        | -0.06       |
| Promedio   | 177.03 | 160.18        | 16.85       |

**Figura 52**

*Impacto Porcentual del FIS en el Caudal de Agua cuando el Mineral es Normal*



En la Figura 51 se observa que en todo momento la línea anaranjada está por debajo de la línea azul, esto indica que en para todo el intervalo de data analizada, el flujo de agua sugerida por el FIS es menor al flujo de agua registrada. Asimismo, la Figura 52 muestra el impacto porcentual del FIS en el flujo de agua alimentada a molienda primaria, resultando en una disminución promedio de 9.22 %.

Finalmente, en relación con el escenario donde ingresa mineral grueso, según muestra la Tabla 68, el FIS propuesto sugirió disminuir en promedio 34.92 m<sup>3</sup>/h a la cantidad de agua registrada durante el periodo de análisis, generando un flujo de agua alimentado de 143 m<sup>3</sup>/h, en comparación a los 175.31 m<sup>3</sup>/h registrados.

**Tabla 68**

*Impacto Promedio en el Caudal de Agua cuando Ingresa Mineral Grueso*

| Mes        | Agua   | Agua Sugerida | Ahorro agua |
|------------|--------|---------------|-------------|
| Enero      | 187.89 | 137.25        | 50.64       |
| Febrero    | 188.77 | 141.23        | 47.54       |
| Marzo      | 173.13 | 144.01        | 29.12       |
| Abril      | 189.1  | 146.76        | 42.34       |
| Mayo       | 175.38 | 139.05        | 36.33       |
| Junio      | 185.01 | 140.59        | 44.42       |
| Julio      | 189.83 | 139.05        | 50.78       |
| Agosto     | 183.44 | 145.9         | 37.54       |
| Septiembre | 172.02 | 151.97        | 20.05       |
| Octubre    | 170.25 | 143.96        | 26.29       |
| Noviembre  | 167.57 | 147.53        | 20.04       |
| Diciembre  | 160.54 | 146.59        | 13.95       |
| Promedio   | 178.58 | 143.66        | 34.92       |

En la Figura 53 se observa que en todo momento la línea anaranjada está por debajo de la línea azul; inclusive, se aprecia que la separación entre ambas líneas es mayor con relación a la Figura 51, lo que indica que para este escenario la disminución/ahorro de agua

es mayor. Asimismo, la Figura 54 muestra el impacto porcentual del FIS en el flujo de agua alimentada a molienda primaria, resultando en una disminución promedio de 19.25 %.

**Figura 53**

*Comparación entre el Agua Registrada y el Agua Sugerida cuando el Mineral es Grueso*

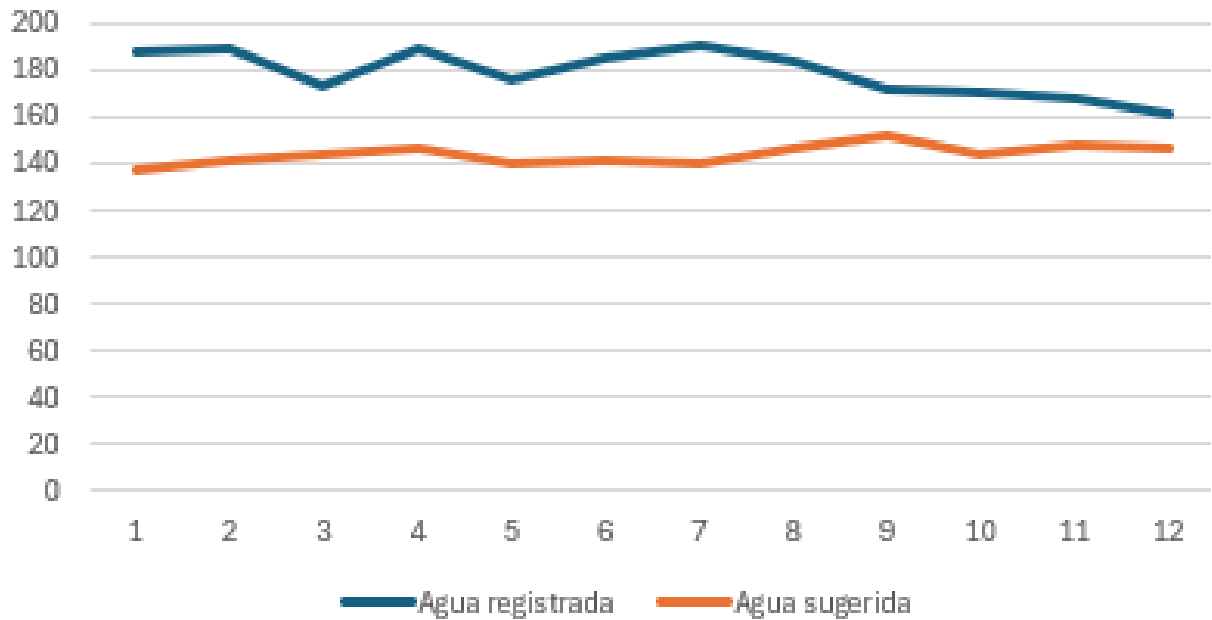
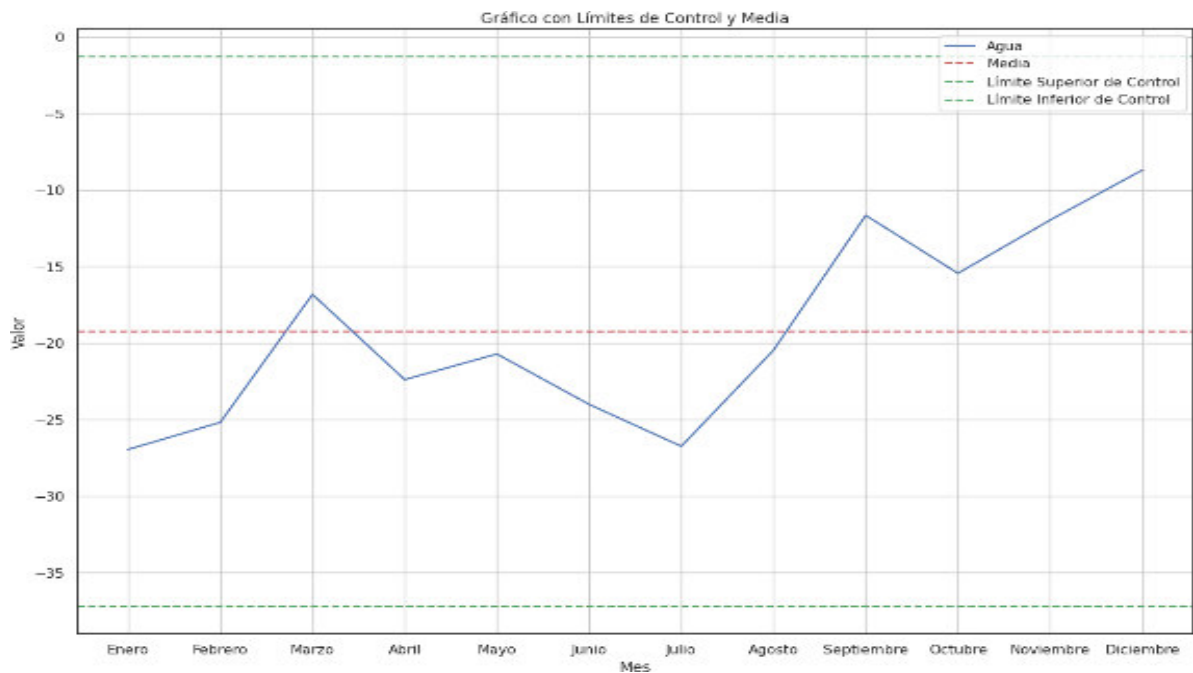


**Figura 54**

*Impacto Porcentual del FIS en el Caudal de Agua cuando el Mineral es Grueso*



### 6.2.3. *Contrastación de la Hipótesis Específica 3*

La investigación formuló la hipótesis: “El FIS permitirá reducir el tamaño de partícula P80 en la molienda primaria de la U.M”.

Al respecto, la investigación determinó que el FIS sí permite optimizar el tamaño de partícula P80. Sin embargo, esto se cumple solo bajo un escenario en donde el mineral que ingresa a molienda es “grueso”, para los escenarios “fino” o “normal”, el FIS propuesto engrosó el tamaño P80 simulado, priorizando la maximización del tonelaje.

En lo que respecta al escenario dónde ingresa mineral de tamaño fino, según muestra la Tabla 69, el FIS propuesto obtuvo un P80 promedio de 607.05  $\mu\text{m}$ , en comparación a las 562.69  $\mu\text{m}$  registradas, generando un engrosamiento promedio de 44.77  $\mu\text{m}$ .

En la Figura 55 se observa que en todo momento la línea anaranjada está por encima de la línea azul, evidenciando un engrosamiento de P80 durante todos los meses. Asimismo, la Figura 56 cuantifica dicho engrosamiento promedio en 8.05 %.

**Tabla 69**

*Impacto Promedio en el P80 cuando Ingresar Mineral Fino*

| Mes        | P80    | P80*   | Delta P80 |
|------------|--------|--------|-----------|
| Enero      | 506.89 | 530.42 | 23.53     |
| Febrero    | 538.57 | 571.82 | 33.25     |
| Marzo      | 543.99 | 618.91 | 74.92     |
| Abril      | 523.74 | 576.86 | 53.12     |
| Mayo       | 588.49 | 636.31 | 47.82     |
| Junio      | 541.1  | 596.48 | 55.38     |
| Julio      | 528.8  | 598.58 | 69.78     |
| Agosto     | 597.49 | 606.69 | 9.2       |
| Septiembre | 600.36 | 662.39 | 62.03     |
| Octubre    | 630.72 | 662.93 | 32.21     |
| Noviembre  | 599.34 | 628.56 | 29.22     |
| Diciembre  | 547.93 | 594.65 | 46.72     |
| Promedio   | 562.29 | 607.05 | 44.77     |

**Figura 55**

*Comparación entre el P80 Registrado y el P80 Simulado cuando el Mineral es Fino*

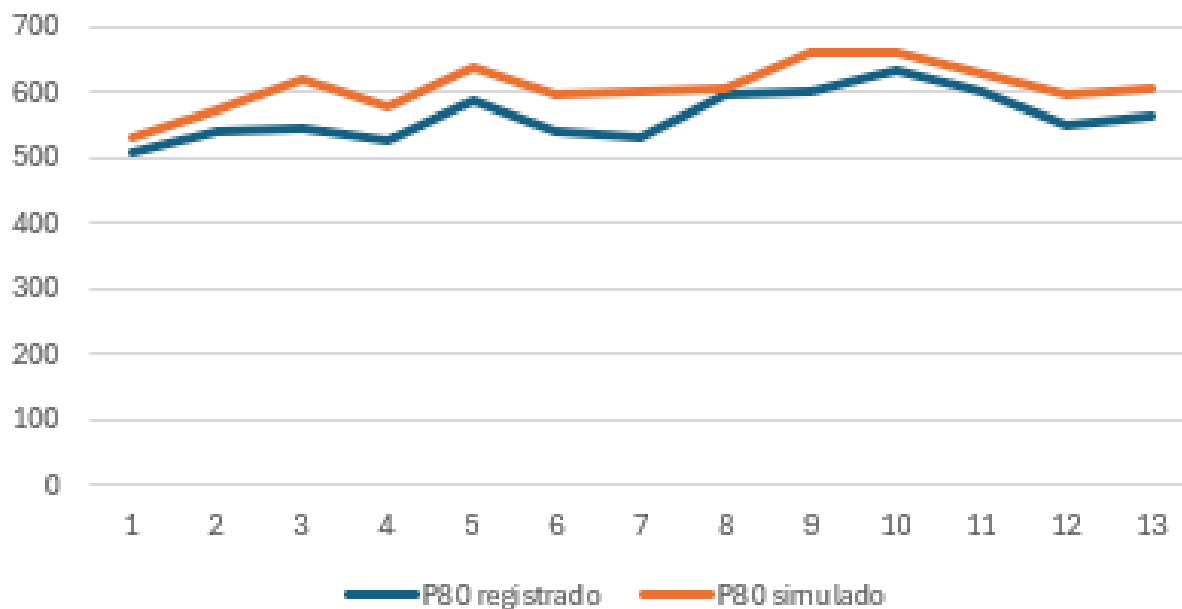
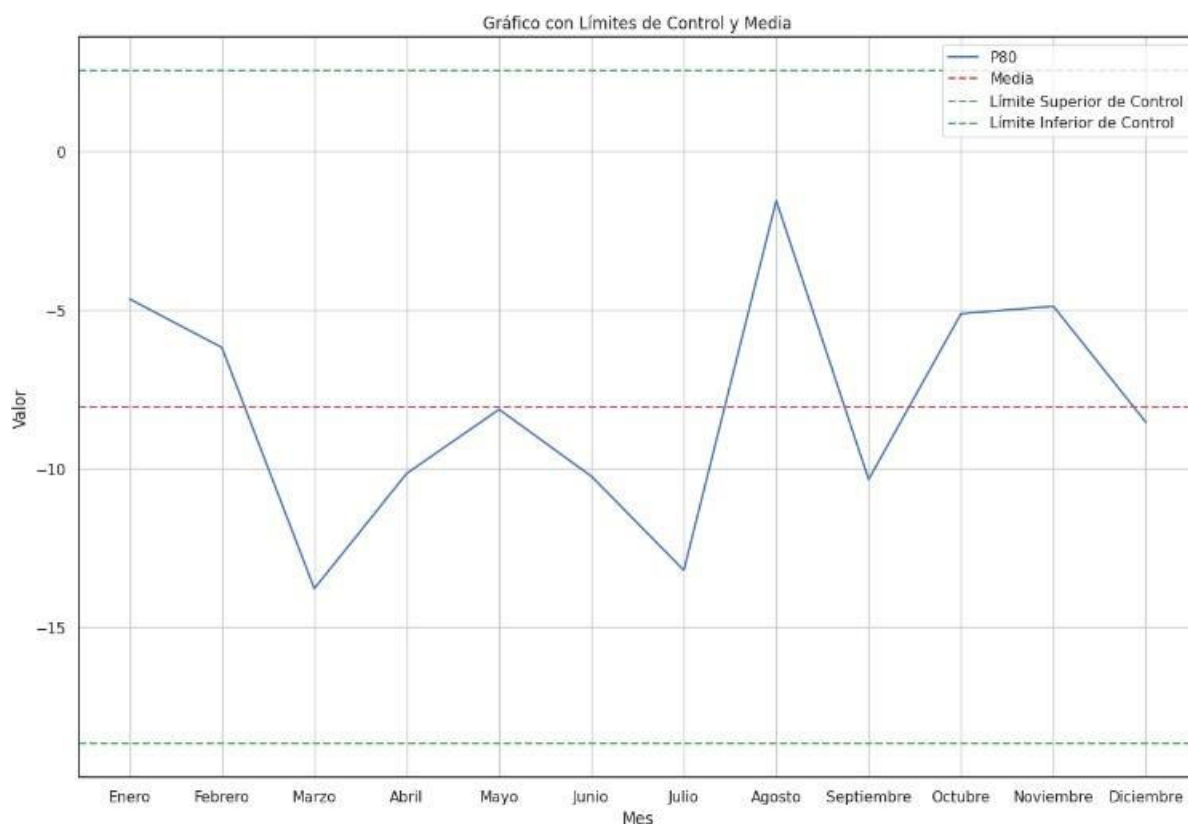


**Figura 56**

*Impacto Porcentual del FIS en el P80 cuando el Mineral es Fino*



En relación con el escenario dónde ingresa mineral de tamaño normal, según muestra la Tabla 70, el FIS propuesto obtuvo un P80 promedio de 587.46  $\mu\text{m}$ , en comparación a las 581.95  $\mu\text{m}$  registradas, generando un engrosamiento promedio de 5.51  $\mu\text{m}$ .

