



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL PROCESO DE FUSIÓN FLASH DE
CONCENTRADOS DE COBRE - FUNDICIÓN CHUQUICAMATA - BASADA EN UN
SISTEMA DE INFORMACIÓN.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

JUAN ALFREDO PICHUANTE PÉREZ

PROFESORA GUÍA:
MELANIE COLET LAGRILLE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FELIPE DÍAZ ALVARADO
LUIS YACHER SCHATZ

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO
POR: JUAN PICHUANTE PÉREZ
FECHA: AGOSTO 2016
PROFESORA GUÍA: MELANIE COLET LAGRILLE

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL PROCESO DE FUSIÓN FLASH DE
CONCENTRADOS DE COBRE - FUNDICIÓN CHUQUICAMATA - BASADA EN UN
SISTEMA DE INFORMACIÓN.

El objetivo del presente trabajo fue proponer una metodología de análisis de procesos metalúrgicos, específicamente del proceso de fusión flash de concentrados de cobre, que entregue las bases para el diseño de un sistema de información representado por un panel de supervisión con despliegues de gráficos e indicadores. El trabajo se enmarcó en un proyecto relacionado con el Horno Flash de la Fundición Chuquicamata, en el cual el objetivo de análisis fue estudiar la variabilidad de la ley de cobre en el eje.

En relación a la metodología propuesta, inicialmente se compararon tres metodologías de análisis de procesos ampliamente utilizadas: (i) mantenimiento productivo total, (ii) mantenimiento basado en la confiabilidad y (iii) mantenimiento total de la calidad, a partir de las cuales se lograron establecer las bases y conceptos necesarios para plantear un análisis formal. Este análisis se basó en que los procesos se pueden descomponer conceptualmente en funciones que se interconectan entre sí a través de relaciones causales. La metodología propuesta comprende, entonces, una serie de herramientas que se aplican de manera ordenada por etapas, de forma que la información de una etapa es utilizada en la siguiente.

Como resultado de la aplicación de esta metodología al proceso de fusión flash, se determinó que hay subprocesos que intervienen más que otros en la variabilidad de la ley de cobre en el eje como, por ejemplo, el proceso de mezcla de carga influye más que el proceso mismo de fusión. Esto se explica porque la alimentación de carga, a través del flujo de alimentación y su composición, interviene en el punto de equilibrio operacional del proceso.

Se plantearon las bases para la conformación de un sistema de información a través de la determinación de indicadores (ej. desviación estándar del flujo de alimentación, error de dosificación, entre otros) y la creación de herramientas enfocadas en mejorar la información disponible del proceso (ej. escenario de stock de tolvas y estimación de leyes de alimentación). Como ejemplo tangible de su aplicación se desarrolló un panel de supervisión con la ayuda de los programas *ProcessBook* y *DataLink* de *PI-System*, con gráficos en tiempo real de los indicadores y herramientas sugeridas.

La metodología propuesta es capaz de responder a tres motivaciones claves: (i) valorización de la información del proceso para una toma de decisiones de carácter operacional más completa, (ii) mejora de la comunicación entre el ingeniero del proceso y los analistas de procesos, y (iii) mejora de la capacidad de registro de la información que proviene de la experiencia y el conocimiento generado a través de ella.

*Nuestra recompensa
se encuentra en el esfuerzo
y no en el resultado.*

*Un esfuerzo total
es una victoria completa.*

Mahatma Gandhi

Agradecimientos

A mis padres por haber estado siempre apoyándome y guiándome en todas las etapas de mi vida. A Shylvi por ser una mamá excepcional que si no fuese por ella no estaría donde estoy actualmente, gracias por aconsejarme a seguir esta hermosa carrera. A mi tío Raúl por mostrarme que las cosas hay que hacerlas con convicción. ¡Los adoro!

A Ema y Vicente, mis queridos hermanos, con quienes he compartido experiencias únicas en donde hemos aprendido lecciones de vida muy importantes. Vicente, gracias por siempre haber estado apoyándome en mis locuras y a Ema por darme consejos de cordura en ellas. ¡Los mejores!

A mis abuelos quienes me han entregado algunos de los consejos más valiosos que atesoro. Es un placer para mi haber compartido y seguir compartiendo de su agradable compañía. Tata Juan, nona Ema, tata Alfredo y tía Elizabeth los quiero con todo mi corazón. Gracias a mi tío Pedro también.

A mi querida profesora, Melanie, estoy muy contento de que hayas sido mi profesora guía. Siempre que necesité hablar contigo estuviste ahí para apoyarme y darme un buen consejo, varias veces necesité un buen empujón de ánimo y ahí estuviste para dármelo, gracias por eso.

A don Luis, gracias por darme la oportunidad de desarrollar la memoria con ustedes. La rigurosidad, sentido crítico y pasión por hacer bien las cosas son las cualidades que más aprecié de usted y espero tenerlas siempre en cuenta en lo que está por venir.

A don Leonel, primero agradecer la increíble posibilidad de aplicar mis conocimientos en la tierra que me vio nacer y, en segundo lugar, reconocer la gran calidad humana con que realiza todo lo que hace. Gracias por alegrarnos a todos con su increíble sentido del humor.

A Felipe, con quien tuve el gusto de aprender desde mis primeros años en la carrera. Tus ganas de enseñar y motivar a la gente son excepcionales. Muy agradecido por darme a entender que las situaciones hay que verlas de varios puntos de vista.

A mi amorcito, Danielle. Gracias por tener tanta paciencia y escucharme sobre todo en esta etapa, en la cual fuiste un pilar emocional muy grande, tanto en los momentos de cansancio, como en los de gran felicidad. ¡Un besito!

A mis compañeros y profesores de colegio en que cada uno contribuyó con su granito de arena. Un saludo especial a la Miss Pily quien inculcó en mi un amor especial por la química y me motivó siempre a investigar un poco más allá.

A mis amigos de infancia con quienes he escrito una linda historia de vida y estoy seguro que seguirá escribiéndose. A Aduard, Camilo y Macarena que genuinamente me han acompañado y han estado siempre para darme un buen consejo. ¡Un gran abrazo para ustedes!

A mis amigos desde mis primeros días de universidad: Coni, Cono, Daniel, Jaivier, Mati, Magda y Vivi. Que hicieron de las largas tardes de estudio un buen recuerdo y nos seguimos acompañando en las diferentes etapas que cada uno ha tenido que pasar.

A mis compañeros, amigos y profesores de carrera: Pancho, Gus, Coni, Pao, Nacho, Rober, Pili, Cata, Fabi, Oso, Pancho D, Paula, Antoine, Chico, Pancho U, Coni G, Fani, Fede, Joaco ... Un agradecimiento especial a Gina, Celinda y Erika por aportar a la gran calidad humana del departamento.

Quiero agradecer a todos y cada uno de los que me aportó para poder llegar a esta hermosa etapa. Este trabajo quiero dedicarlo a la memoria de mi padre que yo sé siempre ha estado a mi lado de una u otra forma.

Tabla de Contenido

Agradecimientos.....	III
Índice de Tablas	VI
Índice de Figuras	VIII
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Descripción del Proceso en Estudio	2
1.2.1 Fundición Chuquicamata	3
1.2.2 Horno Flash	4
1.3 Sistemas de Información	6
1.3.1 Plataforma RTPM	7
1.3.2 Importancia de la Información y la Generación de Conocimiento	11
1.4 Motivación y Contextualización del Trabajo	12
1.5 Objetivos	13
1.5.1 Objetivo General	13
1.5.2 Objetivos Específicos.....	13
2 Análisis de Procesos.....	14
2.1 Principios Generales del Análisis de Procesos	14
2.2 Enfoques o Dimensiones de Análisis de Procesos	15
2.3 Metodologías de Análisis de Procesos.....	16
2.3.1 Metodologías Generales de Análisis.....	17
2.3.2 Metodologías Específicas o Herramientas de Análisis	22
3 Propuesta de Metodología de Análisis de Procesos para entregar las Bases de un Sistema de Información.....	31
3.1 Forma de Análisis de un Proceso.....	31
3.2 Comparación de “metodologías específicas”	33
3.3 Requerimientos para la Metodología Propuesta	35
3.4 Metodología Propuesta	35
4 Aplicación de la Metodología Propuesta.....	38
4.1 Antecedentes generales del proceso de fusión flash Fundición Chuquicamata.....	38
4.1.1 Análisis de la Capacidad del Proceso.....	38
4.1.2 Análisis General de Incidencia.....	41
4.2 Etapa 1: Análisis Funcional	43

4.2.1	Fundamentos de la Descomposición Funcional.....	43
4.2.2	Definición de Estándares	49
4.3	Priorización de Funciones	51
4.3.1	Priorización de Funciones aplicados al Caso de Estudio.....	53
4.4	Factores Incidentales	55
4.4.1	Factores Incidentales en el Caso de Estudio	56
4.5	Análisis de Factores Críticos	57
4.5.1	Factores Críticos para el Caso de Estudio.....	59
4.6	Bases del Panel de Supervisión	61
4.6.1	Determinación de indicadores y herramientas	61
5	Propuesta de Panel de Supervisión	67
5.1	Despliegues del Panel de Supervisión	67
5.2	Aplicación del Panel de Supervisión.....	72
6	Conclusiones y Recomendaciones	75
6.1	Conclusiones.....	75
6.2	Recomendaciones.....	77
7	Bibliografía	78
8	Anexos	81
8.1	Diagrama Fundición de Chuquicamata	81
8.2	Descripción de Áreas del Proceso complejo Horno Flash.....	82
8.3	Análisis de Capacidad del Proceso	87
8.4	Tablas de Análisis Funcional.....	88
8.5	Fichas descriptivas del Análisis Funcional	95
8.6	Tablas de análisis de la priorización de funciones	100
8.7	Diagramas de Incidencia	105
8.8	Análisis de criticidad y tabla descriptiva de factores críticos	112
8.9	Bases del Panel de Información	122
8.9.1	Indicadores candidatos	122
8.9.2	Creación de TAGs	123
8.9.3	Escenarios de monitorización de tolvas	139
8.9.4	Modelo de estimación de ley de Cu, Fe, S, SiO ₂ y As.....	142

Índice de Tablas

Tabla 1. Ejemplo de formulario de AMFE para el análisis de operaciones de soldadura y marcado del proceso de prensas y chapistería [37].....	26
Tabla 2. Ventajas y desventajas de metodologías específicas.	34
Tabla 3. Atributos de metodologías específicas.	34
Tabla 4. Resumen de metodología. Descripción, alcances y herramientas.	36
Tabla 5. Coeficiente de correlación entre variables seleccionadas y ley de eje en cobre.	42
Tabla 6. Coeficiente de correlación entre indicadores de variables y dispersión de la ley de cobre en el eje.	43
Tabla 7. Tabla ejemplo de estructuración de una Función.	47
Tabla 8. Identificación de Funciones Principales. Estructura: verbo + objeto + contexto.	47
Tabla 9. Tabla ejemplo de estándar y relevancia de cada función en relación al objetivo de análisis.	51
Tabla 10. Ficha descriptiva de las funciones del Nivel 0 y 1.	52
Tabla 11. Ejemplo de tabla para analizar la prioridad de funciones.	53
Tabla 12. Análisis Modal de Fallos y Efectos global de la primera función principal.	53
Tabla 13. Ejemplo de Tabla para realizar la prioridad de funciones.	59
Tabla 14. Análisis de Criticidad. Función: “Dosificar concentrado según flujo solicitado”.	60
Tabla 15. Relevancia de los Factores Incidentales.	60
Tabla 16. Indicadores por función y rango. Definición de rangos: verde (Lim Inf - Lim1), amarillo (Lim1 - Lim2) y rojo (Lim2 - Lim Sup).....	64
Tabla 17. Factores Incidentales y análisis de medición y/o indicador.	65
Tabla 18. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función Principal: “Disponer del suministro...”	88
Tabla 19. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: “Preparar carga para generar mezcla ...”	89

Tabla 20. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: “Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash”	91
Tabla 21. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: “Enfriar gases provenientes...”	93
Tabla 22. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: “Limpiar gases metalúrgicos...”	93
Tabla 23. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: “Manejar polvos metalúrgicos...”	94
Tabla 24. Estándar y relevancia de cada función en relación al objetivo de análisis.	95
Tabla 25. Descripción de factores críticos.....	118
Tabla 26. TAGs creados y límites de rangos.....	123
Tabla 27. Indicadores de estado por Función.	125
Tabla 28. Factores incidentales y análisis de medición y/o indicador.	126
Tabla 29. TAGs relevantes para análisis de estimación de leyes.	142

Índice de Figuras

Figura 1. Precio nominal de cobre refinado, costo C3 de cátodos y ley promedio de minerales en Chile. Costo definido como C3: costos de extracción + costos de tratamiento + flete, fundición y refinación + gastos de administración – subproductos + depreciación + intereses + costos indirectos [7] [9].	2
Figura 2. Esquema Horno Flash [12].	4
Figura 3. Jerarquía Sistemas de Información [17].	7
Figura 4. Arquitectura típica servidor PI-System [18].	9
Figura 5. PI-ProcessBook [18].	10
Figura 6. PI-DataLink [18].	10
Figura 7. Importancia de la información y el conocimiento [22].	11
Figura 8. Identificación de pérdidas en TPM. Eficacia global de la planta y estructura de pérdidas [25].	18
Figura 9. Aplicaciones básicas de los componentes del análisis RCM.	21
Figura 10. Enfoque de aseguramiento de la calidad [30].	22
Figura 11. Esquema general de un diagrama funcional [35].	23
Figura 12. Ejemplo de árbol de fallas [31].	25
Figura 13. Efecto de la aplicación del Análisis P-M [25].	28
Figura 14. Ejemplos de herramientas de control y gestión de calidad [30].	30
Figura 15. Comparación de la extensión y profundidad de análisis con respecto a las fases de una metodología.	33
Figura 16. Esquema de metodología propuesta.....	37
Figura 17. Distribución de ley de cobre, anual. Se han normalizado los datos, preservando los que tienen relación directa al proceso.	39
Figura 18. Índice de capacidad del proceso en un año arbitrario.	40
Figura 19. Representación del proceso fusión flash de concentrado de cobre.	41
Figura 20. Diagrama de Descomposición Funcional (esquema) [17].	45

Figura 21. Esquema general complejo Horno Flash [12].	46
Figura 22. Diagrama de Descomposición Funcional (DDF).	50
Figura 23. Diagrama de Descomposición Funcional Priorizado:proceso fusión Horno Flash.	54
Figura 24. Indicación de Diagramas de Incidencia por Función en Diagrama de Descomposición Funcional.....	56
Figura 25. Diagrama de Incidencia 1.....	57
Figura 26. Funciones del Diagrama de Descomposición Funcional a las cuales se les determina indicador.	63
Figura 27. Escenario de stock de la tolva 29 de concentrado.	66
Figura 28. Leyes de Cu, S, S, SiO ₄ y As a la salida de tolva 54.	67
Figura 29. Esquema de las pantallas consideradas para el panel de supervisión propuesto.	68
Figura 30. Despliegue "Overview" del panel de información.....	69
Figura 31. Despliegue "Resumen" ley de cobre en el eje.....	69
Figura 32. Despliegue "Indicadores de Función".....	70
Figura 33. Despliegue "Indicadores de Función".....	70
Figura 34. Despliegue "Indicadores de Función".....	71
Figura 35. Despliegue "Factores Incidentales".....	71
Figura 36. Despliegue "Panel de información de tolvas".....	72
Figura 37. Despliegue "Estimación de leyes en tolvas".....	72
Figura 38. Representación de la modelación de un incidente potencial. FL:WTOTAL corresponde la tasa de alimentación al horno en ton/h, FL:TI-X corresponde a las temperaturas en cada abertura en °C y DIF_TEMPX_QC al indicador respectivo en °C.	74
Figura 39. Diagrama de la Fundición de Chuquicamata [12].	81
Figura 40. Diagrama de Incidencia 1.....	105
Figura 41. Diagrama de Incidencia 2.....	105

Figura 42. Diagrama de Incidencia 3.....	106
Figura 43. Diagrama de Incidencia 4.....	106
Figura 44. Diagrama de Incidencia 5.....	107
Figura 45. Diagrama de Incidencia 6.....	107
Figura 46. Diagrama de Incidencia 6.....	107
Figura 47. Diagrama de Incidencia 7.....	108
Figura 48. Diagrama de Incidencia 8.....	108
Figura 49. Diagrama de Incidencia 9.....	109
Figura 50. Diagrama de Incidencia 10.....	109
Figura 51. Diagrama de Incidencia 11.....	110
Figura 52. Diagrama de Incidencia 12.....	111
Figura 53. Diagrama de Incidencia 13.....	111
Figura 54. Esquema de tolvas de concentrado, sílice, calcina y carga.	139
Figura 55. Escenarios de stock tolva 29 de concentrado.	140
Figura 56. Escenarios de stock tolva 001 de calcina.....	141
Figura 57. Escenarios de stock tolva 54 de carga.....	141
Figura 58. Simulación de ley a la salida de tolva 54.....	143

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Un proceso industrial se puede definir como todo desarrollo sistemático que conlleva una serie de pasos ordenados u organizados, que se efectúan o suceden de forma alternativa o simultánea, los cuales se encuentran estrechamente relacionados entre sí y cuyo propósito es llegar a un resultado preciso. Desde una perspectiva general se entiende que el devenir de un proceso implica una evolución en el estado de un material sobre el que se está aplicando dicho proceso hasta que este desarrollo llega a su conclusión [1].

Los procesos químicos son una rama de los procesos industriales que son el conjunto de transformaciones químicas y físicas destinadas a generar un producto final (manufacturado o no). Hay una serie de actividades industriales en las que se efectúan procesos químicos: procesamiento de alimentos, minería, tratamiento de aguas, algunas investigaciones científicas, elaboración de medicamentos, elaboración de plásticos, manufactura de materiales de construcción, entre otros [2].

Entre estos procesos químicos, el de mayor importancia para la economía de Chile es la minería [3]. Sus inicios en el actual territorio chileno se remontan a las extracciones hechas entre 12.000 y 10.000 años atrás en una mina de óxido de hierro en Taltal, Región de Antofagasta, la más antigua del continente. Siglos más tarde, la explotación sucesiva del carbón en el sur, la plata en Chañarcillo y el salitre en el norte llevó a la minería a jugar un papel primordial en la economía del país [4]. Actualmente, la minería preponderante es la del cobre con yacimientos de calidad mundial.

La minería fue responsable del 11,3% del PIB chileno al 2014 [5] y concentra el 54% de las exportaciones de la industria nacional, está presente en 13 de las 15 regiones del país y se extraen 25 productos distintos. Es la principal actividad económica de las regiones de Tarapacá, Antofagasta y Atacama y es de gran importancia en las de Coquimbo, Valparaíso y O'Higgins [6].

El principal producto comercial de la minería es el cobre [6]. Chile es el mayor productor del mundo, satisfaciendo el 31% del mercado mundial en 2014 y cuenta con el 28% de las reservas mundiales de cobre [7]. La extracción cuprífera representa el 50% de las exportaciones chilenas. La empresa estatal Codelco, la mayor compañía cuprífera del planeta, explota algunos de los principales yacimientos chilenos, como Chuquibambilla y El Teniente, las mayores minas a cielo abierto y subterránea del mundo, respectivamente [4].

En la última década el cobre atravesó un “súper ciclo” de precios y alcanzó 326 centavos la libra en promedio [8]. Actualmente, el precio se encuentra con tendencia a la baja en contraposición a los costos de producción que en los últimos años han tendido al alza. Desde el punto de vista operacional las leyes de cobre promedio en los minerales de Chile han tendido a la baja en la última década [9], por ende, el esfuerzo para producir una tonelada de cobre es mayor comparado a periodos anteriores y a mayor costo (Figura 1).

La exigencia operacional y económica en la industria del cobre son temas de constantes desafíos para quienes diseñan y operan los procesos químicos del área. De hecho, estas exigencias han promovido y posibilitado la implementación de conceptos y herramientas relacionadas con la automatización y optimización de procesos haciendo que estos sean cada vez más eficientes y en este contexto la información disponible es crucial.

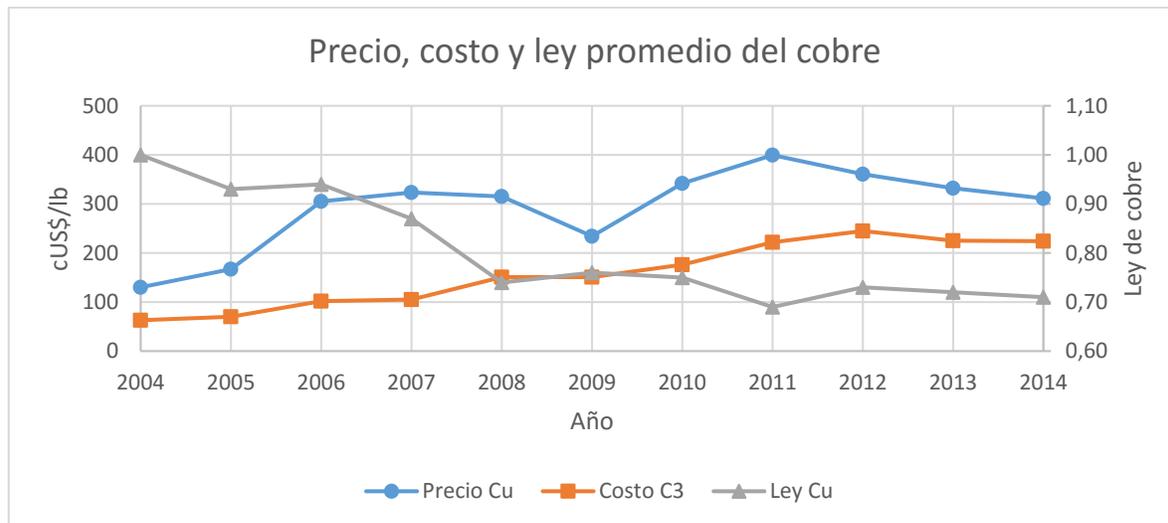


Figura 1. Precio nominal de cobre refinado, costo C3 de cátodos y ley promedio de minerales en Chile. Costo definido como C3: costos de extracción + costos de tratamiento + flete, fundición y refinación + gastos de administración – subproductos + depreciación + intereses + costos indirectos [7] [9].

1.2 Descripción del Proceso en Estudio

Básicamente existen dos rutas de procesamiento de minerales de cobre, los minerales oxidados son tratados por hidrometalurgia y los minerales sulfurados por pirometalurgia. Esta última comprende los procesos de extracción, chancado y molienda, flotación, fundición y electrorrefinación [10].

El proceso de fundición considera las fases consecutivas de fusión, conversión y refinación para incrementar progresivamente la ley o contenido de cobre del material sometido a fundición: el concentrado de cobre. Así se logra que la concentración inicial de 30% a 40% se incremente progresivamente hasta 99,5% en el ánodo [10].

En la fundición, las etapas de fusión y de conversión son las más importantes por el nivel de concentración del cobre y por la alta separación de otros componentes. La fusión tiene por objetivo concentrar el metal a recuperar, mediante una separación de fases a alta temperatura: una sulfurada rica en el metal y otra oxidada pobre en él. La conversión elimina el azufre y el hierro presentes en la fase sulfurada, mediante oxidaciones del baño fundido para obtener un cobre final relativamente puro [10].

Existen diversos desafíos en las fundiciones de cobre, uno de ellos es la reducción de las emisiones contaminantes que se liberan al ambiente, siendo estas una de las principales responsables de ello a nivel industrial. Recientemente se aprobó el Decreto 28 que “establece norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de

arsénico”, la cual establece límites de emisión para los procesos unitarios de las fuentes emisoras [11]. La puesta en marcha total se debe materializar en los próximos tres años.

Chile tiene siete fundiciones de cobre, una de ellas es la fundición de Chuquicamata en el norte de Chile, que al igual que las demás debe someterse a cambios y reestructuraciones para adaptarse a las nuevas condiciones medioambientales impuestas por la norma. Los desafíos son multidimensionales y, por lo demás, atingentes a las diferentes operaciones unitarias presentes en las instalaciones, principalmente los hornos de fusión y los hornos de conversión. Es de importante interés identificar los factores que impidan una operación óptima y que pudiesen generar condiciones en que las emisiones superen los límites establecidos.