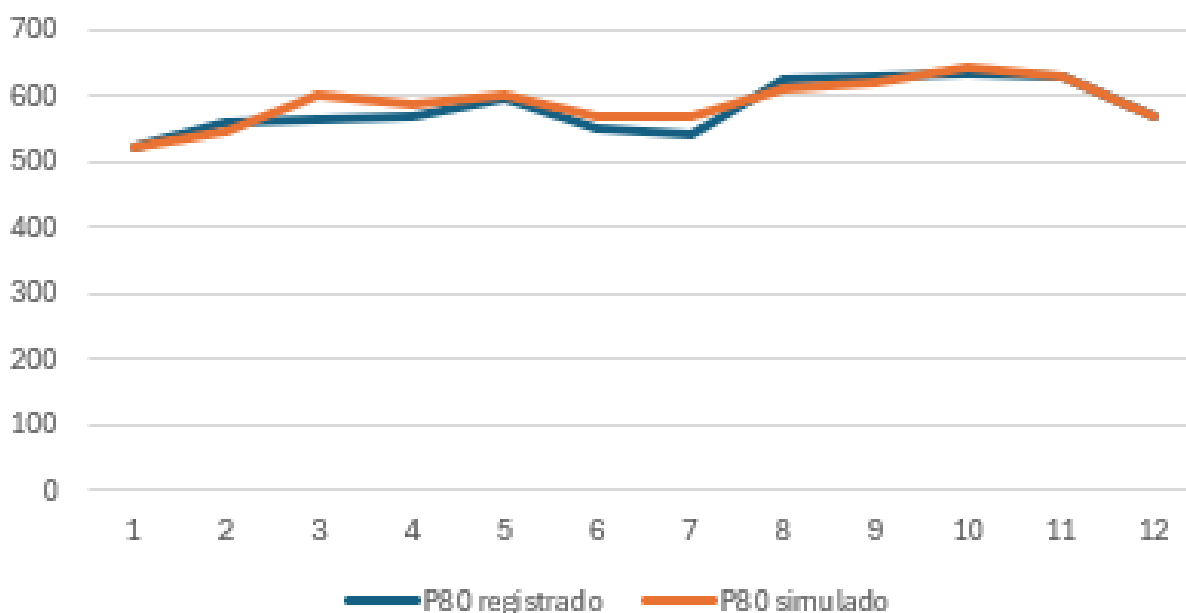
**Tabla 70**

*Impacto Promedio en el P80 cuando Ingresa Mineral Normal*

| Mes        | P80    | P80*   | Delta P80 |
|------------|--------|--------|-----------|
| Enero      | 521.52 | 521.34 | -0.18     |
| Febrero    | 560.69 | 542.74 | -17.95    |
| Marzo      | 564.67 | 599.22 | 34.55     |
| Abril      | 566.16 | 586.15 | 19.99     |
| Mayo       | 596.04 | 598.35 | 2.31      |
| Junio      | 550.28 | 569.77 | 19.49     |
| Julio      | 538.35 | 567.16 | 28.81     |
| Agosto     | 624.95 | 610.41 | -14.54    |
| Septiembre | 628.08 | 616.75 | -11.33    |
| Octubre    | 634.47 | 641.48 | 7.01      |
| Noviembre  | 629.87 | 627.73 | -2.14     |
| Diciembre  | 568.28 | 568.39 | 0.11      |
| Promedio   | 581.95 | 587.46 | 5.51      |

**Figura 57**

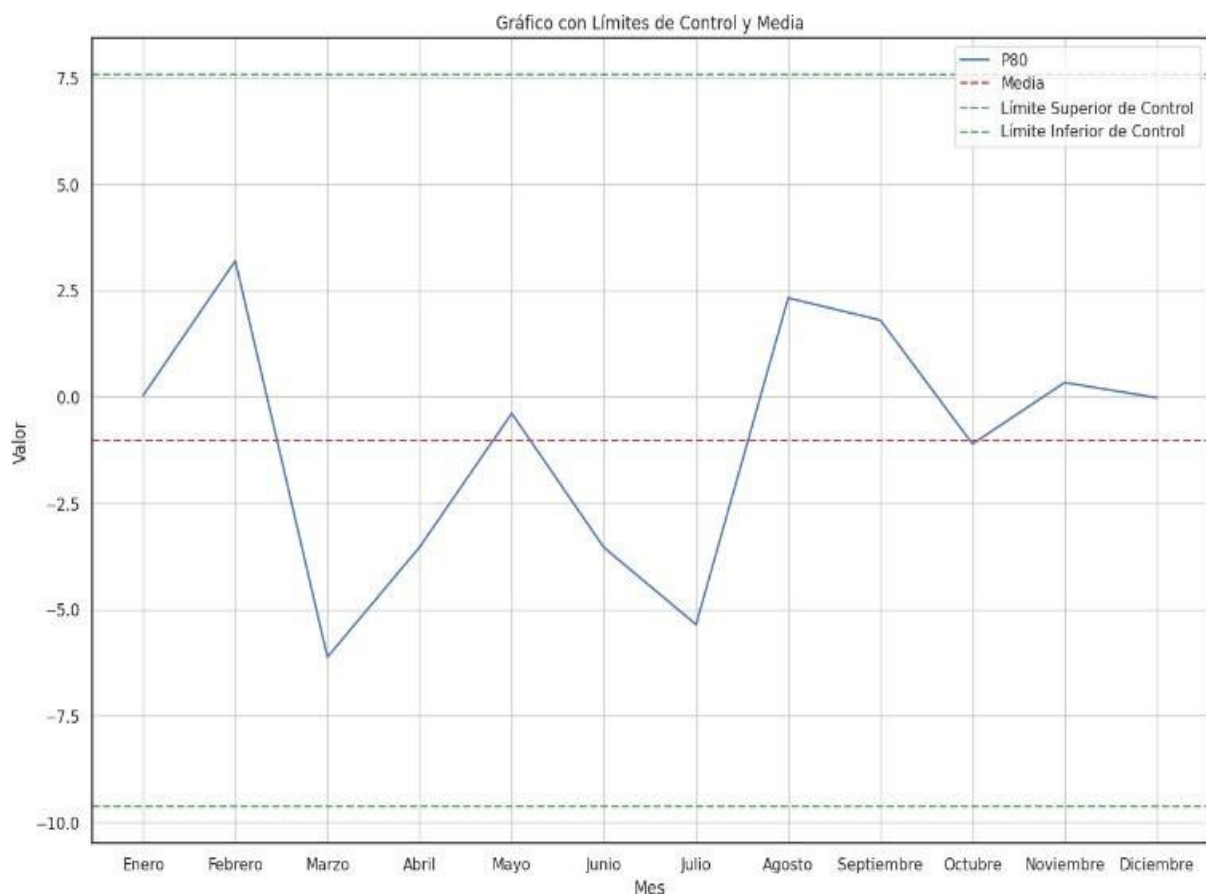
*Comparación entre el P80 Registrado y el P80 Simulado cuando el Mineral es Normal*



En la Figura 57 se observa que la distancia entre la línea de color anaranjada y la línea de color azul es mínimo, lo que indica que para un escenario donde el mineral que ingresa a molienda primaria es de tamaño normal, el engrosamiento del P80 a causa del FIS propuesto es mínimo. Asimismo, la Figura 58 cuantifica dicho engrosamiento promedio en 1.02 %.

**Figura 58**

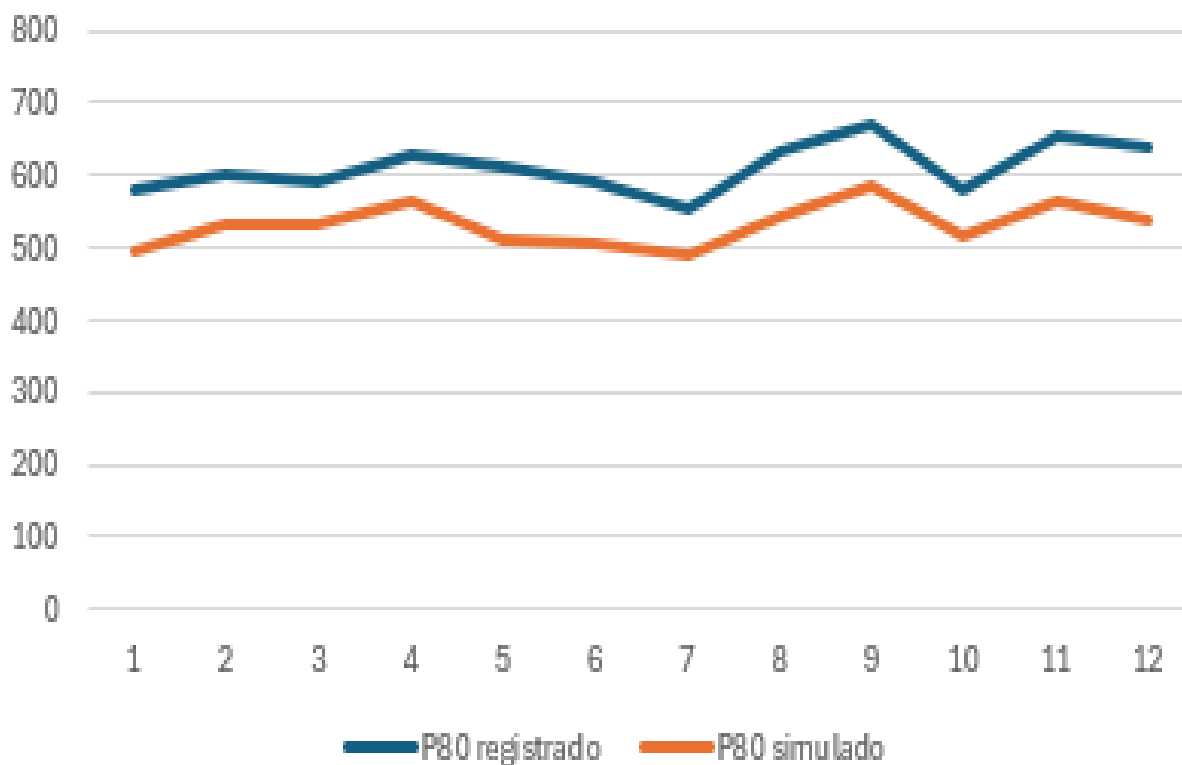
*Impacto Porcentual del FIS en el P80 cuando el Mineral es Normal*



En lo que respecta al escenario dónde ingresa mineral de tamaño grueso, según muestra la Tabla 71, el FIS propuesto obtuvo un P80 promedio de 564.17  $\mu\text{m}$ , en comparación a las 654.47  $\mu\text{m}$  registradas, generando un tamaño de salida mucho más fino, en promedio se calcula una reducción de 79.24  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 71***Impacto Promedio en el P80 cuando Ingresas Mineral Grueso*

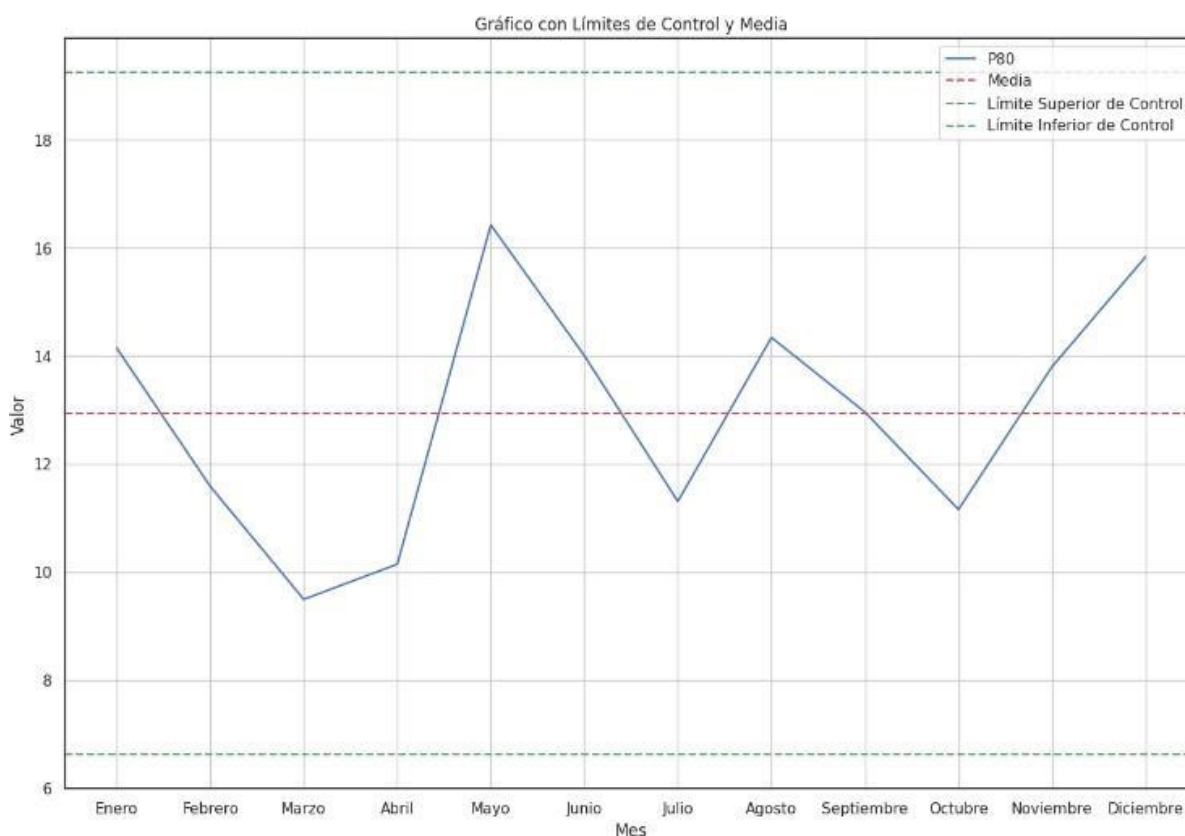
| Mes        | P80    | P80*   | Delta P80 |
|------------|--------|--------|-----------|
| Enero      | 578.12 | 496.36 | -81.76    |
| Febrero    | 602.65 | 532.84 | -69.81    |
| Marzo      | 588.74 | 532.85 | -55.89    |
| Abril      | 629.03 | 565.21 | -63.82    |
| Mayo       | 612.13 | 511.6  | -100.53   |
| Junio      | 590.26 | 507.6  | -82.66    |
| Julio      | 551.81 | 489.42 | -62.39    |
| Agosto     | 630.48 | 540.07 | -90.41    |
| Septiembre | 670.61 | 583.71 | -86.9     |
| Octubre    | 582.16 | 517.21 | -64.95    |
| Noviembre  | 654.47 | 564.17 | -90.3     |
| Diciembre  | 640.54 | 539.14 | -101.4    |
| Promedio   | 610.92 | 531.68 | -79.24    |

**Figura 59***Comparación entre el P80 Registrado y el P80 Simulado cuando el Mineral es Grueso*

En la Figura 59 se observa que en todo momento la línea anaranjada, que indica el P80 simulado, está notoriamente por debajo de la línea azul, lo que evidencia que, para todos los meses, el FIS obtuvo un P80 simulado menor. Inclusive, en algunos meses, se obtuvo una reducción de tamaño de hasta  $100.53\text{ }\mu\text{m}$ . Asimismo, la Figura 60 cuantifica dicha reducción del tamaño en  $12.93\%$  en promedio.