1.2.1 Fundición Chuquicamata

La Fundición Chuquicamata se encuentra emplazada dentro de las instalaciones del complejo minero-metalúrgico del mismo nombre en la provincia de El Loa de la Región de Antofagasta. Esta instalación está distante 16 km de la ciudad de Calama y 1.225 km de Santiago a una altura de 2.770 msnm [12].

El concentrado de cobre con un contenido de 30 a 32% de cobre y una humedad en torno a 8%, que se produce de los minerales provenientes de Chuquicamata y Radomiro Tomic, es recepcionado en camas de almacenamiento y tolvas [12]. Recientemente se ha incorporado la fusión de calcina, material producido en la División Ministro Hales que se obtiene de la tostación del concentrado de esa división y posee un contenido de cobre entre 34% y 38%.

Desde la cama de almacenamiento principal se envía el concentrado húmedo hacia dos secadores rotatorios para eliminar la humedad y obtener concentrado seco al 0,2% de humedad que en conjunto a la calcina (en una proporción máxima de 50% en peso de calcina) se distribuye entre los dos equipos de fusión: Horno Flash de tecnología Outokumpu (hoy Outotec) y convertidor tipo El Teniente de tecnología Codelco [13]. Adicionalmente, existe una cama para almacenamiento y distribución de materiales secundarios e insumos.

El proceso de fusión flash posee una capacidad instalada de 3.000 toneladas por día de procesamiento. Esta tecnología genera un producto llamado eje o mata con contenido de cobre promedio de 62%Cu, el cual es enviado a la primera etapa del ciclo de conversión en reactores Peirce-Smith (soplado a escoria). Por su parte, el convertidor Teniente que posee una capacidad 2.500 toneladas por día de concentrado, genera un producto denominado metal blanco cuyo contenido de cobre es en promedio de 74%Cu. Este material junto al producto de la primera etapa de la conversión Peirce- Smith, se procesan en la segunda etapa del ciclo de conversión (soplado a cobre) para producir cobre blíster a 98%Cu [12].

La escoria producida se dispone en un vertedero cercano a la planta, salvo la que tiene un contenido de 4,5 a 7,0%Cu que es enviada a enfriamiento para posteriormente procesarla en la planta de molienda-flotación de la División en donde se produce un concentrado de 30 a 34%Cu que se retorna a los equipos de fusión.

En los convertidores Peirce-Smith, además de procesar el eje y metal blanco producido en el horno flash y convertidor teniente, respectivamente, se procesan en promedio 120 tpd de chatarra de cobre y alrededor de 400 tpd de carga fría con un contenido de cobre cercano a 50-60%Cu [12].

El cobre blíster producido en los convertidores Peirce-Smith junto al cobre que se obtiene de fundir *scrap* de la refinería electrolítica en dos hornos dedicados a esta función (uno operando y el otro *standby*), se transporta en ollas hacia los seis hornos del área de refinación. En estos hornos, se eliminan las impurezas mediante la inyección de fundente alcalino y se ajusta el contenido de oxígeno disuelto para producir cobre anódico de 99,5%Cu que se moldea en las tres ruedas de moldeo de tecnología Outotec [13]. Posteriormente, los ánodos moldeados de 400 a 410 kg de peso cada uno se cargan en carros de tren y se envían a la refinería electrolítica para producir cátodos de alta pureza.

Los gases metalúrgicos, con alto contenido de dióxido de azufre, que se generan en las dos unidades de fusión y en cuatro de los cinco convertidores Peirce-Smith instalados, y que no se pierden como emisiones fugitivas, son enviados a una cámara de mezcla de gases que los distribuyen hacia las cinco plantas de limpieza de gases y desde allí hacia las tres plantas de contacto simple para producir ácido sulfúrico a un 96% de pureza. Esta planta genera además, un efluente líquido (solución de ácido débil con sólidos en suspensión) que se envía a neutralización con lechada de cal [13]. Un diagrama de la fundición se presenta en el Anexo 8.1.

1.2.2 Horno Flash

El Horno Flash de tecnología Outokumpu está constituido por una base de hormigón armado y una estructura metálica recubierta interiormente con material refractario. Consta de tres zonas principales: zona de reacción, zona de sedimentación y zona de salida de gases (Figura 2).

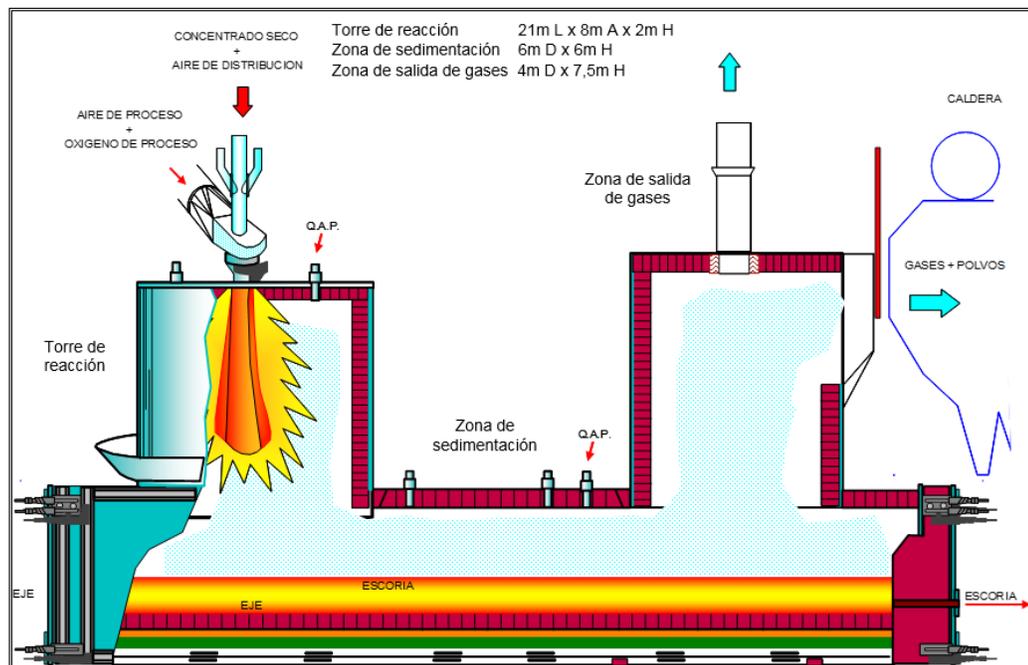


Figura 2. Esquema Horno Flash [12].

1.2.2.1 Fenomenología del proceso

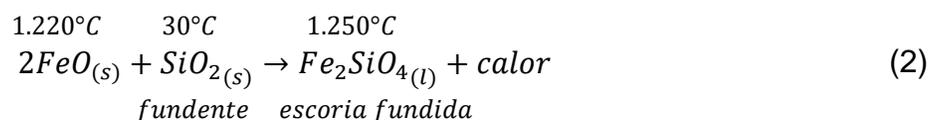
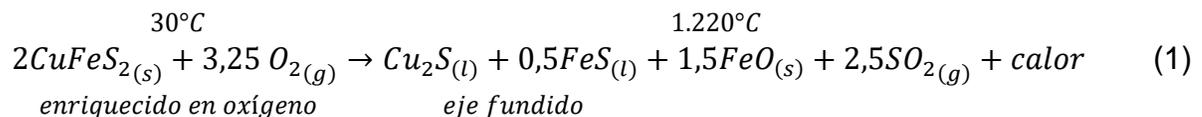
El proceso de fusión flash Outokumpu consiste esencialmente en dispersar y oxidar un flujo de partículas de concentrado seco en una corriente de aire enriquecido en oxígeno cuando ambas corrientes entran a través de un conjunto de cámaras y ductos que constituyen el quemador de concentrado, a una cámara cilíndrica vertical llamada torre de reacción [14].

A medida que la suspensión gas-sólido sale del cuerpo del quemador y fluye hacia abajo por la torre de reacción, las partículas sólidas se calientan por convección desde el gas que las rodea y por radiación desde las paredes de la torre hasta que alcanzan una temperatura a la cual la reacción de oxidación de las partículas es exotérmica. Esta temperatura es llamada de ignición y varía entre 400 y 550 °C [14].

Una vez alcanzada la temperatura de ignición, las partículas de concentrado aumentan su temperatura como producto de una progresiva oxidación del hierro y el azufre contenido en el concentrado y calcina [14], ya que las reacciones que ocurren durante la fusión son altamente exotérmicas, aportando gran parte o el total de la energía requerida en el proceso. Durante este proceso las partículas se funden, convirtiéndose en pequeñas gotas. El producto final de la torre es, principalmente, una mezcla heterogénea de sulfuros de cobre fundido, sulfuros de hierro, magnetita, sílice y ganga.

Esta mezcla heterogénea desciende y llega a la zona de sedimentación o *settler*, en donde se siguen produciendo reacciones de oxidación, pero principalmente se genera la separación de fases en eje (rica en cobre) y escoria (pobre en cobre), la primera más densa se ubica por debajo de la segunda.

Las reacciones generales son [15]:



Los gases generados se desplazan por la parte inferior del horno hacia la zona de salida de gases o *up-take* para ser evacuados, enfriados y tratados.

1.2.2.2 Variables operacionales del horno flash en fundición Chuquicamata

Las principales variables de operación del Horno Flash de la fundición de Chuquicamata son [14]:

- **Tasa de alimentación:** Flujo másico de alimentación de mezcla (concentrado + sílice + calcina) al quemador de concentrado del Horno Flash en toneladas por hora. Normalmente es 120 toneladas por hora y el mínimo operacional de 70 toneladas por hora.

- **Coefficiente de oxígeno:** queda definido por el balance de masa y corresponde al volumen de oxígeno necesario por unidad de tonelada de carga para lograr la ley de cobre objetivo en el eje. Normalmente es de alrededor $160 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2$ por tonelada de mezcla.
- **Enriquecimiento:** Proporción volumétrica del oxígeno (O_2) total contenido en los gases de oxidación que se inyectan al Horno Flash. Enriquecimiento máximo 50%.

$$\text{Enriq} = \frac{\text{Nm}^3 \text{ O}_2 \text{ en aire} + \text{Nm}^3 \text{ en oxígeno de proceso}}{\text{Nm}^3 \text{ aire} + \text{Nm}^3 \text{ de oxígeno de proceso}} \quad (3)$$

- **Razón de calcina:** porcentaje en peso de calcina sobre el total entre concentrado y calcina. Valores típicos fluctúan entre 20% y 50%.

$$\text{Razón}_{\text{calcina}} = \frac{\text{flujo másico calcina}}{\text{flujo másico calcina} + \text{flujo másico concentrado}} \quad (4)$$

Las cuatro variables operacionales antes mencionadas son constantemente monitoreadas y es en gran medida a través de ellas que el proceso es controlado para obtener el producto “eje de cobre” en la calidad y la cantidad requeridas. En este contexto, es determinante la información disponible para mantener en los rangos óptimos estas variables operacionales y actualmente existen sistemas de información que permiten su monitoreo contante. A pesar de lo anterior, hay un gran espacio para el desarrollo de sistemas de monitoreo avanzados con el fin de optimizar la operación a través de la información disponible.

1.3 Sistemas de Información

Un sistema de información es aquél que permite recopilar, administrar y manipular un conjunto de datos que conforman la información necesaria para que distintos estamentos de una organización puedan realizar una toma de decisiones informada. En resumen, es aquél conjunto ordenado de elementos (no necesariamente computacionales) que permiten manipular toda aquella información necesaria para implementar aspectos específicos de la toma de decisiones [16].

Todo sistema de información surge de la necesidad de información que experimenta una organización para implementar un conjunto específico de toma de decisiones. Dentro de los objetivos generales que cumplen los sistemas de información se consideran: la automatización de procesos operativos, proporcionar información que sirva de apoyo al proceso de toma de decisiones y lograr ventajas comparativas a través de su implementación y uso [16].

Un sistema de información realiza cuatro acciones básicas: entrada, almacenamiento, procesamiento y salida de información. La entrada es el proceso por el cual el sistema de información toma los datos que requiere para procesar la información; el almacenamiento los guarda, tanto los de entrada como los ya procesados; el

procesamiento de información es la capacidad del sistema de realizar cálculos predefinidos; y la salida entrega la información necesaria [16].

Los sistemas de información en los procesos modernos abarcan diferentes niveles de acción y decisión, desde las áreas de gestión operativa y planificación de recursos hasta los procesos de planta. Esto se representa normalmente mediante una pirámide (Figura 3) en cuya base se encuentran los instrumentos de planta, que corresponden a sensores, actuadores y otros dispositivos de terreno que son vitales para asegurar un adecuado control de los procesos productivos. En el extremo opuesto, en la parte superior, se encuentran los sistemas ERP (sistemas de planificación de recursos – *Enterprise Resource Planing*) que se han transformado actualmente en algo esencial para el manejo de las grandes empresas [17].

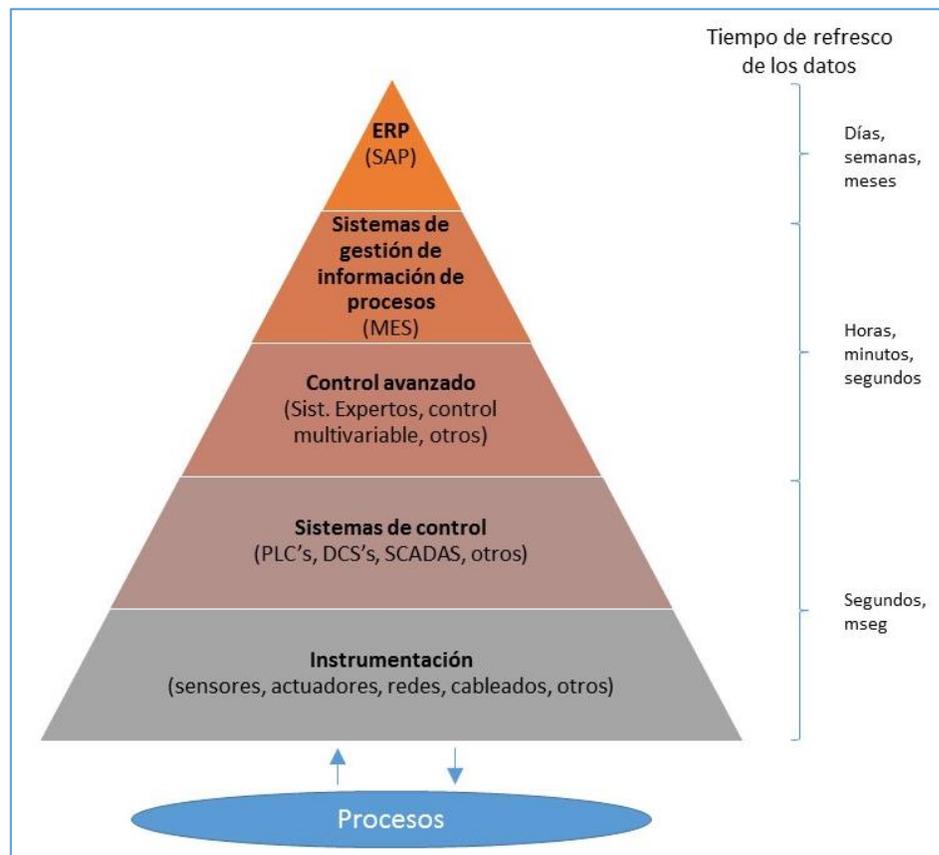


Figura 3. Jerarquía Sistemas de Información [17].

1.3.1 Plataforma RTPM

Las siglas RTPM hacen referencia a *Real Time Performance Management*, última generación de plataformas desarrollada por OSIsoft que Codelco utiliza a nivel corporativo para control supervisor y base de datos en tiempo real [17]. Con esta plataforma es posible la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos operacionales desde los sistemas de control y automatización de procesos, se basa es un conjunto de programas que en su conjunto de donominan *PI-System*.

1.3.1.1 *PI-System*

Es un estándar industrial en infraestructura empresarial para la gestión de datos y eventos en tiempo real, permitiendo conformar sistemas de información. Posibilita una mejor toma de decisiones a través de la contextualización, normalización, análisis y eventos de los datos [18].

PI-System es el motor de la plataforma RTPM ya que monitorea e integra la información de planta [17]. Está diseñado para automatizar completamente la recolección, almacenamiento y distribución de los datos de una planta y su objetivo principal es apoyar al Superintendente de Operaciones, a los Ingenieros de Procesos y Metalurgistas en el control supervisor y estadístico de su planta, en labores de análisis, reporte y toma de decisiones [18]. En este sentido su principal característica es la de ser una herramienta de usuario final.

PI-System está compuesto básicamente de dos subsistemas, el de Historización y el de Cliente, por lo que se puede considerar una arquitectura cliente-servidor. El subsistema de historización es el que se comunica con los equipos frontales de control y sistemas externos, manteniendo una base de datos de series de tiempo, con algoritmos de compactación que permiten el almacenamiento de grandes volúmenes de datos con tiempos de recuperación extremadamente cortos. La estación cliente responde a los estándares de diseño de las aplicaciones Windows-OSIsoft y ofrece más de 400 estándares de interfaces los cuales permiten conectar *PI-System* con Controladores Lógicos Programables (PLCs), Sistema de Control Distribuido (DCS), Sistema de Información de Laboratorio (LIMS), Sistema de Adquisición de Datos y Control Supervisor (SCADA), infraestructura IT (routers, switches, gateways) y otros sistemas relacionados. La arquitectura típica del sistema PI se muestra en la Figura 4 [18].

La plataforma de *PI-System* y sus herramientas se dividen en tres capas [18]:

- Capa Servidor: Es la encargada del almacenamiento de la información, la performance de la plataforma y la interconexión de los periféricos a la plataforma *PI-System*. La plataforma se conecta a Controladores Lógicos Programables (*PLC*), Sistema de Control Distribuido (*DCS*), entre otros.
- Capa Analítica: Tiene como finalidad obtener la información de la capa de servidores, para posteriormente ser operada o manipulada. La manipulación de la información pueden ser cálculos aritméticos o lógicos.
- Capa Visual: Tiene como finalidad la visualización de la información a través de *Smart Client*, en donde usuarios tienen la capacidad de poder generar distintos tipos de consulta a la plataforma o tener una comunicación exclusiva a sus aplicaciones de escritorio. Entre las herramientas que posee se encuentran *PI-ProcessBook* y *PI-DataLink* las que serán descritas a continuación.

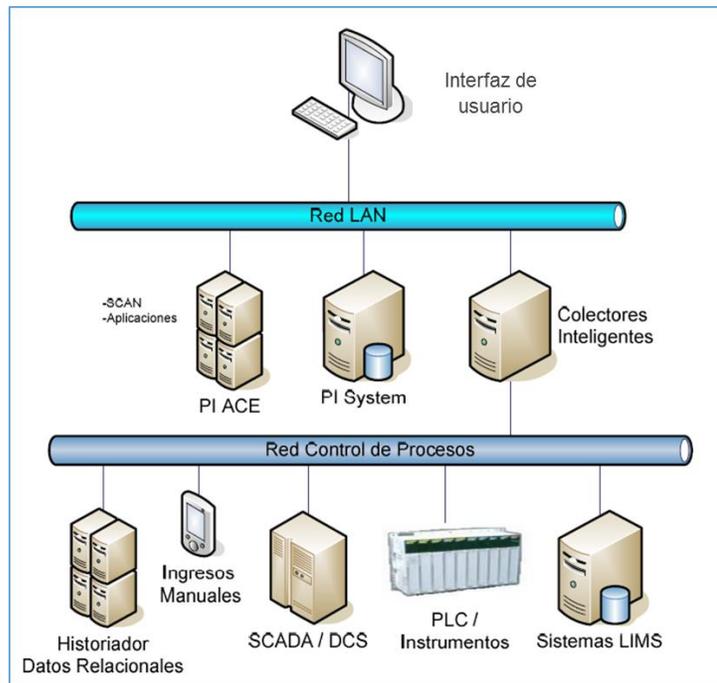


Figura 4. Arquitectura típica servidor PI-System [18].

1.3.1.2 PI-ProcessBook: Interfaz del Proceso

PI-ProcessBook es la interfaz gráfica principal de *PI-System* que permite mostrar de manera eficiente y en tiempo real la información actual y datos históricos que residen en servidores *PI-System* o pertenecientes a otras fuentes de información.

Los despliegues de tendencias, en tiempo real, históricos, estadísticos, etc. se pueden presentar a solicitud del usuario, mediante menús o preconfigurados en diagramas. *ProcessBook* permite seleccionar las variables haciendo clic en el despliegue, activando en forma automática la generación de la tendencia [17]. Se pueden definir varias tendencias en un mismo despliegue.

Existen símbolos que pueden tomar distintos atributos de acuerdo a las variables del proceso tal que su presentación puede ser modificada en tiempo real por alarmas o cálculos externos. Por ejemplo, imágenes que representan equipos en funcionamiento como la columna y su nivel en verde de la Figura 5.

Además, se pueden utilizar *scripts* que permiten automatizar y mostrar las tendencias mediante el uso de *Microsoft Visual Basic* para aplicaciones, que se integran perfectamente en *PI ProcessBook* [17].

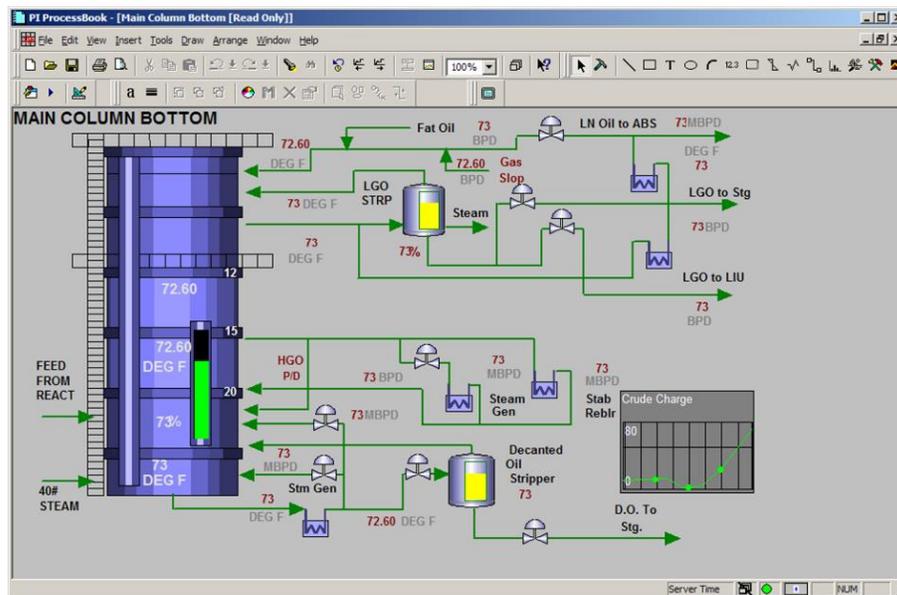


Figura 5. PI-ProcessBook [18].

1.3.1.3 PI-DataLink: Interfaz de Datos Excel

Establece una conexión directa entre el *PI-System* y *Microsoft Excel*, para que los usuarios pueden visualizar variables en tiempo real como también datos históricos. Se pueden crear y publicar informes y realizar complejos análisis de datos. Al proporcionar acceso directo a datos de *PI-System*, *PI-DataLink* hace que el desempeño de tareas como la recopilación de datos, presentación de informes, análisis, previsión y planificación sean procesos rápidos y fiables [17]. Ver Figura 6 con un ejemplo de su uso en análisis de datos.