**Figura 60**

*Impacto Porcentual del FIS en el P80 cuando el Mineral es Grueso*



## **7. DISCUSIÓN**

### **7.1. Desempeño del FIS Propuesto**

#### **7.1.1. *Rango Fino***

En relación con la maximización del tonelaje, según se detalló en la sección anterior, el FIS consiguió incrementar en un 5.66% el tonelaje de alimentación a la molienda primaria, garantizando una alimentación promedio de 549 t/h.

Asimismo, el FIS logró reducir el consumo de agua en 2.56%, manteniendo un flujo promedio de 170 m<sup>3</sup>/h.

Sin embargo, estas mejoras ocasionaron un engrosamiento del 8.65% en el tamaño P80, generando una granulometría de salida a 607  $\mu$ m en promedio.

Lo anterior evidencia que, en presencia de un alimento con granulometría fina, el FIS prioriza la maximización de tonelaje, a costa de generar una granulometría P80 más gruesa.

#### **7.1.2. *Rango Normal***

En lo que respecta a la maximización del tonelaje, en la sección anterior se demostró que; en presencia de mineral con granulometría normal el FIS incrementó el tonelaje en 0.61%, manteniendo una alimentación promedio de 516 t/h.

Asimismo; el FIS logró reducir el consumo de agua en 9.22%, manteniendo un flujo promedio de 160 m<sup>3</sup>/h.

Sin embargo, con relación al tamaño P80, el FIS generó un engrosamiento promedio del 1.03%; pero, al tratarse de un valor tan pequeño, se puede asumir que el FIS no genera mayor impacto, manteniendo un P80 de 587  $\mu$ m.

Lo anterior evidencia que, en presencia de un alimento con granulometría normal, el FIS prioriza reducir la cantidad de agua consumida, sin alteraciones mayores en el tonelaje y el tamaño P80 en la salida.

### 7.1.3. *Rango Grueso*

Finalmente, en los escenarios donde ingresó mineral grueso, el FIS sugirió disminuir el tonelaje de alimentación en 8.82%, generando una alimentación promedio de 463 t/h.

Sin embargo, el FIS logró reducir el consumo de agua en 19.25%, manteniendo un flujo promedio de 143 m<sup>3</sup>, superando el ahorro calculado para los escenarios anteriores.

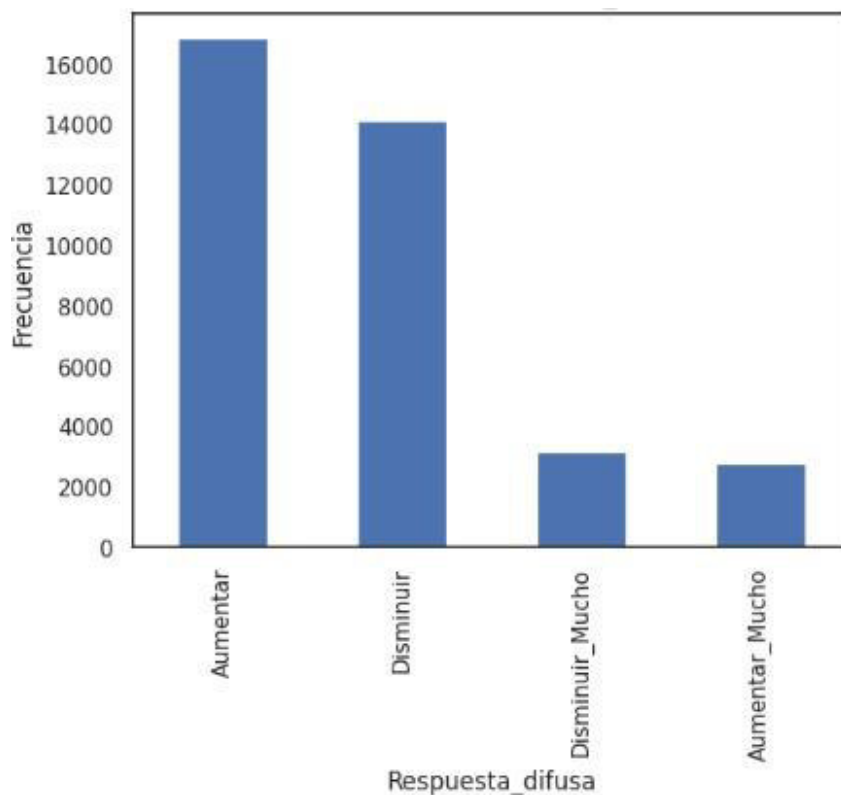
Asimismo; con relación al tamaño P80, el FIS generó un afinamiento de 12.93%, llevando la granulometría de salida hasta los 531  $\mu$ m.

Lo anterior evidencia que, en presencia de un alimento con granulometría gruesa, el FIS prioriza reducir la cantidad de mineral alimentado, para hacer conseguir una granulometría más fina en la salida.

## 7.2. Análisis de Respuestas Difusas

**Figura 61**

*Histograma de Respuestas Difusas*



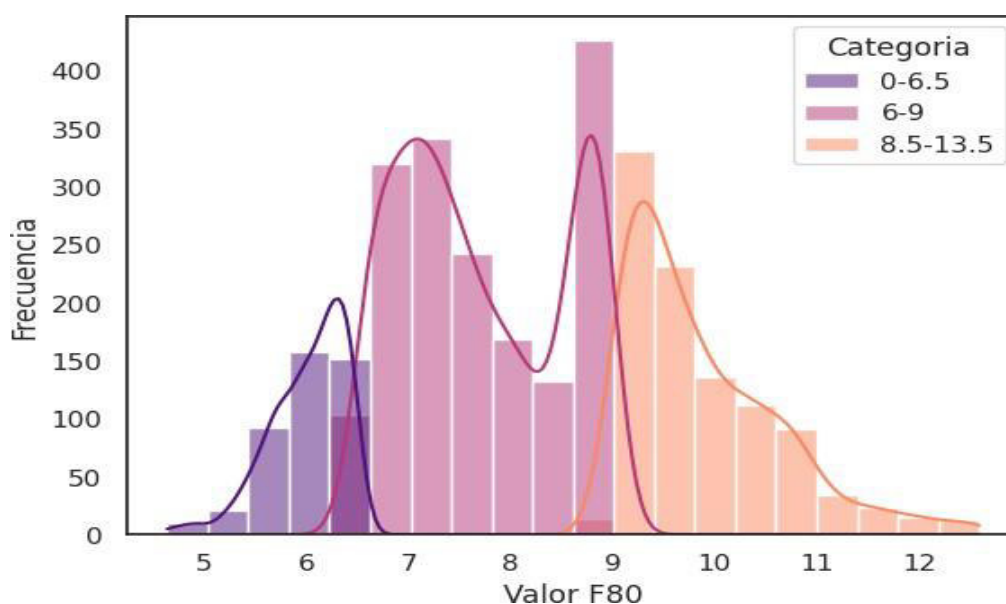
El FIS desarrollado tiene cinco valores de salida difusos relacionados al tonelaje de alimentación a molienda primaria: Disminuir, Disminuir Mucho, Mantener, Aumentar y Aumentar Mucho. La Figura 61, muestra que, para el periodo analizado, el FIS sugiere con mayor predominancia “Aumentar” el tonelaje. Y, en segundo lugar, se observa la sugerencia de “Disminuir” el tonelaje.

### 7.2.1. *Disminuir Mucho*

En la Figura 62 se observa que hubo escenarios en dónde el FIS disminuyó mucho el tonelaje, pese a que el mineral tenía una granulometría fino o normal. Evidenciando que el motivo principal para esta sugerencia corresponde a las tensiones de las bombas de descarga del circuito de molienda primaria, y no a la granulometría de entrada.

**Figura 62**

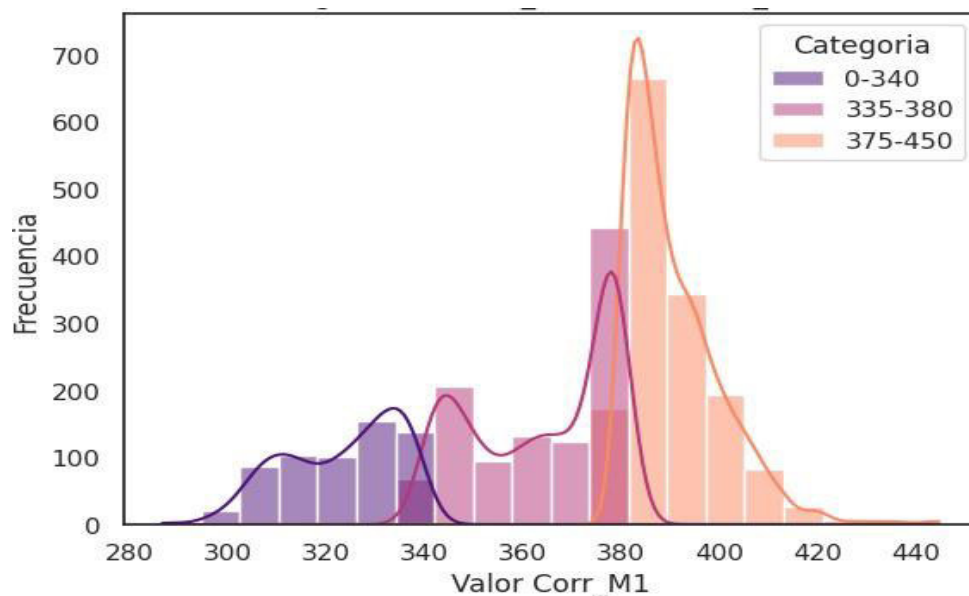
*Histograma del F80 cuando el Tonelaje Disminuyó Mucho*



Asimismo, en la Figura 63 se observa que cada vez que el FIS ordeno “disminuir mucho” el tonelaje, la tensión de la bomba de descarga del Metso 1 estaba elevada. Esta predominancia evidencia un punto de atención para la unidad minera.

**Figura 63**

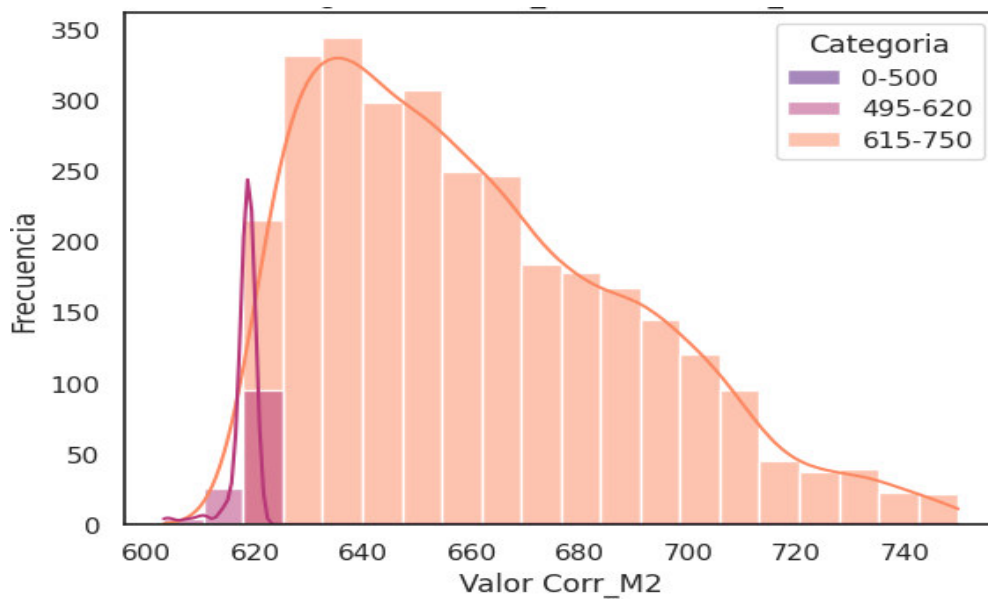
*Histograma de la Corr\_M1 cuando el Tonelaje Disminuyó Mucho*



De igual forma, la Figura 64 muestra que, en los escenarios en dónde el FIS ordenó “disminuir mucho” el tonelaje, se observa un valor elevado en la tensión de la bomba de descarga del Metso 2.