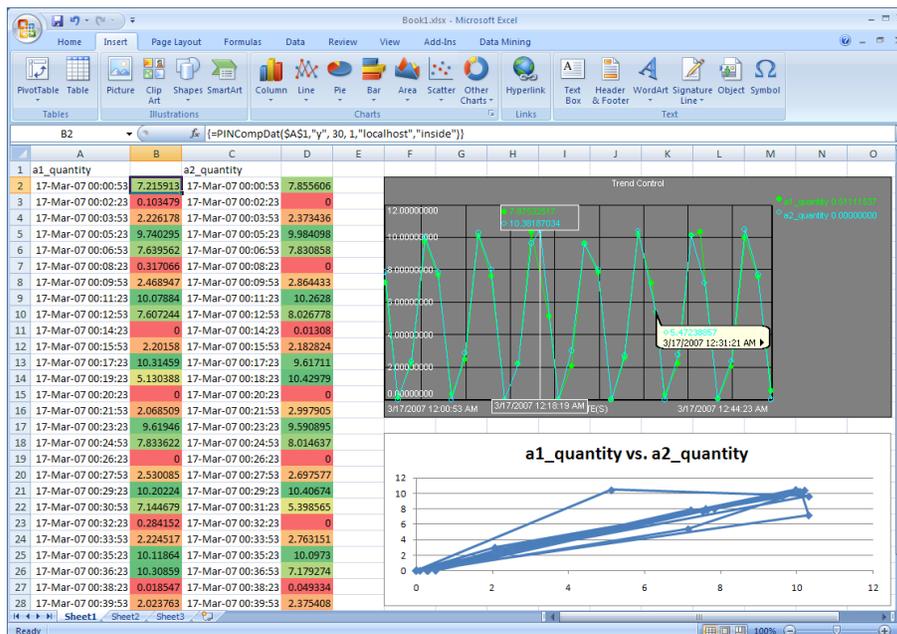


Figura 6. PI-DataLink [18].

1.3.2 Importancia de la Información y la Generación de Conocimiento

La información está constituida por un grupo de datos ya revisados y ordenados, que sirven para construir un mensaje sobre un cierto fenómeno o ente. La información permite resolver problemas y tomar decisiones, ya que su aprovechamiento racional es la base del conocimiento [19].

Por conocimiento se entiende el conjunto de habilidades, experiencias y saberes que una persona o conjunto de ellas poseen en relación con un determinado tema. El conocimiento es un recurso que poseen todas las organizaciones y que reúne un conjunto de requisitos que lo hacen especialmente interesante: se puede generar, almacenar, utilizar, movilizar y desarrollar, es decir, gestionar de diferentes formas. Por tanto, constituye un activo estratégico para todas las organizaciones.

En relación a lo anterior, una perspectiva ampliamente aceptada muestra que el conocimiento es, fundamentalmente, una capacidad cognitiva asociada a la posibilidad de interpretar y transformar información. La información, en cambio, es un conjunto de datos, estructurados y preparados pero inertes e inactivos hasta que no sean interpretados por los que tienen las capacidades necesarias para manipularlos [20].

Se pueden identificar dos formas de conocimiento: el conocimiento explícito, que está expresado de manera formal y sistemática, pudiendo ser comunicado fácilmente y compartido en forma de unas especificaciones de producto, una fórmula científica o un programa de computador que es aquel conocimiento que puede codificarse; y el conocimiento tácito que resulta difícil de expresar formalmente y, por tanto, es difícil de comunicar a los demás, estando profundamente enraizado en la acción y en el cometido personal de un determinado contexto [21].

La Gestión del conocimiento es un concepto aplicado a las organizaciones y tiene el fin de transferir el conocimiento desde el lugar donde se genera hasta el lugar en donde se va a emplear. En este contexto la Jerarquía DIKW (*Data-Information-Knowledge-Wisdom*) relaciona los conceptos: datos, información, conocimiento y comprensión (o sabiduría), representando las relaciones funcionales entre ellos (Figura 7) [22].

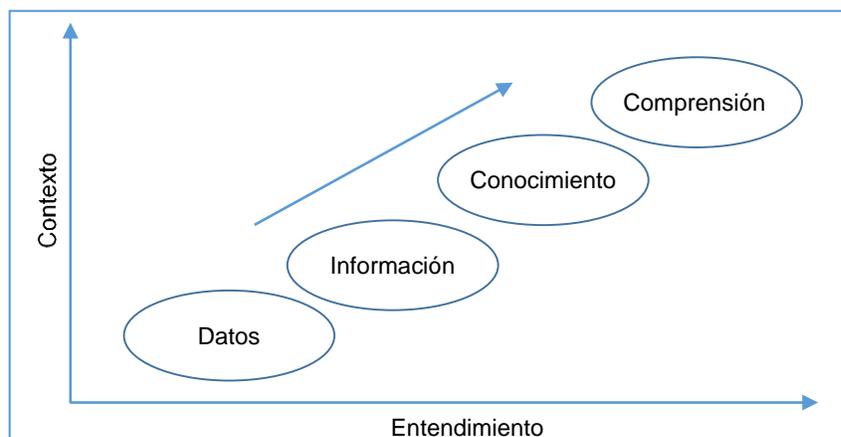


Figura 7. Importancia de la información y el conocimiento [22].

Los datos son hechos concretos o cifras sin ningún contexto o carentes de significado; la información es la aplicación de un orden estructurado a los datos con el propósito de que tengan algún significado; el conocimiento refleja una comprensión empírica más que intuitiva, y se construye por sobre la información para darle un contexto; y la comprensión o sabiduría es la comprensión de la realidad objetiva dentro de un contexto más amplio. La diferencia clave entre el conocimiento y la información es que el conocimiento da poder para tomar decisiones [13].

1.4 Motivación y Contextualización del Trabajo

El desarrollo del presente trabajo de título se realizó bajo la tutela de la empresa CONTAC Ingenieros Ltda. y el Departamento de Ingeniería Civil Química y Biotecnología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

CONTAC Ingenieros Ltda. es una empresa chilena que presta servicios de Ingeniería en la aplicación de tecnologías de automatización, informática industrial y comunicaciones a diversas empresas de las siguientes industrias: Minería, Papelera, Energía, Agua y Química. Su casa matriz se ubica en Santiago de Chile.

Las motivaciones particulares para la propuesta de una metodología formal de análisis de procesos metalúrgicos se basaron en la posibilidad de:

- a) Conformar un sistema de información de un proceso a través de un análisis formal que sea capaz de entregar información valiosa y detallada para la toma de decisiones. Por lo general, las etapas iniciales de análisis de un proceso no son formales y carecen de una estructura genérica.
- b) Permitir la comunicación ordenada y estructurada entre el experto en el proceso y demás trabajadores relacionados al proceso.
- c) Registrar la experiencia desarrollada en torno al proceso producto del análisis realizado y conformar un medio que evite la pérdida de conocimiento y de experiencia con la normal rotación de personal de una empresa.

El trabajo de título reportado en este informe tuvo como fin establecer una metodología de simple aplicación para el análisis de procesos industriales metalúrgicos en fundiciones de concentrados de cobre, específicamente en el proceso de la Fundición Chuquicamata, a través de relaciones causales entre los factores que inciden en el proceso con el fin de desarrollar sistemas de información orientados al desarrollo de paneles de supervisión conducentes a mejorar la eficiencia operacional.

El principal resultado del trabajo fue la propuesta de una metodología de análisis de procesos industriales, y como resultado secundario, su aplicación a un caso de estudio en el proceso de fusión flash de concentrados de cobre de la Fundición Chuquicamata, al cual se aplicó la metodología y como ejemplo de su aplicación se propuso un set de paneles visuales para la supervisión de la variabilidad de la ley de cobre en el eje.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Proponer una metodología de análisis de procesos industriales metalúrgicos en fundiciones de concentrados de cobre que permita establecer las bases de diseño de un sistema de información representado a través de un panel de supervisión para aumentar la eficiencia operacional del proceso.

1.5.2 Objetivos Específicos

Los siguientes objetivos específicos se definieron en base a la información de este capítulo de Introducción y la presentada en el siguiente capítulo de Análisis de Procesos::

- Comparar las técnicas de análisis de procesos existentes.
- Escoger técnicas y herramientas de análisis que permitan un estudio estructurado de los procesos de una fundición de concentrados de cobre identificando sus factores incidentales¹.
- Estructurar una propuesta de metodología de análisis en base a las técnicas y herramientas escogidas para determinar bases para un sistema de información.
- Aplicar la metodología propuesta al proceso de fusión flash de concentrado de la Fundición Chuquicamata para generar un caso de estudio.
- Identificar indicadores pertinentes para la conformación de las bases para el panel de supervisión en el caso de estudio.
- Proponer un panel de supervisión con herramientas de *PI-System* como ejemplo de aplicación al caso de estudio.

¹ Elemento o causa que actúa junto con otras y tiene algún efecto sobre el proceso.

2 Análisis de Procesos

Un proceso es una secuencia de actividades que transforman de manera coordinada insumos en productos o servicios con valor agregado para un beneficiario; un proceso bien diseñado, con información acerca de lo que ocurre y controles incorporados a lo largo del mismo, generará buenos resultados [23].

Existen ciertas características de los procesos industriales que los diferencian de otros tipos de empresas, debido esencialmente a que hay una compleja estructura de muchas etapas, cada una de las cuales consta a su vez de numerosos subcomponentes. Teniendo en cuenta que interviene un elevado flujo de materiales con un valor económico relativamente alto, se comprende que pequeñas modificaciones en las características de diseño y operación pueden tener una importante repercusión económica [23]. Por otro lado, las características y principios del proceso no son, en general, suficientemente bien conocidas como para permitir al ingeniero basarse exclusivamente en la teoría para proceder al diseño y control.

El análisis de procesos es una metodología para examinar su dinámica, teniendo como punto de partida el hecho de que éste fue concebido para llevar a cabo ciertos propósitos u objetivos perdurables, mediante la ejecución de una secuencia articulada de actividades. El análisis de procesos se refiere a la aplicación de métodos analíticos y/o científicos al reconocimiento y definición de problemas, así como al desarrollo de procedimientos para su solución [23]. Por métodos científicos se entiende la acumulación de información, el análisis de esta información por técnicas adecuadas, la síntesis y toma de decisiones, todo ello utilizando una base científica.

Desde un punto de vista general, el análisis de procesos presenta las ventajas que se señalan a continuación: 1. experimentación económica, 2. extrapolación, 3. estudio de conmutabilidad y evaluación de otros planes de actuación. 4. repetición de experimentos. 5. control de cálculo. 6. ensayo de sensibilidad. 7. estudio de la estabilidad del sistema [23]. Por estas razones se puede concluir que el análisis de procesos constituye un elemento muy importante para tomar decisiones más científicas y responsables.

2.1 Principios Generales del Análisis de Procesos

Para planificar, organizar, evaluar y controlar los complejos procesos de la moderna tecnología es preciso conocer los factores fundamentales que influyen en el funcionamiento del proceso. Una forma de conseguir esto consiste en construir una réplica real, a pequeña escala, del proceso y efectuar cambios en las variables de entrada mientras se observa el funcionamiento del proceso. Una técnica de este tipo no solamente lleva tiempo y resulta cara, sino que además puede resultar imposible de llevar a cabo en la práctica [23]. Con frecuencia resulta mucho más conveniente y económico emplear (hasta donde sea posible) un método de representaciones conceptuales del proceso.

Es evidente que la representación conceptual de un proceso real no puede abarcar todos los detalles del proceso, a pesar de los avances de las modernas técnicas de cálculo y de los métodos del análisis matemático. Tal como se ha indicado, solamente se pueden determinar algunos atributos y relaciones del sistema, especialmente aquellos

que son fáciles de medir y tienen importancia desde el punto de vista de su efecto sobre el proceso.

Por consiguiente, se busca el desarrollo de modelos de procesos que puedan ser fácilmente manipulados, que sirven para un elevado número de variables e interrelaciones y que tienen una cierta seguridad de representar el proceso físico real con un razonable grado de confianza [23].

La estrategia general del análisis de procesos complejos sigue un camino relativamente bien definido, que consta de las siguientes etapas:

1. Formulación del problema y establecimiento de objetivos y criterios; delineación de las necesidades de operación.
2. Inspección preliminar y clasificación del proceso con el fin de descomponerlo en subsistemas (elementos).
3. Determinación preliminar de las relaciones entre los subsistemas.
4. Análisis de las variables y relaciones para obtener un conjunto de ellas tan sencillo y consistente como sea posible.
5. Establecimiento de un modelo matemático (en los casos en los que sea aplicable) de las relaciones en función de las variables y parámetros; descripción de los elementos que solamente se pueden representar en forma incompleta mediante modelos matemáticos.
6. Evaluación de la forma en la que el modelo representa al proceso real, utilizando el juicio crítico personal para acoplar las representaciones matemáticas con las no matemáticas.
7. Aplicación del modelo; interpretación y comprensión de los resultados.