**Figura 64**

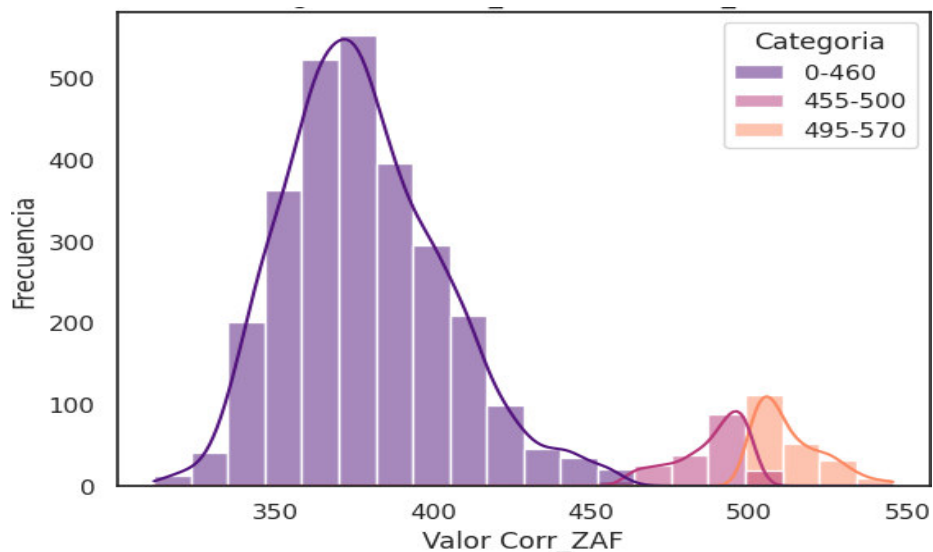
*Histograma de la Corr\_M2 cuando el Tonelaje Disminuyó Mucho*



Finalmente, la Figura 65 muestra que, la veces que el FIS ordenó “disminuir mucho” el tonelaje, no se debió a un incremento en la corriente de las bombas de las ZAF.

**Figura 65**

*Histograma de la Corr\_ZAF cuando el Tonelaje Disminuyó Mucho*

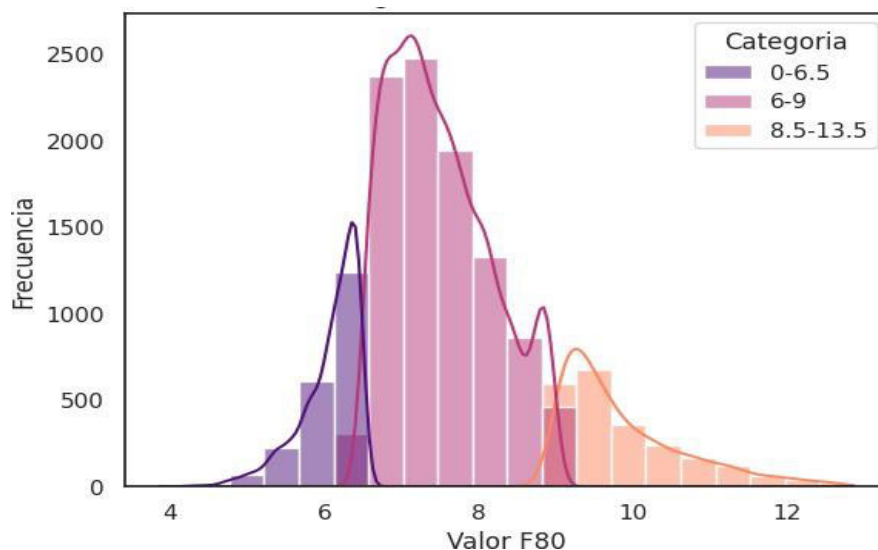


Lo anterior evidencia que, la razón principal para “disminuir mucho” el tonelaje fue que la bomba de descarga del Metso 2 tenía un valor de tensión elevado.

### 7.2.2. Disminuir

**Figura 66**

*Histograma del F80 cuando el Tonelaje Disminuyó*

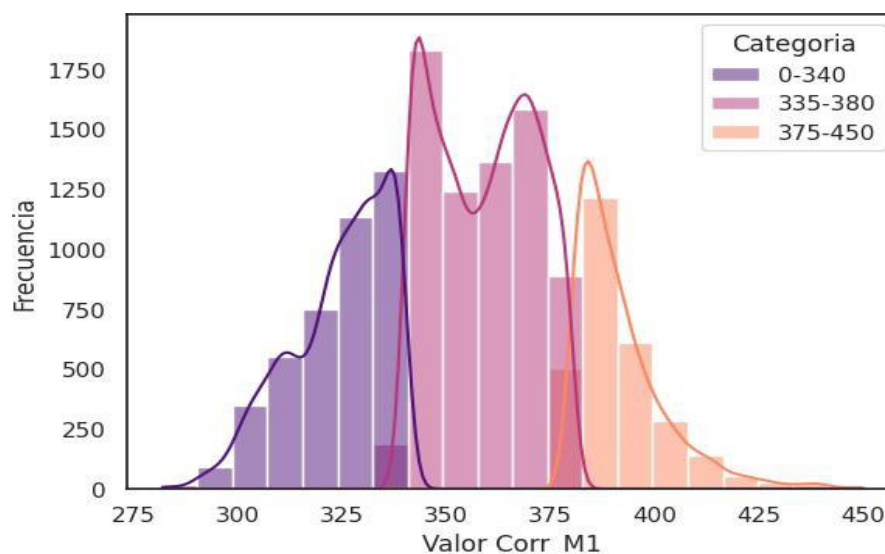


En la Figura 66 se observa que, hubo escenarios en dónde el FIS “disminuyó” el tonelaje pese a que el alimento tenía una granulometría normal. Lo que evidencia que, existe otro factor que condiciona la disminución de tonelaje.

Asimismo; en la Figura 67 se observa que, los escenarios en los que el FIS ordenó “disminuir” el tonelaje, los valores de la tensión de la bomba de descarga del Metso 1 tuvieron alta variación. Por lo que, no se puede atribuir dicho comportamiento como el causante de la disminución del tonelaje.

**Figura 67**

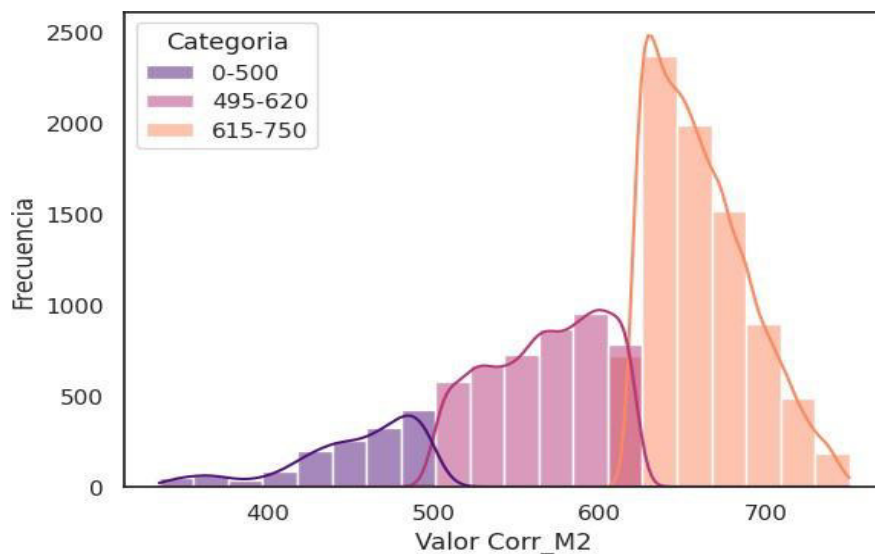
*Histograma de la Corr\_M1 cuando el Tonelaje Disminuyó*



De igual forma, en la Figura 68 se observa que, en los escenarios en dónde el FIS ordenó “disminuir mucho” el tonelaje, se evidenciaron valores elevados en la tensión de la bomba de descarga del Metso 2. Dicho comportamiento, sí puede ser el causante de la disminución del tonelaje.

**Figura 68**

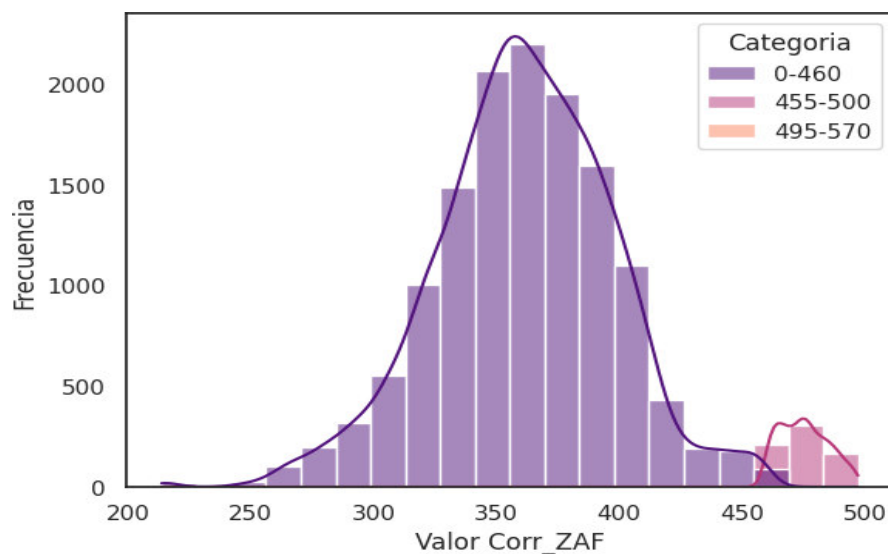
*Histograma de la Corr\_M2 cuando el Tonelaje Disminuyó*



Finalmente, en la Figura 69 se observa que, en los escenarios en dónde el FIS ordenó “disminuir” el tonelaje, la tensión de las bombas de alimentación a las ZAF presentó valores bajos, lo que indica que este comportamiento no fue el causante de la disminución de tonelaje por parte del FIS.

**Figura 69**

*Histograma de la Corr\_ZAF cuando el Tonelaje Disminuyó*



Lo anterior evidencia que, la razón principal para “disminuir” el tonelaje fue que la bomba de descarga del Metso 2 tenía un valor de tensión elevado.

### 7.2.3. Aumentar

En la Figura 70 se observa que, en los escenarios en dónde se presentó granulometría fina y normal, el FIS aumentó el tonelaje. Utilizando como criterio principal, aprovechar la presencia de finos para maximizar el tonelaje.

**Figura 70**

*Histograma del F80 cuando el Tonelaje Aumentó*

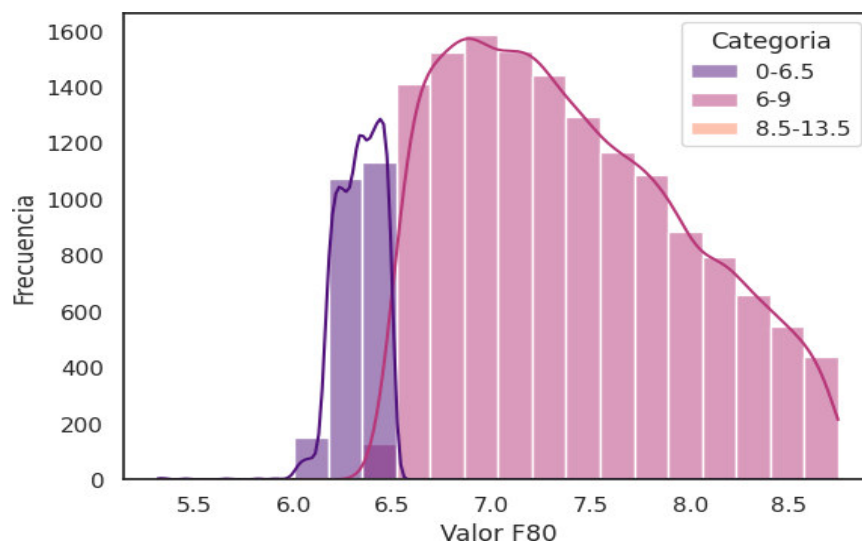
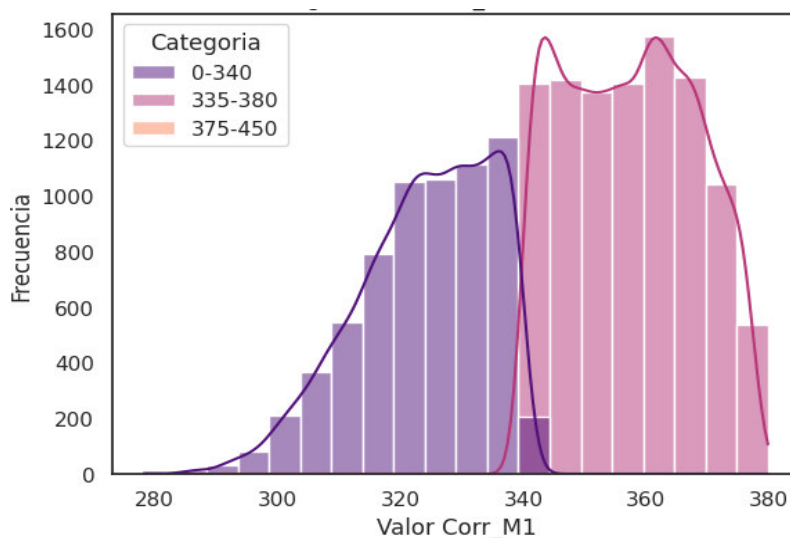


**Figura 71**

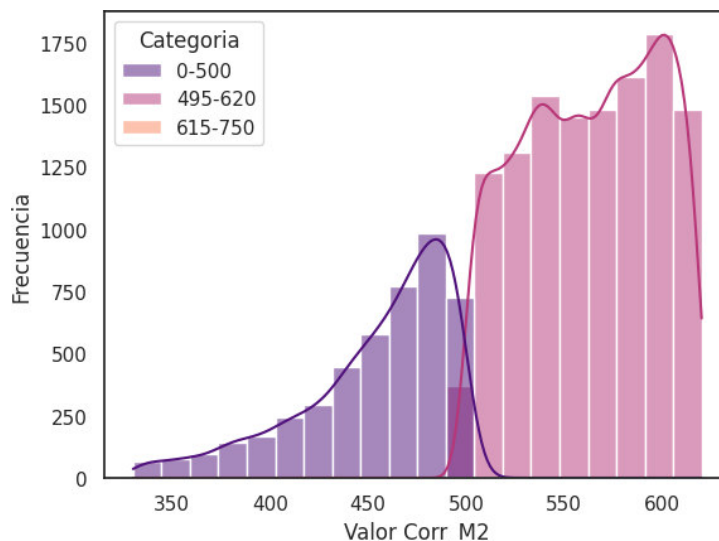
*Histograma de la Corr\_M1 cuando el Tonelaje Aumentó*



Asimismo, en la Figura 71 y en la Figura 72 se observa que, cada vez que el FIS ordenó “aumentar” el tonelaje, la tensión de las corrientes de las bombas de descarga del Metso 1 y del Metso 2 se mantuvieron en un rango normal.

### Figura 72

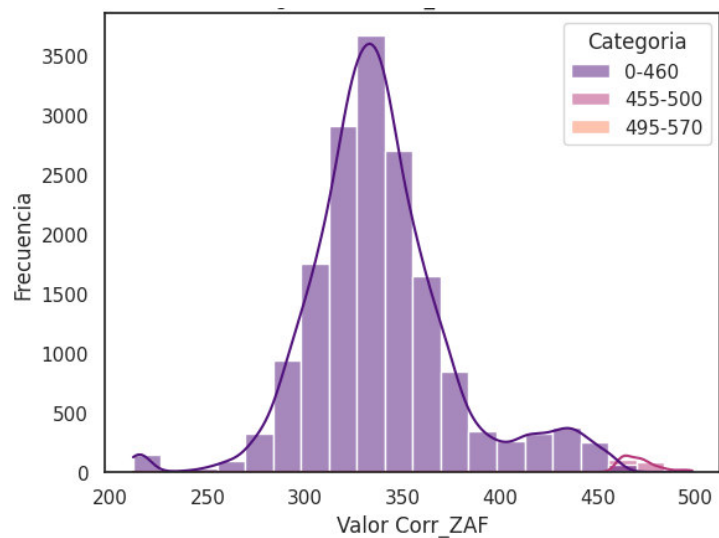
*Histograma de la Corr\_M2 cuando el Tonelaje Aumentó*



De la misma forma; en la Figura 73, se observa que, la tensión de la corriente de la bomba de alimentación hacia las ZAF, esta se mantuvo en todo momento en el rango bajo.

### Figura 73

*Histograma de la Corr\_ZAF cuando el Tonelaje Aumentó*

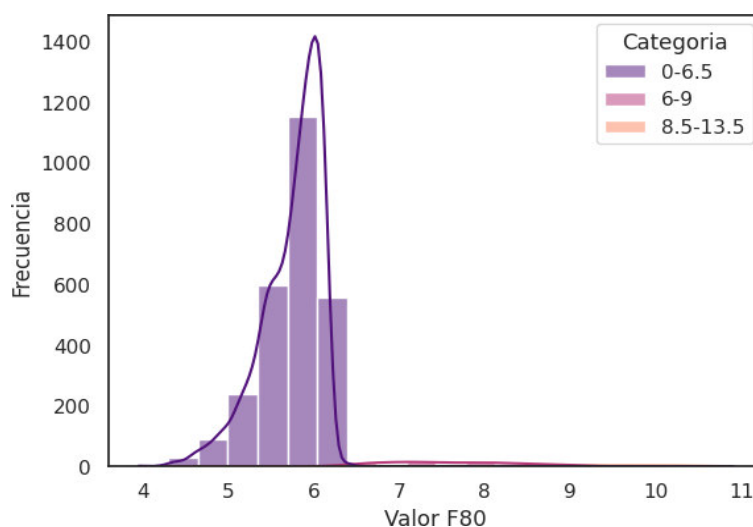


#### 7.2.4. Aumentar Mucho

En la Figura 74 se observa que, en presencia de un mineral con una granulometría menor a los 6.5 mm; el FIS “aumentó mucho” el tonelaje.

**Figura 74**

*Histograma del F80 cuando el Tonelaje Aumentó Mucho*



Asimismo, en la Figura 75 y en la Figura 76 se observa, que cada vez que el FIS ordenó “aumentar mucho” el tonelaje, la tensión de las corrientes de las bombas de descarga del Metso 1 y del Metso 2 se mantuvieron en el rango normal.

**Figura 75**

*Histograma de la Corr\_M1 cuando el Tonelaje Aumentó Mucho*

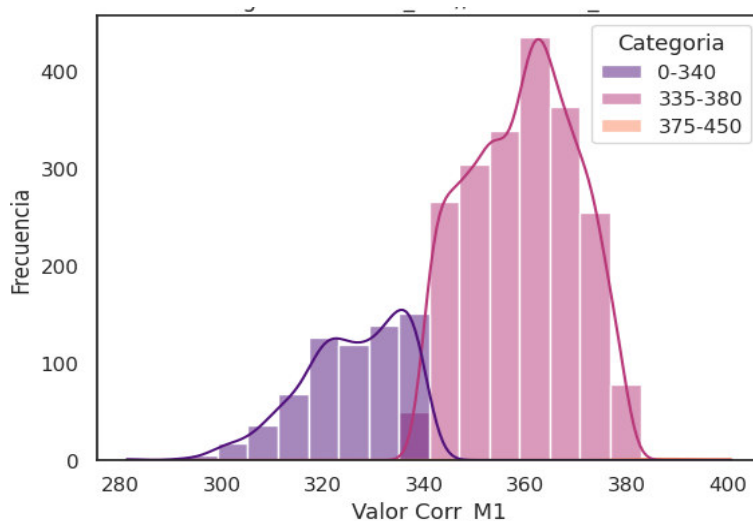
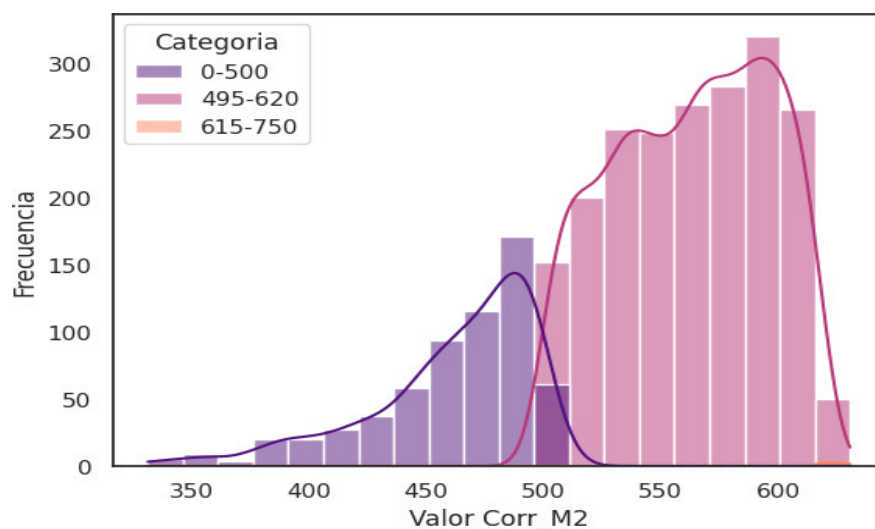


**Figura 76**

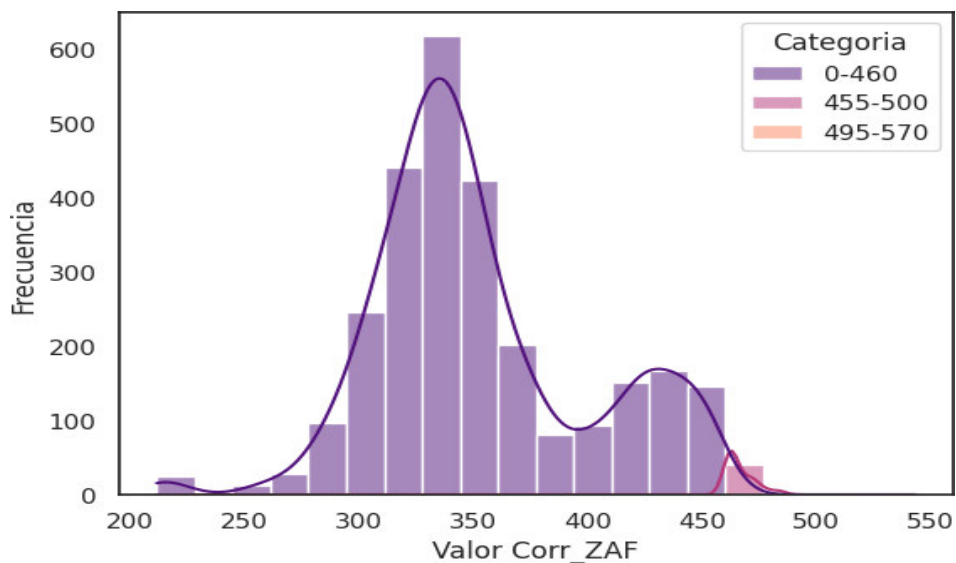
*Histograma de la Corr\_M2 cuando el Tonelaje Aumentó Mucho*



Y, en la Figura 77, se observa que, para el caso de la tensión de la bomba de alimentación hacia las ZAF, esta se mantuvo en todo momento en el rango bajo.

**Figura 77**

*Histograma de la Corr\_ZAF cuando el TonELAJE Aumentó Mucho*



Por lo tanto, pone en evidencia que el FIS propuesto garantiza la maximización de tonelaje cuando se presenta una granulometría fina, y aún con el incremento del tonelaje, las tensiones de las bombas del circuito se mantienen en rangos aceptables.

## 8. CONCLUSIONES

- a) Cuando el alimento presentó una granulometría fina (3.5 mm a 6.5 mm), el FIS:
  - a. Incrementó el tonelaje de alimentación a molienda de 510 t/h a 550 t/h. Alcanzando el tonelaje objetivo de la U.M.
  - b. Redujo la cantidad de agua consumida de 180 m<sup>3</sup>/h a 170 m<sup>3</sup>/h. Sin embargo, no consiguió llegar al flujo de agua objetivo de 150 m<sup>3</sup>/h.
  - c. Engrosó el tamaño de partícula P80 de 585  $\mu$ m a 607  $\mu$ m. Esto debido a que, priorizó incrementar la cantidad de mineral procesado a costa de la granulometría.
- b) Cuando el alimento presentó una granulometría normal (6.5 mm a 9.5 mm), el FIS:
  - a. Incrementó el tonelaje de alimentación a molienda de 510 t/h a 517 t/h. Sin embargo, no consiguió llegar al tonelaje objetivo de 550 t/h.
  - b. Redujo la cantidad de agua consumida de 180 m<sup>3</sup>/h a 160 m<sup>3</sup>/h. Sin embargo, no consiguió llegar al flujo de agua objetivo de 150 m<sup>3</sup>/h.
  - c. Mantuvo el tamaño de partícula P80 en 585  $\mu$ m.
- c) Cuando el alimento presentó una granulometría gruesa (9.5 mm a 13.5 mm), el FIS:
  - a. Redujo el tonelaje de alimentación a molienda de 510 t/h a 463 t/h. Esto debido a que, priorizó reducir el tamaño de partícula P80 a costa del tonelaje procesado.
  - b. Redujo la cantidad de agua consumida de 180 m<sup>3</sup>/h a 143 m<sup>3</sup>/h. Alcanzado un valor cercano al flujo de agua objetivo de 150 m<sup>3</sup>/h.
  - c. Redujo el tamaño de partícula P80 de 585  $\mu$ m a 564  $\mu$ m.

## **9. RECOMENDACIONES**

- a) Se recomienda realizar un reajuste del tiempo de respuesta del FIS desarrollado para mejorar su desempeño.
- b) El tipo de técnica empleada requiere de un reentrenamiento en caso se realice algún cambio significativo en el proceso. Se recomienda probar con el uso de una lógica neuro difusa, este tipo de algoritmo conlleva un grado de complejidad mayor, pero permitiría que el FIS pueda auto ajustar sus valores sin intervención humana.
- c) Para el cálculo del P80, la investigación utiliza el modelo de los Índices de Trabajo de Bond; se recomienda utilizar un modelo alternativo como el modelo de Austin o un modelo basado en redes neuronales, esto permitiría tener un P80 más exacto.
- d) Se recomienda replicar esta estrategia de control basada en lógica, incluyendo las variables: nivel de cajón y densidad de pulpa. Ya que estos instrumentos de control permitirían que los valores obtenidos por el FIS sean más precisos. Y su vez, automatizar el proceso en su totalidad.
- e) Se recomienda replicar esta estrategia de control basada en lógica difusa en un molino con velocidad regulable, esto permitiría cuantificar un impacto en ahorro energético.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, A. (2021). Modelamiento y diseño de un sistema de control de las variables críticas de un molino semiautógeno mediante un sistema experto basado en control MPC y lógica difusa. [Tesis de postgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/21199>
- Austin, L. G. (1990). A mill power equation for SAG mills. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 7(1). p. 49 – 57.
- Ayala, S. (2020). Estadística. Cuartiles, Deciles, Percentiles. Escuela Superior Tepeji del Río. [Archivo PDF]. [https://www.uaeh.edu.mx/division\\_academica/educacion-media/repositorio/2010/6- semestre/estadistica/cuartiles-deciles-y-ercentiles.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/division_academica/educacion-media/repositorio/2010/6- semestre/estadistica/cuartiles-deciles-y-ercentiles.pdf)
- Bascur, O. y Concha, F. (2024). *The Engineering Science of Mineral Processing. A Fundamental and Practical Approach*. Taylor & Francis Group.
- Bond, F. C. (1952). Third theory of comminution. *Transaction of the AIME*. 193. p. 484 – 494.
- Candiotti, S., Montaña, L., Barja, F., Charca, S., Quineche, L. y Flores, C. (2020). Estudio del arte de sistemas de molienda polimetálica. Universidad de Ingeniería y Tecnología.
- Cipriano, A. (2010). Industrial Products for Advanced Control of Mineral Processing Plants. En Sbárbaro, D. y Del Villar, R. (Ed.), *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants* (pp. 287 – 306). Springer.
- Gandhi, M. (2019). ¿Qué es un sistema de control? Recuperado de: <https://www.autycom.com/que-es-un-sistema-de-control/>
- Granados, F. (2018). Diseño de una estrategia de control multivariable para el incremento del régimen de carga de mineral en el área de Molienda de una planta concentradora usando lógica difusa. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/15784>

- Guerrero, J. (2017). Reducción del consumo energético de un molino de bolas mediante un sistema de control automático para la velocidad de rotación del molino. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/12195>
- Herbst, J. y Fuerstenau, D. (1980). Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models. *International Journal of Mineral Processing*. 7(1). p. 1 – 31.
- Hernández, J., Espinosa, F., Rodríguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S. y Bermúdez, V. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*. 37(5). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=55963207025>
- Hogg, R. y Fuerstenau, D. W. (1972). Power relationships for tumbling mills. *SME/AIME*. 252. p. 418 – 423.
- Huaman Huacho, H. R. (2019). Implementación de un sistema de control basado en lógica difusa para el proceso de molienda. [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Tecnológica del Perú]. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/2374>
- Khodadadi, H. y Ghadiri, H. (2019). Fuzzy Logic Self-Tuning PID Controller Design for Ball Mill Grinding Circuits Using an Improved Disturbance Observer. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 36(1), 1075–1090. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-0098-y>
- Lopez, S. (2021). Apoyo en el diseño y parametrización de un control avanzado de proceso (APC) para un proceso petroquímico basado en analítica de datos. [Informe final de pasantía, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/28248/LopezBlancoSamuelRaul2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Ninam, K., Wyk, B. y Tu, C. (2018). Fuzzy Logic Non-Linear Model Predictive Control of the Grinding Process in Ball Mills. 2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICONIC.2018.8601265>
- Mathworks. (2020). Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide.
- Modesto, J. y Melo, T. (2017). Controlador fuzzy multivariável aplicado a um simulador de circuito de moagem. 18º Simpósio de Mineração, 47(18), 217 - 222. <https://doi.org/10.5151/2594-357X-30498>
- Morrell, S. (2004). An alternative energy–size relationship to that proposed by Bond for the design and optimization of grinding circuits. International journal of mineral processing. 74(14). p. 133 – 141.
- Perez, M., Perez, A. y Perez, E. (2007). Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo.
- Quiroz, I. (1995). Ingeniería Metalúrgica: Operaciones unitarias en procesamiento de minerales. Primera edición.
- Singh, H. y Ahmad, Y. (2020). Deep Neuro – Fuzzy Systems with Python. With caase studies and applications from the industry. Apress.
- Sivnandam, S. N., Sumathi, S. y Deepa, S.N. (2007). Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB. Springer.
- Stojiljković, M. (2020). NumPy, SciPy, and pandas: Correlation With Python. <https://realpython.com/numpy-scipy-pandas-correlation-python/#:~:text=Correlation%20coefficients%20quantify%20the%20association,comprehensive%2C%20and%20well%2Ddocumented.>
- Wei, D. y Craig, I. K. (2009). Grinding mill circuits - a survey of control and economic concerns. International Journal of Mineral Processing. 90(1). p. 56 – 66.