Una premisa fundamental a considerar en todo análisis de procesos es que el proceso global se puede descomponer en subsistemas diferentes (elementos) y que existen relaciones entre los subsistemas que, cuando se integran en un todo, pueden simular el proceso.

Una importante razón para dividir el proceso en partes para el análisis se debe a que el proceso es tan complejo que no es posible conocerlo y describirlo con propiedad como un todo. Mediante una adecuada manipulación y ajuste de los subsistemas se intenta obtener una representación razonablemente correcta del proceso total basada en principios relativamente sencillos y bien conocidos para las partes.

2.2 Enfoques o Dimensiones de Análisis de Procesos

Los procesos plantean desafíos multidimensionales, los enfoques de su análisis, diseño o gestión son variados y cualquier estudio que se realice debería idealmente contemplarlos. Algunos enfoques corresponden a:

Eficiencia: la eficiencia se relaciona con el grado en que se utilizan los recursos para realizar un trabajo u obtener un producto. Por tanto, una alta eficiencia supone la optimización en el uso de los recursos disponibles [24]. La eficiencia se centra en los recursos.

Eficacia: La eficacia mide el grado de cumplimiento de los objetivos o metas propuestas; esto es, mide la capacidad de obtener o lograr resultados. La eficacia se centra en los fines, en tanto que la eficiencia lo hace en los medios o recursos [24].

Ciclo de vida de los activos: La gestión del equipo o activos asegura que el equipo funcione y rinda como se esperaba durante toda su vida, es decir, desde la planificación, fabricación, instalación y operación, hasta su desecho [25].

Efectividad: Ser altamente efectivo implica actuar bajo la mejor relación de “equilibrio” o “ponderación” entre eficiencia (mejor uso de los recursos en las actividades cotidianas) y eficacia (alcanzar el logro de las metas u objetivos de la organización), según sea cada situación que se enfrenta [24].

2.3 Metodologías de Análisis de Procesos

A través del tiempo distintos países, como Japón y Estados Unidos, han creado e implementado metodologías de análisis en sus procesos productivos, con el fin de mejorar sus estrategias de gestión. En un inicio, estaban enfocadas en el mantenimiento de sus equipos, pero con el tiempo se han ido perfeccionando y expandiendo a otras áreas, incluso transformándose en verdaderas filosofías de gestión y administración transversales a toda una organización.

Las metodologías y herramientas de análisis de procesos son variadas en enfoque y existe un gran número de ellas. Se hace la distinción entre “*metodologías generales*” y “*metodologías específicas o herramientas*” para abordarlas de manera ordenada. Las primeras corresponden a las metodologías que son transversales a una organización, son amplias en su aplicación y requieren de la implementación de las segundas que son más específicas.

A fin de abordar algunas de ellas se decidió considerar tres “*metodologías generales*” y las “*metodologías específicas o herramientas*” que estas recomiendan. Para que el análisis sea representativo se seleccionaron considerando los enfoques y dimensiones planteados en la sección anterior: eficiencia, eficacia, ciclo de vida de los activos y efectividad. Además, se consideró una publicación de J. Woodhouse en donde analizó las “*metodologías generales*” más representativas y aplicadas en las últimas décadas al análisis y mejoramiento de procesos con excelentes resultados en la mejora sustancial del rendimiento del proceso [26]. Se destacan:

- **Mantenimiento Productivo Total** (TPM, por sus siglas en inglés) que se enfoca en la eficacia y eficiencia de los procesos, y por consiguiente comprende la efectividad.
- **Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad** (RCM, por sus siglas en inglés) se enfoca principalmente en el ciclo de vida de los activos.
- **Gestión Total de la Calidad** (TQM, por sus siglas en inglés), se enfoca en la eficiencia y eficacia de los procesos.

Las “*metodologías específicas o herramientas*” que son utilizadas y recomendadas por las tres “*metodologías generales*” son:

- **Análisis Funcional:** Proceso de identificación, descripción y relación de las funciones de un sistema o proceso que se deben realizar para cumplir con sus metas y objetivos. [RCM]
- **Análisis de Árbol de Fallos (FTA):** Metodología que pretende identificar y evitar eventos no deseados a través de la averiguación de sus causas. [TPM y RCM]
- **Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE):** Herramienta utilizada para la identificación de causas y efectos en modos de fallas. [TPM y RCM]
- **Análisis de Fenómenos-Mecanismos (PM):** Herramienta para el estudio de fenómenos crónicos (habituales) difíciles de erradicar. [TPM]
- **Análisis de Riesgos de Proceso:** Metodología para identificar y evaluar riesgos según su impacto potencial en procesos. [TPM]
- **Herramientas de control y gestión de la calidad:** Herramientas visuales y simples de fácil comprensión y aplicación, entre estas: hoja de recogida de datos, histograma, diagrama de pareto, diagrama de incidencia, diagrama de correlación, estratificación y gráficos de control. [TQM]

2.3.1 Metodologías Generales de Análisis

2.3.1.1 *Mantenimiento productivo total*

TPM o *Total Productive Maintenance* (Mantenimiento Productivo Total), es una filosofía a nivel organizacional que se traduce en un conjunto de estrategias para reducir pérdidas en un entorno de procesos [25]. La metodología TPM se desarrolló inicialmente en las industrias de manufactura y ensamble, y se ha adoptado activamente en las industrias de procesos. En éstas, la prioridad es elevar la eficacia de procesos completos o del conjunto de la planta, no de unidades individuales de equipos, como en parte se busca en industrias de manufactura y ensamble [27].

Para ello se comienza identificando las principales pérdidas comunes a todas las industrias de procesos y describe el pensamiento que apoya la identificación y eliminación de los fallos de equipos y procesos [25]. Las ocho pérdidas más comunes a toda industria de procesos que impiden que una planta alcance su máxima eficacia son [25]: pérdidas de paradas programadas, pérdidas por ajustes de la producción, pérdidas de fallos de equipos, pérdidas de fallos de proceso, pérdidas de producción normales, pérdidas de producción anormales, defectos de calidad, y reprocesamiento (La Figura 8 muestra su relación).

Su aplicación se centra en ocho pilares principales:

1. Mejoras orientadas: actividades pensadas para minimizar las pérdidas que se busca erradicar, que se han medido y evaluado cuidadosamente. Las actividades de mejora orientada se dirigen a temas específicos tales como un proceso, un sistema, una unidad de la instalación, o un procedimiento operativo.
2. Mantenimiento autónomo: los operarios se involucran en el mantenimiento de rutina y en actividades de mejora que evitan el deterioro acelerado, controlan la contaminación y ayudan a mejorar las condiciones del equipo para entornos individuales de procesos.
3. Mantenimiento planificado: abarca tres formas de mantenimiento: el de averías, el preventivo y el predictivo. La finalidad de realizar los últimos dos es eliminar las averías, aunque siguen ocurriendo fallos inesperados, que indica que el equipo de trabajo debe seguir modificando y adaptando el proceso.
4. Formación y adiestramiento: la fuerza laboral de una empresa es un activo de gran valor, y todas las empresas deben formar sistemáticamente a sus empleados.
5. Gestión temprana de equipos: incluye la gestión temprana o anticipada del equipo y del producto. La finalidad de estas actividades es lograr productos que sean fáciles de fabricar y equipos de fácil utilización.
6. Mantenimiento de calidad: es un método para fabricar con excelente calidad desde el comienzo, debiendo evitarse así los defectos a través de los procesos y equipos. La variabilidad de las características de calidad de un producto se controla vigilando la condición de los componentes del equipo que les afectan.
7. Actividades de departamentos administrativos y de apoyo: la mejora de las tareas administrativas se orienta a su eficiencia y velocidad.
8. Gestión de seguridad y entorno: la seguridad y prevención de efectos adversos sobre el entorno son temas importantes en las industrias de proceso. Los estudios de operabilidad combinados con la formación para prevenir accidentes y el análisis de fallos son medios eficaces para tratar estos asuntos.

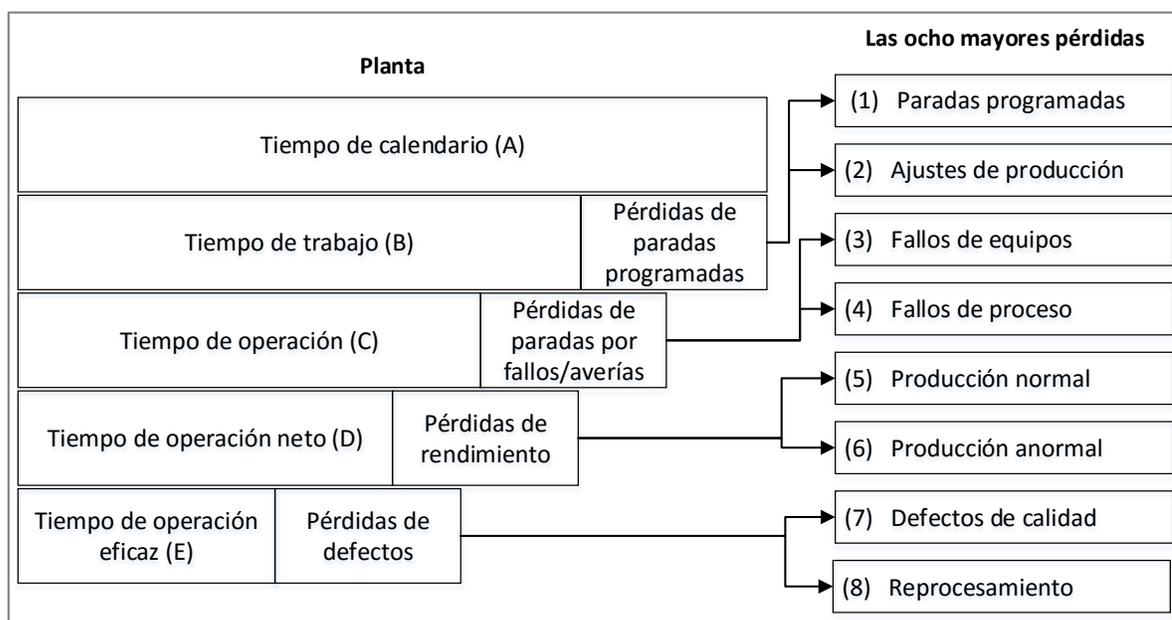


Figura 8. Identificación de pérdidas en TPM. Eficacia global de la planta y estructura de pérdidas [25].

La eficacia de una planta depende de la eficacia con que se utilizan los equipos, materiales, personas y métodos. Por tanto, la mejora de la eficacia de procesos se realiza en torno a los temas vitales de maximizar la eficacia global de la planta (equipo), la eficiencia con que se utilizan materias primas y combustibles (materiales), la de las tareas (personal), y la de la gestión (métodos). Esto se hace examinando las entradas del proceso de producción (equipos, materiales, personas y métodos) e identificando y eliminando las pérdidas asociadas con cada entrada para así maximizar las salidas (productividad, calidad, costos, entregas, seguridad y entorno, y moral).

2.3.1.2 *Mantenimiento centrado en la confiabilidad*

RCM o *Reliability Centred Maintenance* (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad) es una metodología utilizada para elaborar un plan de mantenimiento integral en una planta industrial [28]. Se basa en los ciclos de vida de activos y procesos para establecer y ajustar requerimientos de mantenciones preventivas para todos los niveles de mantención [29].

La confiabilidad es un concepto probabilístico relacionado con fallas, es decir, mientras menos fallas se sucedan en un proceso en un determinado periodo de tiempo, el mismo será más confiable [30].

El objetivo fundamental de la implantación de un Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad o RCM en una planta industrial es aumentar su disponibilidad y disminuir costes de mantenimiento. El análisis de una planta industrial según esta metodología aporta una serie de resultados [31]:

- Mejora la comprensión del funcionamiento de los equipos y sistemas.
- Analiza todas las posibilidades de fallo de un sistema y desarrolla mecanismos que tratan de evitarlos, ya sean producidos por causas intrínsecas al propio equipo o por actos personales.
- Determina una serie de acciones que permiten garantizar una alta disponibilidad de la planta.

Las acciones de tipo preventivo que evitan fallos y que incrementan la disponibilidad de la planta son de varios tipos como: tareas de mantenimiento, que agrupadas forman el plan de mantenimiento de una planta industrial o una instalación; procedimientos operativos tanto de producción como de mantenimiento; modificaciones o mejoras posible; definición de una serie de acciones formativas realmente útiles y rentables para la empresa; determinación del stock de repuesto que es deseable que permanezca en planta; entre otros.

Esta metodología se basa en el análisis de fallos, tanto aquellos que ya han ocurrido como los que se están tratando de evitar con determinadas acciones preventivas, y aquellos que tienen cierta probabilidad de ocurrir y pueden tener consecuencias graves. La Figura 9 presenta un esquema resumen de esta metodología. Durante el análisis de fallos se debe contestar a seis preguntas claves [31]:

1. ¿Cuáles son las funciones y los estándares de funcionamiento en cada sistema?
2. ¿Cómo falla cada equipo?

3. ¿Cuál es la causa de cada fallo?
4. ¿Qué consecuencias tiene cada fallo?
5. ¿Cómo puede evitarse cada fallo?
6. ¿Qué debe hacerse si no es posible evitar un fallo?

Esta metodología se aplica a todo el proceso o planta, no sólo a un equipo en particular. Es el conjunto el que no debe fallar, y no alguno de sus elementos individuales, por muy importantes que sean. No son los equipos los que son críticos, sino los fallos. Un equipo no es crítico en sí mismo, sino que su posible criticidad está en función de los fallos que pueda tener.

Con la metodología se deben identificar los posibles fallos, clasificarlos según su criticidad, y adoptar medidas preventivas que los eviten o minimicen sus efectos, y cuyo coste sea proporcional a su importancia y al coste de su resolución. Una buena idea es dividir la planta en los sistemas principales que la componen, y estudiar cada uno de ellos con el nivel de profundidad adecuado.

La metodología RCM supone ir completando una serie de fases para cada uno de los sistemas que componen la planta:

Fase 0: Codificación y listado de todos los subsistemas, equipos y elementos que componen el sistema que se está estudiando. Recopilación de esquemas, diagramas funcionales, diagramas lógicos, etc.

Fase 1: Estudio detallado del funcionamiento del sistema. Listado de funciones del sistema en su conjunto. Listado de funciones de cada subsistema y de cada equipo significativo integrado en cada subsistema.

Fase 2: Determinación de los fallos funcionales y fallos técnicos.

Fase 3: Determinación de los modos de fallo o causas de cada uno de los fallos encontrados en la fase anterior.

Fase 4: Estudio de las consecuencias de cada modo de fallo. Clasificación de los fallos en críticos, importantes o tolerables en función de esas consecuencias.

Fase 5: Determinación de medidas preventivas que eviten o atenúen los efectos de los fallos.

Fase 6: Agrupación de las medidas preventivas en sus diferentes categorías. Elaboración del Plan de Mantenimiento, lista de mejoras, planes de formación y procedimientos de operación y de mantenimiento.

Fase 7: Puesta en marcha de las medidas preventivas.

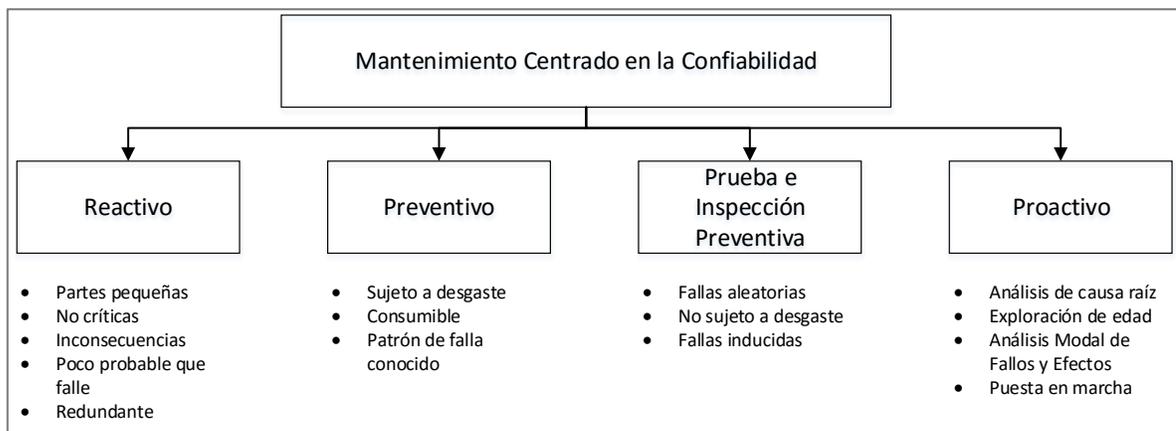


Figura 9. Aplicaciones básicas de los componentes del análisis RCM.

2.3.1.3 Gestión de calidad total

Gestión de Calidad Total (TQM) se refiere a los métodos de gestión utilizados para mejorar la calidad y la productividad en las organizaciones empresariales. TQM es un enfoque integral de gestión que funciona horizontalmente a través de una organización, la participación de todos los departamentos y empleados y que se extiende para incluir a los proveedores y los clientes / consumidores [30].

TQM ofrece un marco para la implementación de iniciativas eficaces de calidad y productividad que pueden aumentar la rentabilidad y competitividad de las organizaciones a través de sistemas de gestión que se centran en la calidad.

Las diferentes perspectivas conceptuales de la calidad pueden organizarse en dos categorías, según consideren calidad objetiva y calidad subjetiva [30]. La calidad objetiva deriva de la comparación entre un estándar y un desempeño, referidos a características de calidad medibles cuantitativamente con métodos ingenieriles o tecnológicos, siendo independiente de la persona que realiza la medición o adquiere el producto [32]. En cambio, la calidad subjetiva se basa en la percepción y en los juicios de valor de las personas, y es medible cualitativamente estudiando la satisfacción del cliente.

Los elementos básicos de TQM, según lo expuesto por la Sociedad Americana para el Control de Calidad [33], son: 1) políticas, la planificación y la administración; 2) el diseño del producto y el control de cambio de diseño; 3) el control del material adquirido; 4) Control de calidad de la producción; 5) contacto del usuario y el rendimiento de campo; 6) las medidas correctivas; y 7) la selección de empleados, capacitación y motivación.

El pilar fundamental en el cual se basa el estudio de la calidad, es el control de calidad estadístico (SQC) que se implementa en TQM en el tercer y cuarto elemento. Para el método SQC se exige que las normas de calidad se constituyan por primera vez por el establecimiento de medidas para un artículo en particular y definiendo así lo que representa la calidad. Las mediciones pueden ser dimensiones, composición química o cualquier otra característica medible del objeto [30]. Pruebas de funcionamiento se realizan para establecer divergencias con respecto a una medición base (arriba o debajo de ella). Esta "banda" de resultados aceptables se registra en uno o varios gráficos de control.

Después, el control de calidad comienza durante el propio proceso de producción, las muestras son continuamente tomadas y medidas, registrando los resultados en listas y gráficos. Si las mediciones comienzan a caer fuera de la banda o muestran una tendencia indeseable, el proceso se detiene hasta que las causas de la divergencia se encuentran y se corrigen. Así SQC, se basa en el muestreo y la medición continua frente a un estándar y a acciones correctivas inmediatas si se presentan desviaciones del rango aceptable [30].

En el contexto moderno TQM requiere una gestión participativa, mejora continua del proceso y la implementación de equipos de trabajo [30]. La gestión participativa se refiere a la colaboración íntima de todos los miembros de una empresa en el proceso de gestión. En la Figura 10 se incluye un resumen esquemático de la metodología TQM.

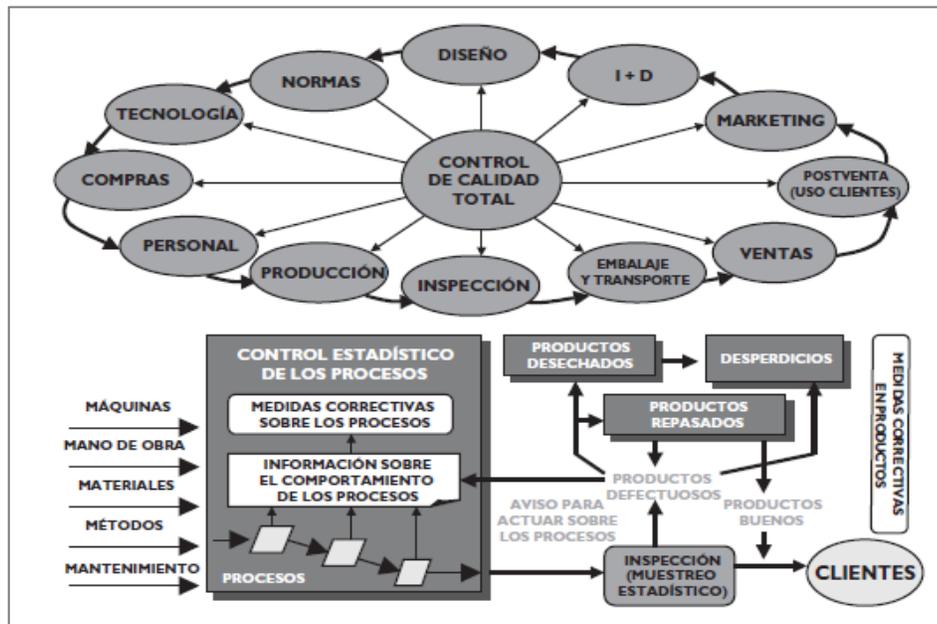


Figura 10. Enfoque de aseguramiento de la calidad [30].

2.3.2 Metodologías Específicas o Herramientas de Análisis

Se realiza una pequeña referencia a cada una de las técnicas y herramientas mencionadas al inicio de la sección 2.3.

2.3.2.1 Análisis funcional

Es un proceso sistemático de identificación, descripción y relación de las funciones de un proceso o sistema que se deben realizar para cumplir con sus metas y objetivos. El análisis funcional identifica y enlaza funciones de un sistema considerando los requerimientos operacionales y restricciones del proceso [34].

Una operación o función es la finalidad prevista de un elemento, sistema o proceso, descrita por un estándar de rendimiento solicitado. Una descripción de la función completa debe incluir los límites específicos de rendimiento [35].

El proceso implica el análisis de cada requisito del sistema para identificar todas las funciones que se deben realizar para cumplir el requerimiento principal. El proceso se

repite desde la parte superior hacia la inferior para que sub-funciones sean parte de las áreas funcionales más grandes [35]. Las funciones están dispuestas en una secuencia lógica causal de modo que cualquier uso operativo especificado del sistema se puede rastrear de un trayecto de extremo a extremo.

El proceso es iterativo, recursivo y continúa hasta que todos los niveles deseados del sistema se han analizado y definido. Es casi seguro que existan formas alternativas para descomponer funciones, por lo tanto, el resultado depende de la creatividad, las habilidades y la experiencia de los ingenieros que realizan el análisis [34]. El análisis está completamente definido cuando se consideran todas las exigencias comprendidas y se sabe que las funciones son viables, verificables e internamente consistentes y se representa a través de un diagrama de descomposición funcional como el mostrado en la Figura 11.

La construcción del Análisis Funcional debe considerar [34]:

- El análisis se realiza de lo general a lo particular: una vez que se ha establecido el propósito clave (función principal) puede avanzarse en la especificación de niveles inferiores, para esto es útil plantearse la pregunta: ¿qué otros resultados es necesario alcanzar para permitir que el propósito clave se logre?
- El análisis funcional debe identificar funciones discretas: es decir, suficientemente completas en su descripción de modo que describan una finalidad prevista de un elemento, sistema o proceso, descrita por un estándar de rendimiento solicitado. Las funciones son totalmente diferenciadas unas de otras.
- El análisis funcional debe elaborarse respetando un formato de redacción: en su elaboración se siguen ciertas reglas encaminadas a mantener uniformidad de criterios. La redacción del propósito principal, propósito clave, o función clave de análisis, se suele elaborar siguiendo la estructura:

VERBO + OBJETO + CONDICIÓN

El verbo describe la acción que la función efectúa sobre el objeto, describiendo luego la condición bajo la cual tal acción ocurre.