- Whiten, W. J. (1974). A matrix theory of comminution machines. Chemical Engineering Science. 29(2). p. 589 – 599
- Wills, B. y Finch, J. (2016). Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Eighth Edition.
- Yu, P. (2016). A Generic Dynamic Model Structure for Tumbling Mills. [Tesis de doctorado, Queensland University].
- Zou, M., Yi, J., Yang, C., Liao, Q., Xiong, W. y Wang, X. (2002). Adaptive Fuzzy Logic Control for Grinding Process Based on Grinding Sound Trend. IFAC-PapersOnLine, 55(21), 120-125.  
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.254>

## 11. ANEXOS

### 11.1. Definición de Términos

La presente investigación contempla el siguiente marco conceptual:

- a) *Molienda*. Quiroz (1986) define la molienda como aquella operación unitaria, mediante la cual se realiza una reducción de tamaños en rangos finos para preparar al mineral.
- b) *Molino*. Wills y Finch (2016) lo define como un recipiente cilíndrico de acero que contiene una carga de cuerpos aplastantes sueltos, y que pueden moverse libremente.
- c) *Optimización*. Chen et al. (2007) afirman que la optimización de la molienda de bolas consiste en maximizar el flujo de mineral procesado y el flujo de agua consumida manteniendo un tamaño de partícula de producto adecuado.
- d) *Tonelaje*. Granados (2018) hace referencia al flujo de alimentación del mineral al molino medido en toneladas por hora (t/h).
- e) *Agua*. Granados (2018) hace referencia al caudal de agua que ingresa en la alimentación y en la descarga del molino.
- f) *F80*. Candiotti et al. (2020) mencionan que un valor asociado al tamaño que representa el 80% del material alimentado.
- g) *P80*. Candiotti et al. (2020) mencionan que es un valor asociado al tamaño que representa al 80% del producto.
- h) *W*. Candiotti et al. (2020) menciona que denota la energía específica consumida durante el proceso de molienda.
- i) *W<sub>i</sub>*. Candiotti et al. (2020) menciona que el Work Index ( $W_i$ ) es un parámetro que denota la resistencia del material a ser molido.

- j) *Amperaje*. Granados (2018) hace referencia al amperaje del motor de las bombas presentes en el circuito de molienda.
- k) *Sistemas de control*. Pérez et al. (2007) los definen como un arreglo de componentes físicos conectados de tal manera puedan comandar, dirigir o regular un proceso.
- l) *Lógica difusa*. Mathworks (2020) afirma que es un método que interpreta los valores a través de un vector de entrada y, en base a un conjunto de reglas de tipo si – entonces, asigna valores un vector salida.
- m) *Conjuntos difusos*. Singh y Ahmad (2020) mencionan que este tipo de conjuntos tienen un grado de membresía entre 0 y 1, representando que un elemento puede pertenecer parcialmente a un conjunto dado.
- n) *Funciones de membresía*. Mathworks (2020) menciona que es una curva que define cómo a cada punto en el espacio de entrada se le asigna a un valor entre 0 y 1.
- o) *Reglas difusas*. Singh y Ahmad (2020) mencionan que es el proceso de incorporar situaciones condicionales.
- p) *FIS*. Singh y Ahmad (2020) mencionan que un Sistema de Inferencia Difusa (FIS) busca imitar la forma en la que un humano resuelve cualquier tipo de problema mediante un razonamiento específico.
- q) *Defuzzificación*. Singh y Ahmad (2020) mencionan que es el proceso de convertir un conjunto difuso en conjunto de datos convencional.

## 11.2. Hoja de Registro de Observación

Las Tablas detallan la información obtenida observando la rutina de los operadores:

**Tabla 72**

*Hoja de Registro de Observación N°1: Comportamientos operacionales, Día 1*

| <i><b>Criterio de observación</b></i>                          | <i><b>Descripción</b></i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variables utilizadas para el control de molienda               | Se observó que el operador de turno controló principalmente: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 3211 (descarga del Metso 1)</li> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 30331 (descarga del Metso 2)</li> <li>▪ Tensión de las corrientes de las bombas 2A y 2B (alimentación a las ZAF)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Variables regulables en el proceso de molienda                 | En función de las condiciones operacionales el operador modificaba: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El tonelaje de alimentación al Metso 1.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Actividades de los operadores asociadas al control de molienda | Se observó que durante la guardia el operador principalmente realizó las siguientes actividades: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Observar tensión de corriente de la bomba 3211 para examinar la densidad de pulpa era adecuada. Si la tensión era baja, el operador asumía que la densidad era adecuada.</li> <li>▪ Observar la tensión de la corriente de la bomba 30331, si esta llegaba a su límite nominal inmediatamente disminuía el tonelaje de alimentación.</li> <li>▪ Sugerir al operador de campo que verifique la densidad de pulpa a través de un muestreo y con la balanza Marcy, en caso la densidad de la pulpa no esté adecuada, configura un nuevo valor de ingreso de caudal de agua.</li> </ul> |
| Eventos atípicos en el control de molienda                     | Sin eventos atípicos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

**Tabla 73**

*Hoja de Registro de Observación N°2: Comportamientos operacionales, Día 2*

| <i><b>Criterio de observación</b></i>                          | <i><b>Descripción</b></i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variables utilizadas para el control de molienda               | Se observó que el operador de turno controló principalmente: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 3211 (descarga del Metso 1)</li> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 30332 (descarga del Metso 2)</li> <li>▪ Tensión de las corrientes de las bombas 2A y 2B (alimentación a las ZAF)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Variables regulables en el proceso de molienda                 | En función de las condiciones operacionales el operador modificaba: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El tonelaje de alimentación al Metso 1.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Actividades de los operadores asociadas al control de molienda | Se observó que durante la guardia el operador principalmente realizó las siguientes actividades: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Observar tensión de corriente de la bomba 3211 para examinar si la densidad de pulpa era adecuada. Si la tensión era baja, el operador asumía que la densidad era adecuada.</li> <li>▪ Observar la tensión de la corriente de la bomba 30332, si esta llegaba a su límite nominal inmediatamente disminuía el tonelaje de alimentación.</li> <li>▪ Configurar el valor del tonelaje en función de las condiciones operacionales de la planta. Si paraba el otro circuito de molienda, el operador configuraba un tonelaje de alimentación superior a las 620 t/h, muy por encima del valor de alimentación habitual.</li> </ul> |
| Eventos atípicos en el control de molienda                     | Se produjo un evento atípico por rotura de parrillas en chancado, la granulometría de ingreso a molienda era gruesa, eso generó que disminuyeran el tonelaje de alimentación.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

**Tabla 74***Hoja de Registro de Observación N°3: Comportamientos operacionales, Día 3*

| <b><i>Criterio de observación</i></b>                          | <b><i>Descripción</i></b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variables utilizadas para el control de molienda               | Se observó que el operador de turno controló principalmente: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 3212 (descarga del Metso 1)</li> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 30331 (descarga del Metso 2)</li> <li>▪ Tensión de las corrientes de las bombas 2A y 2B (alimentación a las ZAF)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Variables regulables en el proceso de molienda                 | En función de las condiciones operacionales el operador modificaba: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El tonelaje de alimentación al Metso 1.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Actividades de los operadores asociadas al control de molienda | Se observó que durante la guardia el operador principalmente realizó las siguientes actividades: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Observar tensión de corriente de la bomba 3212 para examinar la densidad de pulpa. Entro en uso la bomba de stand by debido a fallo de la bomba principal.</li> <li>▪ Observar la tensión de corriente de la bomba 30331, se presentó un alza en la tendencia, el operador indicó que era debido a un incremento de la carga circulante en el circuito, ya que eso sobre exigía al motor de la bomba.</li> <li>▪ Observar la tensión de las corrientes de las bombas 2A y 2B, se observó un alza en la tendencia, un operador fue a campo y reguló manualmente el pistón para redistribuir el esfuerzo. El operador comenta que la acción correctiva en esas bombas es manual.</li> </ul> |
| Eventos atípicos en el control de molienda                     | Se produjo un evento atípico debido a la disponibilidad de mineral, el stockpile de finos no tenía suficiente mineral, el operador tuvo que disminuir el tonelaje de alimentación al circuito primario a 420 t/h.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

**Tabla 75***Hoja de Registro de Observación N°4: Comportamientos operacionales, Día 4*

| <b><i>Criterio de observación</i></b>                          | <b><i>Descripción</i></b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variables utilizadas para el control de molienda               | Se observó que el operador de turno controló principalmente: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 3212 (descarga del Metso 1)</li> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 30331 (descarga del Metso 2)</li> <li>▪ Tensión de las corrientes de las bombas 2A y 2B (alimentación a las ZAF)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Variables regulables en el proceso de molienda                 | En función de las condiciones operacionales el operador modificaba: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El tonelaje de alimentación al Metso 1.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Actividades de los operadores asociadas al control de molienda | Se observó que durante la guardia el operador principalmente realizó las siguientes actividades: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Observar tensión de corriente de la bomba 3212 para examinar la densidad de pulpa y desempeño del molino Metso 1. El operador comentó que cuando ingresa mineral grueso se observa una leve alza en la tendencia.</li> <li>▪ El operador también utilizó la tendencia de la potencia consumida por el motor del Metso 1, para corroborar el impacto del ingreso del alimento grueso.</li> <li>▪ Observar la tensión de corriente de la bomba 30331.</li> <li>▪ Observar la tensión de las corrientes de las bombas 2A y 2C, entró en funcionamiento la bomba de stand by por mantenimiento preventivo de la bomba 2B.</li> </ul> |
| Eventos atípicos en el control de molienda                     | Se produjo evento atípico debido a que una de las ZAF estuvo inoperativa, eso generó que se tuviera que disminuir el flujo de alimentación hacia las ZAF para controlar a la carga circulante del circuito, el operador redujo el tonelaje de alimentación hacia el Metso 1.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

**Tabla 76***Hoja de Registro de Observación N°5: Comportamientos operacionales, Día 5*

| <b><i>Criterio de observación</i></b>                          | <b><i>Descripción</i></b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variables utilizadas para el control de molienda               | Se observó que el operador de turno controló principalmente: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 3211 (descarga del Metso 1)</li> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 30331 (descarga del Metso 2)</li> <li>▪ Tensión de las corrientes de las bombas 2A y 2B (alimentación a las ZAF)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Variables regulables en el proceso de molienda                 | En función de las condiciones operacionales el operador modificaba: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El tonelaje de alimentación al Metso 1.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Actividades de los operadores asociadas al control de molienda | Se observó que durante la guardia el operador principalmente realizó las siguientes actividades: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Observar tensión de corriente de la bomba 3211. Se produjo un rebalse de la pulpa en el cajón de descarga del Metso 1, se pudo detectar oportunamente debido al alza de la tensión de la bomba. El operador comentó que utiliza este valor en reemplazo de un sensor de nivel.</li> <li>▪ Observar la tensión de corriente de la bomba 30331, durante toda la guardia se mantuvo en un valor elevado, sin llegar al nominal, debido a que el mineral alimentado ese día fue grueso.</li> <li>▪ Observar la tensión de las corrientes de las bombas 2A y 2B, también se mantuvieron en un rango alto debido a la granulometría del alimento. El operador mantuvo el tonelaje de alimentación para llegar a la meta diaria.</li> <li>▪ El operador comentó que para el cálculo de caudal de agua utiliza un factor de conversión L/S entre 0.28 a 0.31.</li> </ul> |
| Eventos atípicos en el control de molienda                     | Sin eventos atípicos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

**Tabla 77***Hoja de Registro de Observación N°6: Comportamientos operacionales, Día 6*

| <b><i>Criterio de observación</i></b>                          | <b><i>Descripción</i></b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variables utilizadas para el control de molienda               | Se observó que el operador de turno controló principalmente: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 3211 (descarga del Metso 1)</li> <li>▪ Tensión de la corriente de la bomba 30331 (descarga del Metso 2)</li> <li>▪ Tensión de las corrientes de las bombas 2A y 2B (alimentación a las ZAF)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Variables regulables en el proceso de molienda                 | En función de las condiciones operacionales el operador modificaba: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El tonelaje de alimentación al Metso 1.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Actividades de los operadores asociadas al control de molienda | Se observó que durante la guardia el operador principalmente realizó las siguientes actividades: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Observar tensión de corriente de la bomba 3211. Debido a las paradas y la disminución de tonelaje de los días anteriores, el operador tuvo que incrementar la cantidad de alimento hasta 580 t/h, utilizó como indicador clave la tensión de la 3211, ya que si se mantenía en un valor que no llegara al nomina, no habría necesidad de disminuir el tonelaje.</li> <li>▪ Observar la tensión de corriente de la bomba 30331. El operador menciona que el circuito tiene un tiempo de residencia, el efecto del aumento o disminución del tonelaje se manifiesta entre 10 a 15 min en esta bomba.</li> <li>▪ Observar la tensión de las corrientes de las bombas 2A y 2B. El operador mencionó que un alza en la tensión también puede indicar que el tamizado se está realizando de forma ineficiente.</li> <li>▪ El operado utilizó el factor 0.30 para calcular el caudal de agua alimentado en función del tonelaje que ingresa al molino.</li> </ul> |
| Eventos atípicos en el control de molienda                     | Sin eventos atípicos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

### 11.3. Cuestionarios

Para la realización de encuestas hacia los operadores y jefes de turno, se utilizaron:

**Tabla 78**

*Cuestionario 1: Validar las Variables Disponibles asociadas a la Molienda*

| <i>Variable operacional</i>                       | <i>Sí</i> | <i>No</i> |
|---------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Granulometría (F80)                               | X         |           |
| Potencia del molino Metso 1                       | X         |           |
| Presión en los descansos en el lado carga         | X         |           |
| Presión en los descansos en el lado descarga      | X         |           |
| Tensión de la bomba de descarga del Metso 1       | X         |           |
| Tensión de la bomba de descarga del Metso 2       | X         |           |
| Tensión de la bomba de alimentación hacia las ZAF | X         |           |
| Potencia del molino Metso 2                       | X         |           |
| Nivel de cajón                                    |           | X         |
| Densidad de pulpa                                 |           | X         |

**Tabla 79**

*Cuestionario 2: Validar las Variables Utilizadas en el Control de Molienda*

| <i>Variable operacional</i>                       | <i>Sí</i> | <i>No</i> |
|---------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Granulometría (F80)                               | X         |           |
| Potencia del molino Metso 1                       |           | X         |
| Presión en los descansos en el lado carga         |           | X         |
| Presión en los descansos en el lado descarga      |           | X         |
| Tensión de la bomba de descarga del Metso 1       | X         |           |
| Tensión de la bomba de descarga del Metso 2       | X         |           |
| Tensión de la bomba de alimentación hacia las ZAF | X         |           |
| Potencia del molino Metso 2                       |           | X         |
| Nivel de cajón                                    |           | X         |
| Densidad de pulpa                                 |           | X         |

**Tabla 80***Cuestionario 3: Validar los Rangos para cada Variable Operacional*

| <i>Valores de entrada hacia el FIS</i>                  | <i>Intervalo 1</i> |            | <i>Intervalo 2</i> |            | <i>Intervalo 3</i> |            |
|---------------------------------------------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|------------|
|                                                         | <i>L.I</i>         | <i>L.S</i> | <i>L.I</i>         | <i>L.S</i> | <i>L.I</i>         | <i>L.S</i> |
| Granulometría F80 – (mm)                                | 3                  | 6.5        | 6.5                | 9          | 9                  | 13.5       |
| Tensión de la bomba de descarga del Metso 1 – (A)       | 260                | 340        | 340                | 380        | 380                | 450        |
| Tensión de la bomba de descarga del Metso 2 – (A)       | 330                | 500        | 500                | 620        | 620                | 750        |
| Tensión de la bomba de alimentación hacia las ZAF – (A) | 210                | 460        | 460                | 500        | 500                | 590        |

Se adjuntan los resultados de los cuestionarios realizados hacia los operadores:

**Tabla 81***Rangos Operacionales del F80*

| <i>Granulometría F80 – (mm)</i> | <i>Intervalo 1</i> |            | <i>Intervalo 2</i> |            | <i>Intervalo 3</i> |            |
|---------------------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|------------|
|                                 | <i>L.I</i>         | <i>L.S</i> | <i>L.I</i>         | <i>L.S</i> | <i>L.I</i>         | <i>L.S</i> |
| Operador 1 – Turno A            | 2.5                | 7.5        | 7.5                | 9          | 9                  | 14         |
| Operador 2 – Turno A            | 2.5                | 7          | 7                  | 8.5        | 8.5                | 12         |
| Operador 3 – Turno A            | 3                  | 6          | 6                  | 9          | 9                  | 13         |
| Operador 1 – Turno B            | 3.5                | 6          | 6                  | 9          | 9                  | 14         |
| Operador 2 – Turno B            | 3                  | 6.5        | 6.5                | 9.5        | 9.5                | 14         |
| Operador 3 – Turno B            | 3                  | 6.5        | 6.5                | 9          | 9                  | 14         |
| Jefe de Guardia                 | 3.5                | 6          | 6                  | 9          | 9                  | 13.5       |
| Promedio                        | 3                  | 6.5        | 6.5                | 9          | 9                  | 13.5       |

**Tabla 82***Rangos Operacionales de la Corr\_BMetso1*

| <i>Tensión de la bomba de descarga del Metso 1 – (A)</i> | <i>Intervalo 1</i> |            | <i>Intervalo 2</i> |            | <i>Intervalo 3</i> |            |
|----------------------------------------------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|------------|
|                                                          | <i>L.I</i>         | <i>L.S</i> | <i>L.I</i>         | <i>L.S</i> | <i>L.I</i>         | <i>L.S</i> |
| Operador 1 – Turno A                                     | 260                | 335        | 335                | 385        | 385                | 450        |
| Operador 2 – Turno A                                     | 265                | 330        | 330                | 385        | 385                | 455        |
| Operador 3 – Turno A                                     | 260                | 335        | 335                | 365        | 365                | 455        |
| Operador 1 – Turno B                                     | 265                | 340        | 340                | 390        | 390                | 450        |
| Operador 2 – Turno B                                     | 255                | 345        | 345                | 395        | 395                | 445        |
| Operador 3 – Turno B                                     | 250                | 345        | 345                | 380        | 380                | 440        |
| Jefe de Guardia                                          | 265                | 350        | 350                | 365        | 365                | 460        |
| Promedio                                                 | 260                | 340        | 340                | 380        | 380                | 450        |

**Tabla 83***Rangos Operacionales de la Corr\_BMetso2*

| <i>Tensión de la bomba de<br/>descarga del Metso 2 – (A)</i> | <i>Intervalo 1</i> |           | <i>Intervalo 2</i> |           | <i>Intervalo 3</i> |           |
|--------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
|                                                              | <i>LI</i>          | <i>LS</i> | <i>LI</i>          | <i>LS</i> | <i>LI</i>          | <i>LS</i> |
| Operador 1 – Turno A                                         | 315                | 490       | 490                | 625       | 625                | 740       |
| Operador 2 – Turno A                                         | 320                | 490       | 490                | 625       | 625                | 750       |
| Operador 3 – Turno A                                         | 335                | 500       | 500                | 620       | 620                | 750       |
| Operador 1 – Turno B                                         | 330                | 500       | 500                | 620       | 620                | 755       |
| Operador 2 – Turno B                                         | 335                | 505       | 505                | 610       | 610                | 750       |
| Operador 3 – Turno B                                         | 340                | 505       | 505                | 620       | 620                | 750       |
| Jefe de Guardia                                              | 335                | 510       | 510                | 620       | 620                | 755       |
| Promedio                                                     | 330                | 500       | 500                | 620       | 620                | 750       |

**Tabla 84***Rangos Operacionales de la Corr\_ZAF*

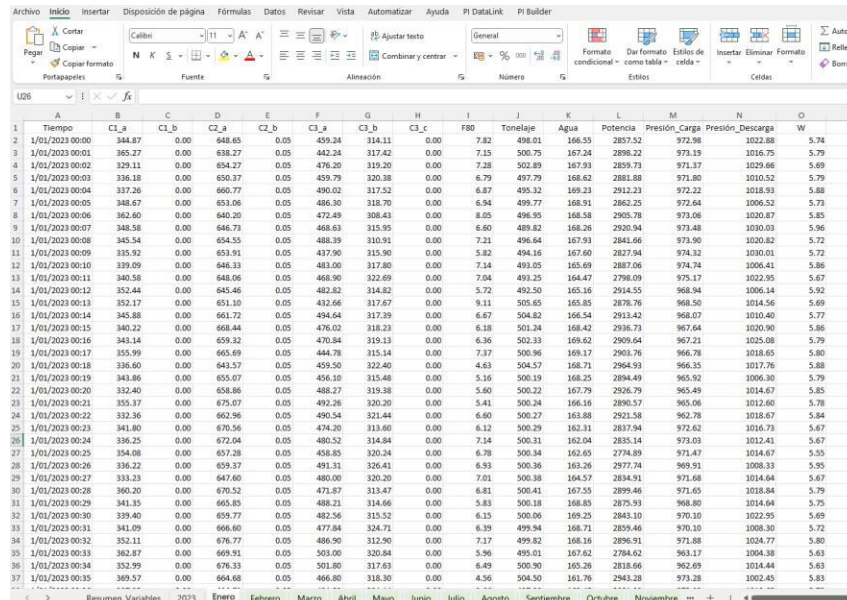
| <i>Tensión de la bomba de<br/>alimentación hacia las ZAF –<br/>(A)</i> | <i>Intervalo 1</i> |           | <i>Intervalo 2</i> |           | <i>Intervalo 3</i> |           |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
|                                                                        | <i>LI</i>          | <i>LS</i> | <i>LI</i>          | <i>LS</i> | <i>LI</i>          | <i>LS</i> |
| Operador 1 – Turno A                                                   | 200                | 450       | 450                | 495       | 495                | 590       |
| Operador 2 – Turno A                                                   | 205                | 460       | 460                | 495       | 495                | 580       |
| Operador 3 – Turno A                                                   | 210                | 465       | 465                | 500       | 500                | 590       |
| Operador 1 – Turno B                                                   | 210                | 465       | 465                | 500       | 500                | 590       |
| Operador 2 – Turno B                                                   | 215                | 460       | 460                | 505       | 505                | 600       |
| Operador 3 – Turno B                                                   | 215                | 465       | 465                | 505       | 505                | 590       |
| Jefe de Guardia                                                        | 215                | 455       | 455                | 500       | 500                | 590       |
| Promedio                                                               | 210                | 460       | 460                | 500       | 500                | 590       |

## 11.4. Base de Datos Operacional

Como se mencionó durante el desarrollo de la investigación, la base de datos consistió en mediciones tomadas con una frecuencia de un minuto durante todo el periodo 2023. Al ser una base tan extensa no es posible adjuntarla en este documento, sin embargo, la Figura 80 muestra una imagen referencial, y a también se adjunta el [LINK](#) para consultar la información empleada:

**Figura 78**

*Imagen Referencial de la Base de Datos Operacional*



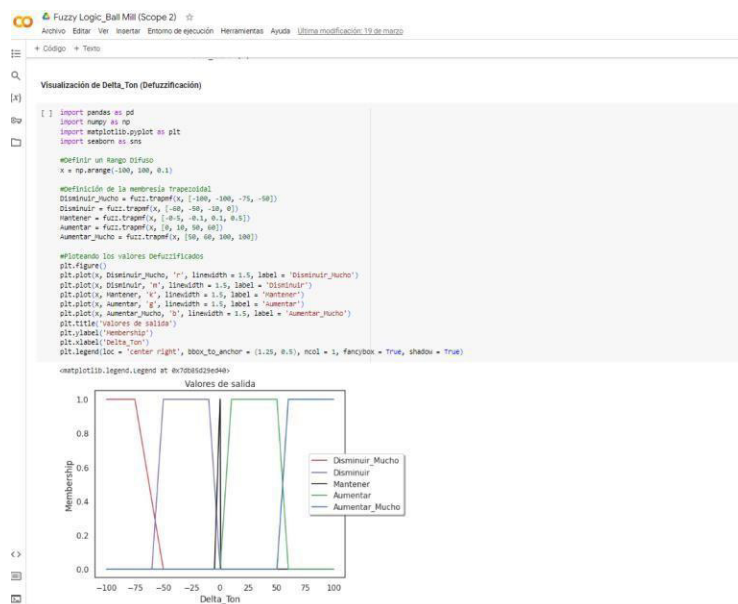
|    | A               | B      | C    | D      | E    | F      | G      | H    | I    | J      | K        | L       | M        | N             | O                | P |
|----|-----------------|--------|------|--------|------|--------|--------|------|------|--------|----------|---------|----------|---------------|------------------|---|
|    | Tiempo          | C1_a   | C1_b | C1_c   | C2_a | C2_b   | C3_a   | C3_b | C3_c | F80    | Tonelaje | Agua    | Potencia | Presión_Carga | Presión_Descarga | W |
| 1  | 1/01/2023 00:00 | 344.87 | 0.00 | 648.65 | 0.05 | 459.24 | 314.11 | 0.00 | 7.82 | 498.01 | 166.55   | 2857.52 | 972.98   | 1022.88       | 5.74             |   |
| 2  | 1/01/2023 00:01 | 365.27 | 0.00 | 638.27 | 0.05 | 442.24 | 317.42 | 0.00 | 7.15 | 500.75 | 167.24   | 2898.22 | 973.19   | 1016.75       | 5.79             |   |
| 3  | 1/01/2023 00:02 | 329.11 | 0.00 | 654.27 | 0.05 | 476.20 | 319.20 | 0.00 | 7.28 | 502.89 | 167.93   | 2859.73 | 971.37   | 1029.66       | 5.69             |   |
| 4  | 1/01/2023 00:03 | 336.18 | 0.00 | 650.37 | 0.05 | 459.79 | 320.38 | 0.00 | 6.79 | 497.79 | 166.62   | 2861.88 | 971.80   | 1030.52       | 5.79             |   |
| 5  | 1/01/2023 00:04 | 337.26 | 0.00 | 660.77 | 0.05 | 490.02 | 317.52 | 0.00 | 6.87 | 495.32 | 169.23   | 2912.23 | 972.22   | 1018.93       | 5.88             |   |
| 6  | 1/01/2023 00:05 | 348.67 | 0.00 | 653.06 | 0.05 | 486.30 | 318.70 | 0.00 | 6.94 | 499.77 | 168.91   | 2862.25 | 972.64   | 1006.52       | 5.73             |   |
| 7  | 1/01/2023 00:06 | 362.60 | 0.00 | 640.20 | 0.05 | 472.49 | 308.43 | 0.00 | 8.05 | 496.95 | 168.58   | 2905.78 | 973.06   | 1020.87       | 5.85             |   |
| 8  | 1/01/2023 00:07 | 348.58 | 0.00 | 646.73 | 0.05 | 468.63 | 315.95 | 0.00 | 6.80 | 489.82 | 168.26   | 2920.94 | 973.48   | 1030.03       | 5.96             |   |
| 9  | 1/01/2023 00:08 | 345.54 | 0.00 | 654.55 | 0.05 | 488.39 | 310.91 | 0.00 | 7.21 | 496.64 | 167.93   | 2841.66 | 973.90   | 1020.82       | 5.72             |   |
| 10 | 1/01/2023 00:09 | 335.92 | 0.00 | 653.91 | 0.05 | 437.90 | 315.90 | 0.00 | 5.82 | 494.16 | 167.60   | 2827.94 | 974.32   | 1030.01       | 5.72             |   |
| 11 | 1/01/2023 00:10 | 339.09 | 0.00 | 646.33 | 0.05 | 483.00 | 317.80 | 0.00 | 7.14 | 493.05 | 165.69   | 2887.06 | 974.74   | 1006.41       | 5.86             |   |
| 12 | 1/01/2023 00:11 | 340.58 | 0.00 | 648.06 | 0.05 | 468.90 | 322.69 | 0.00 | 7.04 | 493.25 | 164.47   | 2798.09 | 975.17   | 1022.95       | 5.67             |   |
| 13 | 1/01/2023 00:12 | 352.44 | 0.00 | 645.46 | 0.05 | 482.82 | 314.82 | 0.00 | 5.72 | 492.50 | 165.18   | 2914.55 | 968.94   | 1006.14       | 5.92             |   |
| 14 | 1/01/2023 00:13 | 352.17 | 0.00 | 653.10 | 0.05 | 432.66 | 317.67 | 0.00 | 9.11 | 505.65 | 165.85   | 2878.76 | 968.50   | 1014.56       | 5.69             |   |
| 15 | 1/01/2023 00:14 | 345.88 | 0.00 | 661.72 | 0.05 | 494.64 | 317.39 | 0.00 | 6.67 | 504.82 | 166.54   | 2913.42 | 968.07   | 1010.40       | 5.77             |   |
| 16 | 1/01/2023 00:15 | 340.22 | 0.00 | 668.44 | 0.05 | 476.02 | 318.23 | 0.00 | 6.18 | 501.24 | 168.42   | 2936.73 | 967.64   | 1020.90       | 5.86             |   |
| 17 | 1/01/2023 00:16 | 343.14 | 0.00 | 659.32 | 0.05 | 470.84 | 319.13 | 0.00 | 6.36 | 502.33 | 169.62   | 2909.64 | 967.21   | 1025.08       | 5.79             |   |
| 18 | 1/01/2023 00:17 | 355.99 | 0.00 | 665.69 | 0.05 | 444.78 | 315.14 | 0.00 | 7.37 | 500.96 | 169.17   | 2903.76 | 966.78   | 1018.65       | 5.80             |   |
| 19 | 1/01/2023 00:18 | 336.60 | 0.00 | 643.57 | 0.05 | 459.50 | 322.40 | 0.00 | 4.63 | 504.57 | 168.71   | 2964.93 | 966.35   | 1017.76       | 5.88             |   |
| 20 | 1/01/2023 00:19 | 343.86 | 0.00 | 655.07 | 0.05 | 456.19 | 315.48 | 0.00 | 5.16 | 500.19 | 168.25   | 2894.49 | 965.92   | 1006.30       | 5.79             |   |
| 21 | 1/01/2023 00:20 | 332.40 | 0.00 | 658.86 | 0.05 | 488.27 | 319.38 | 0.00 | 5.80 | 500.22 | 167.79   | 2926.79 | 965.49   | 1014.67       | 5.85             |   |
| 22 | 1/01/2023 00:21 | 355.17 | 0.00 | 675.07 | 0.05 | 492.38 | 320.20 | 0.00 | 5.41 | 500.24 | 166.18   | 2890.57 | 965.06   | 1012.60       | 5.78             |   |
| 23 | 1/01/2023 00:22 | 332.36 | 0.00 | 662.94 | 0.05 | 490.54 | 321.44 | 0.00 | 6.60 | 500.27 | 163.88   | 2921.58 | 962.78   | 1018.67       | 5.84             |   |
| 24 | 1/01/2023 00:23 | 341.80 | 0.00 | 670.56 | 0.05 | 474.20 | 313.60 | 0.00 | 6.12 | 500.29 | 162.31   | 2837.94 | 972.62   | 1016.73       | 5.67             |   |
| 25 | 1/01/2023 00:24 | 336.25 | 0.00 | 672.04 | 0.05 | 480.52 | 314.84 | 0.00 | 7.14 | 500.31 | 162.04   | 2835.14 | 973.03   | 1012.41       | 5.67             |   |
| 26 | 1/01/2023 00:25 | 354.08 | 0.00 | 657.28 | 0.05 | 458.85 | 320.24 | 0.00 | 6.78 | 500.34 | 162.65   | 2774.89 | 971.47   | 1014.67       | 5.55             |   |
| 27 | 1/01/2023 00:26 | 336.22 | 0.00 | 659.37 | 0.05 | 491.31 | 326.41 | 0.00 | 6.93 | 500.36 | 163.26   | 2977.74 | 969.91   | 1008.33       | 5.95             |   |
| 28 | 1/01/2023 00:27 | 333.23 | 0.00 | 647.60 | 0.05 | 480.00 | 320.20 | 0.00 | 7.01 | 500.38 | 164.57   | 2834.91 | 971.68   | 1014.64       | 5.67             |   |
| 29 | 1/01/2023 00:28 | 360.20 | 0.00 | 670.52 | 0.05 | 471.87 | 313.47 | 0.00 | 6.81 | 500.41 | 167.55   | 2899.46 | 971.65   | 1018.84       | 5.79             |   |
| 30 | 1/01/2023 00:29 | 341.35 | 0.00 | 665.85 | 0.05 | 488.21 | 314.66 | 0.00 | 5.83 | 500.18 | 168.85   | 2875.93 | 968.80   | 1014.64       | 5.75             |   |
| 31 | 1/01/2023 00:30 | 339.40 | 0.00 | 659.77 | 0.05 | 482.56 | 315.52 | 0.00 | 6.15 | 500.06 | 169.25   | 2843.10 | 970.10   | 1022.95       | 5.69             |   |
| 32 | 1/01/2023 00:31 | 341.09 | 0.00 | 666.60 | 0.05 | 477.84 | 324.71 | 0.00 | 6.39 | 499.94 | 168.71   | 2859.46 | 970.10   | 1008.30       | 5.72             |   |
| 33 | 1/01/2023 00:32 | 352.11 | 0.00 | 676.77 | 0.05 | 486.90 | 312.90 | 0.00 | 7.17 | 499.82 | 168.16   | 2896.91 | 971.88   | 1024.77       | 5.80             |   |
| 34 | 1/01/2023 00:33 | 362.87 | 0.00 | 669.91 | 0.05 | 503.00 | 320.84 | 0.00 | 5.96 | 495.01 | 167.82   | 2784.62 | 963.17   | 1004.38       | 5.63             |   |
| 35 | 1/01/2023 00:34 | 352.99 | 0.00 | 676.33 | 0.05 | 501.80 | 317.63 | 0.00 | 6.49 | 500.90 | 165.26   | 2818.66 | 962.69   | 1014.44       | 5.63             |   |
| 36 | 1/01/2023 00:35 | 369.57 | 0.00 | 664.68 | 0.05 | 466.80 | 318.30 | 0.00 | 4.56 | 504.50 | 161.76   | 2943.28 | 973.28   | 1002.45       | 5.83             |   |

## 11.5. Código de Lógica Difusa en Python

Todos los algoritmos empleados para el desarrollo de esta investigación fueron desarrollados mediante el lenguaje de código abierto Python, y se utilizó como plataforma de generación y ejecución de código el Google Colab, la Figura 81 muestra una imagen referencial. Se adjunta el [LINK](#) para consultar el código generado.

**Figura 79**

*Imagen Referencial del Algoritmo de Lógica Difusa en Google Colab*



Asimismo, se incluye en la sección de Anexos, el código utilizado para la ejecución de la Lógica Difusa en Python:

```
long_df4      = len(df4_Ene)
valores = []

for i in range(0, long_df4):
    vector = df4_Ene.iloc[i].to_numpy()
    #Valor Corr_M1
    Corr_M1 = vector[0]
    #Valor Corr_M2
    Corr_M2 = vector[1]
    #Valor Corr_ZAF
    Corr_ZAF = vector[2]
    #Valor F80
    F80 = vector[3]

    #Declarar e iniciar el Motor Fuzzy
```

```

engine = fl.Engine(
    name = "Control Difuso para Molienda",
    description = "Control difuso para modificar el
tonelaje de alimentación de molienda"
)

#Definir las Variables de Entrada (Fuzzyficación)
engine.input_variables = [
    fl.InputVariable(
        name ="F80",
        description ="Tamaño F80
del alimento a molienda",
        enabled=True,
        minimum=2.500,
        maximum=13.500,
        lock_range=False,
        #Membresía Trapezoidal
        terms=[
            fl.Trapezoid("Fino",
3, 3.5, 6, 6.5),

fl.Trapezoid("Normal", 6, 6.5, 8.5, 9.),
fl.Trapezoid("Grueso", 8.5, 9., 13, 13.5)
        ],
    ),
    fl.InputVariable(
        name ="Corr_BMetsol",
        description="Corriente de
#Corr_BMetsol
las bombas de descarga del Metsol",
        enabled=True,
        minimum=260.000,
        maximum=450.000,
        lock_range=False,
        #Membresía Trapezoidal
        terms=[
            fl.Trapezoid("Bajo",
260, 265, 335, 340),

fl.Trapezoid("Normal", 335, 340, 375, 380),
            fl.Trapezoid("Alto",
375, 380, 445, 450)
        ],
    ),
    fl.InputVariable(
        name ="Corr_BMetso2",
        description="Corriente de
#Corr_BMetso2
las bombas de la carga circulante - Metso 2",
        enabled=True,
        minimum=330.000,

```

```
maximum=750.000, lock_range=False,  
#Membresía Trapezoidal
```

```

330, 335, 495, 500),

fl.Trapezoid("Normal", 495, 500, 615, 620),
615, 620, 745, 750)

terms=[
    fl.Trapezoid("Bajo",
    ],
),

fl.InputVariable(
    name ="Corr_BZAF",
    description="Corriente de
    enabled=True,
    minimum=214.000,
    maximum=570.000,
    lock_range=False,
    #Membresía Trapezoidal
    terms=[
        fl.Trapezoid("Bajo",
        210, 215, 455, 460),

fl.Trapezoid("Normal", 455, 460, 495, 500),
495, 500, 565, 570)
        fl.Trapezoid("Alto",
        ],
    )
]

#Definiendo los Valores de Salida (Desfuzificación)
engine.output_variables = [
    fl.OutputVariable(
        name="Delta_Ton",
        description="Delta de
        Tonelaje a Aumentar/Disminuir a depender de las condiciones
        operacionales",
        enabled=True,
        minimum=-100.000,
        maximum=100.000,
        lock_range=False,
        aggregation=fl.Maximum(),

defuzzifier=fl.Centroid(),

        lock_previous=False,
        terms=[
        #Membresía Trapezoidal

fl.Trapezoid("Disminuir_Mucho", -100, -100, -75, -50),
fl.Trapezoid("Disminuir", -60, -50, -10, 0),

```

```
f1.Trapezoid("Mantener", -0.5, -0.1, 0.1, 0.5),  
f1.Trapezoid("Aumentar", 0, 10, 50, 60),
```

```

fl.Trapezoid("Aumentar_Mucho", 50, 60, 100, 100)
]
)
]

engine.rule_blocks = [
    fl.RuleBlock(
        name="Reglas Difusas - Molienda",
        description="Reglas Difusas para
control de tonelaje en la alimentación a molienda",
        enabled=True,
        conjunction=fl.Minimum(),
        disjunction=fl.Maximum(),
        implication=fl.Minimum(),
        activation=fl.General(),
        rules=[
#Conjunto de Reglas Difusas para F80 Fino
            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Aumentar_Mucho", engine),
            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Aumentar_Mucho", engine),
            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Mantener", engine),
            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Aumentar_Mucho", engine),
            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Aumentar_Mucho", engine),
            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Mantener", engine),
            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Mantener", engine),
            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Mantener", engine),
            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),

            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Aumentar_Mucho", engine),
            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Aumentar_Mucho", engine),
            fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Mantener", engine),

```

```

        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Bajo then Delta_Ton is Aumentar_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Normal then Delta_Ton is Aumentar_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Alto then Delta_Ton is Mantener", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Mantener", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Mantener", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),

        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Mantener", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Mantener", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Mantener", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Mantener", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Fino and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),

#Conjunto de Reglas Difusas para F80 Normal
        fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Aumentar", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Aumentar", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Mantener", engine),

```

```

fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Bajo then Delta_Ton is Aumentar", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Normal then Delta_Ton is Aumentar", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Alto then Delta_Ton is Mantener", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Mantener", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Mantener", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),

fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF
is Bajo then Delta_Ton is Aumentar", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF
is Normal then Delta_Ton is Aumentar", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF
is Alto then Delta_Ton is Disminuir", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Normal and
Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is Aumentar", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Normal and
Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is Aumentar", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Normal and
Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is Disminuir", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF
is Bajo then Delta_Ton is Disminuir", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF
is Normal then Delta_Ton is Disminuir", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF
is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),

fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Disminuir", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Disminuir", engine),
fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),

```

```

        fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Bajo then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Normal then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Normal and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),

#Conjunto de Reglas Difusas para F80 Grueso
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Bajo then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Normal then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Bajo and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),

        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF
is Bajo then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF
is Normal then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF
is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),

```

```

        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Normal and
Corr_BZAF is Bajo then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Normal and
Corr_BZAF is Normal then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Normal and
Corr_BZAF is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF
is Bajo then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF
is Normal then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Normal and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF
is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),

        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Bajo and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Bajo then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Normal then Delta_Ton is Disminuir", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Normal and Corr_BZAF
is Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Bajo then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Normal then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
        fl.Rule.create("if F80 is
Grueso and Corr_BMetso1 is Alto and Corr_BMetso2 is Alto and Corr_BZAF is
Alto then Delta_Ton is Disminuir_Mucho", engine),
    ]
)
]

```

```

#Ingreso de valores
engine.input_variable("F80").value = F80
engine.input_variable("Corr_BMetso1").value = Corr_M1
engine.input_variable("Corr_BMetso2").value = Corr_M2
engine.input_variable("Corr_BZAF").value = Corr_ZAF
engine.process()

```

```

#Calculando valor de salida - Tonelaje
Resultado_difuso = engine.output_variable("Delta_Ton").value
#print("y =", engine.output_variable("Delta_Ton").value)
#print("ŷ =", engine.output_variable("Delta_Ton").fuzzy_value())
#a = engine.output_variable("Delta_Ton").value

valores.append(Resulto_difuso)

fuzzy_array = np.array(valores)

df_delta_ton = pd.DataFrame(fuzzy_array, columns = ['Delta_Ton'])

#Definiendo Tabla de Salida de Datos
df5_Ene = df4_Ene
df5_Ene['Delta_Ton'] = df_delta_ton['Delta_Ton']

#Incluyendo el Tonelaje Sugerido por el sistema difuso
df_Tonf = pd.DataFrame(df5_Ene['Tonelaje'] + df5_Ene['Delta_Ton'],
columns = ['Tonelaje_Sugerido'])

df5_Ene['Tonelaje_Sugerido'] = df_Tonf['Tonelaje_Sugerido']

#Incluyendo el Agua Sugerida por el sistema difuso
df5_Ene['Agua_Sugerida'] = df5_Ene['Tonelaje_Sugerido'] * 0.31

df5_Ene.head()

```