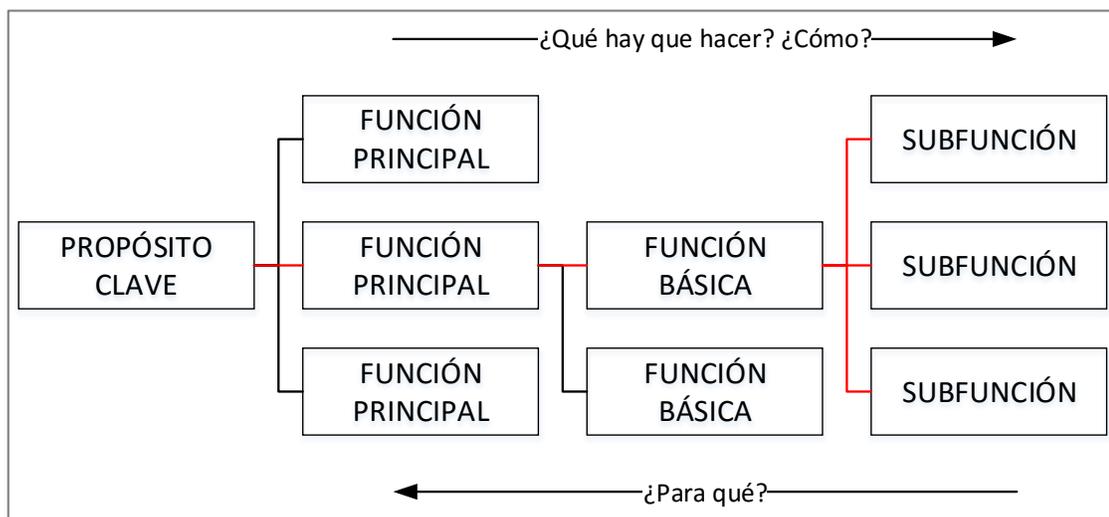


Figura 11. Esquema general de un diagrama funcional [35].

2.3.2.2 *Análisis de árbol de fallos (FTA)*

Este método deductivo de análisis parte de la previa selección de un "suceso no deseado o evento que se pretende evitar", sea éste un accidente de gran magnitud (explosión, fuga, derrame, etc.) o sea un suceso de menor importancia (fallo de un sistema de cierre, etc.) para averiguar en ambos casos los orígenes de los mismos [36].

Seguidamente, de manera sistemática y lógica se representan las combinaciones de las situaciones que pueden dar lugar a la producción del "evento a evitar", conformando niveles sucesivos de tal manera que cada suceso esté generado a partir de sucesos del nivel inferior, siendo el nexo de unión entre niveles la existencia de "operadores o puertas lógicas".

El árbol se desarrolla en sus distintas ramas hasta alcanzar una serie de "sucesos básicos", denominados así porque no precisan de otros anteriores a ellos para ser explicados [36]. También alguna rama puede terminar por alcanzar un "suceso no desarrollado" en otros, sea por falta de información o por la poca utilidad de analizar las causas que lo producen.

Los nudos de las diferentes puertas y los "sucesos básicos o no desarrollados" deben estar claramente identificados. Estos "sucesos básicos o no desarrollados" que se encuentran en la parte inferior de las ramas del árbol se caracterizan por ser independientes entre ellos y las probabilidades de que acontezcan pueden ser calculadas o estimadas [36].

Para ser eficaz, un análisis por árbol de fallos debe ser elaborado por personas profundamente conocedoras de la instalación o proceso a analizar y que a su vez conozcan el método y tengan experiencia en su aplicación; por lo que, si se precisa, se deberán constituir equipos de trabajo pluridisciplinarios (técnico de seguridad, ingeniero del proyecto, ingeniero de proceso, etc.) para proceder a la reflexión conjunta que el método propicia [36].

Desarrollo del árbol: Prefijado el "evento que se pretende evitar" en el sistema a analizar, se procede descendiendo escalón a escalón a través de los sucesos inmediatos o sucesos intermedios hasta alcanzar los sucesos básicos o no desarrollados que generan las situaciones que, concatenadas, contribuyen a la aparición del "suceso no deseado". Se utiliza una simbología determinada en su representación. Ver ejemplo en Figura 12.

Explotación del árbol: La explotación de un árbol de fallos puede limitarse a un tratamiento "cualitativo" o acceder a un segundo nivel de análisis a través de la "cuantificación" cuando existen fuentes de datos relativas a las tasas de fallo de los distintos componentes.

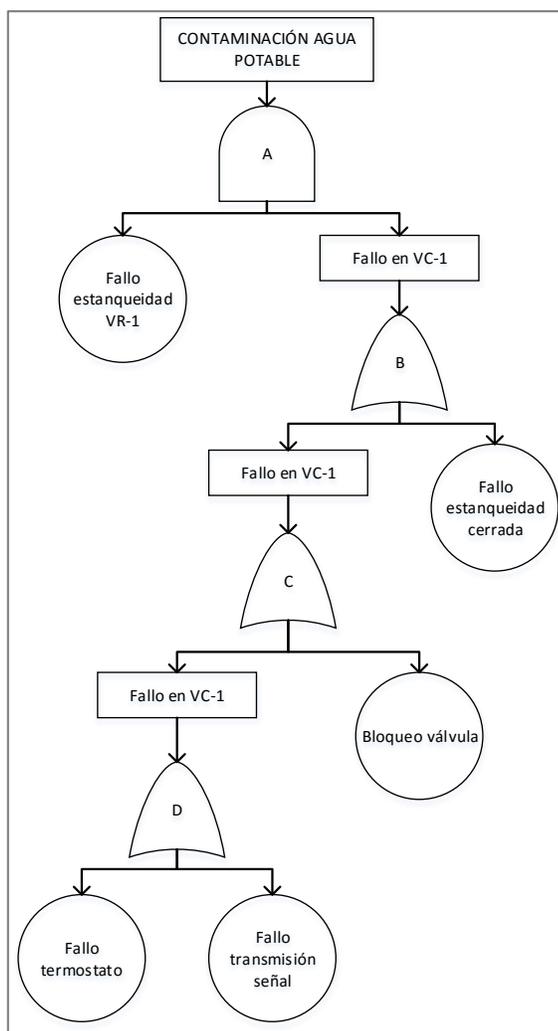


Figura 12. Ejemplo de árbol de fallas [31].

2.3.2.3 Análisis modal de fallos y efectos (AMFE)

Aunque la técnica se aplica fundamentalmente para analizar un producto o proceso en su fase de diseño, este método es válido para cualquier tipo de proceso o situación desde el diseño y montaje hasta la fabricación, comercialización y la propia organización en todas las áreas funcionales del proceso [37].

El principal interés del AMFE es el de resaltar los puntos críticos con el fin de eliminarlos o establecer un sistema preventivo (medidas correctoras) para evitar su aparición o minimizar sus consecuencias,

Este método emplea criterios de clasificación que permiten jerarquizar los problemas y sus acciones correctoras a través de un índice que considera los criterios de Detectabilidad, Frecuencia y Gravedad del modo de fallo [37].

Se indican de manera ordenada y esquemática los pasos necesarios con los correspondientes informaciones a rellenar en la hoja de análisis (ejemplo en Tabla 1) para

la aplicación del método AMFE de forma genérica, pudiendo adaptarse a las características e intereses de cada organización [37]:

1. Disponer de un esquema gráfico del proceso productivo (*layout*).
2. Seleccionar procesos/operaciones clave para el logro de los resultados esperados.
3. Crear grupo de trabajo conocedor del proceso en sus diferentes aspectos. Los miembros del grupo deberían haber recibido previamente conocimientos de aplicación de técnicas básicas de análisis de fallos y del AMFE.
4. Recabar información sobre las premisas generales del proceso, funciones de servicio requeridas, exigencias de seguridad y salud en el trabajo y datos históricos sobre incidentes y anomalías generadas.
5. Disponer de información sobre prestaciones y fiabilidad de elementos clave del proceso.
6. Planificar la realización del AMFE, conducido por persona conocedora de la metodología.
7. Aplicar técnicas básicas de análisis de fallos. Es esencial el diagrama de incidencia.
8. Cumplimentar el formulario del AMFE, asegurando la fiabilidad de datos y respuestas por consenso.
9. Reflexionar sobre los resultados obtenidos y emitir conclusiones sobre las intervenciones de mejora requeridas.
10. Planificar las correspondientes acciones de mejora.

Los conceptos claves del análisis son el “Modo de Fallo”: forma en la que una pieza o conjunto pudiera fallar potencialmente a la hora de satisfacer el propósito del proceso y/o los requisitos de rendimiento; el “Efecto” es el síntoma detectado del modo de fallo; la “Causa” o causas potenciales del modo de fallo están en el origen del mismo y constituyen el indicio de una debilidad del diseño cuya consecuencia es el propio modo de fallo.

Tabla 1. Ejemplo de formulario de AMFE para el análisis de operaciones de soldadura y marcado del proceso de prensas y chapistería [37]

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)															
AMFE DE PROYECTO <input type="checkbox"/>		AMFE DE PROCESO <input type="checkbox"/>			DENOMINACIÓN DEL COMPONENTE / PARTE DEL PROCESO				CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN DEL COMPONENTE			Hoja:			
NOMBRE Y DPTO. DE LOS PARTICIPANTES Y/O PROVEEDOR:					COORDINADOR: (Nombre / Dpto.)				MODELO/SISTEMA/FABRICACIÓN			FECHA INICIO: FECHA REVISIÓN:			
OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLO Nº	FALLOS POTENCIALES			ESTADO ACTUAL				ACCIÓN CORRECTORA	RESPONSABLE / PLAZO	SITUACIÓN DE MEJORA				
		MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	MEDIDAS DE ENSAYO Y CONTROL PREVISTAS						ACCIONES IMPLANTADAS	F	G	D	IPR
	1.1	Falta soldadura	Retrabajos, ruidos, falta de rigidez	Defectos de acoplamiento	Ninguna	8	8	2	128	Previstos grupos y aprietes en zona MIG	Proceso Chapa / Anteproyecto				
	1.2			Pestañas fuera de geometría	Ninguna	8	8	2	128	Pestañas bien diseñadas para garantizar geometría	Proyectos / Anteproyecto				
	1.3	Soldadura defectuosa	Agujeros en chapa	Desacoplamiento chapas	Ninguna	8	8	2	128	Garantizar geometrías y acoplamientos	Proceso Chapa / Anteproyecto				

2.3.2.4 Análisis P-M

El Análisis P-M (Fenómenos-Mecanismos) es una herramienta para eliminar fallos crónicos de equipos, pérdidas de calidad, seguridad y de fiabilidad. Habitualmente los métodos de mantenimiento preventivo se orientan a prevenir y restaurar problemas esporádicos de equipos. Sin embargo, los problemas crónicos permanecen latentes sin diagnosticar y resolver.

El análisis P-M es una técnica para analizar fenómenos tales como los fallos o defectos de proceso en función de sus principios físicos y para dilucidar los mecanismos de esos fenómenos en relación con los cuatro *inputs* de la producción (equipos, materiales, personas, y métodos) [25]. Es una técnica apropiada para abordar las pérdidas crónicas (de constante aparición) que surgen de una variedad de causas complejas, interrelacionadas, y problemas intratables que se resisten a repetidos intentos de solución por otros métodos. Ver efecto de aplicación en Figura 13.

El éxito del análisis se fundamenta realizando observaciones directas y cuidadosas del fenómeno actual y analizándolas en función de las leyes y principios físicos. Para ello se deben seguir los siguientes pasos [25]:

Paso 1: Clarificar el fenómeno. Para comprender con precisión un fenómeno, hay que estudiar cómo se manifiesta, dónde y cuándo ocurre, y todo ello directamente en el lugar donde se produce.

Paso 2: Investigar los principios físicos involucrados. Analizar el problema en función de las leyes y principios físicos incidentes. Se describe cómo sucede el problema: la mecánica de su generación, pero no se describe en términos de sus causas posibles.

Paso 3: Identificar las condiciones que producen el problema. Identificar todas las condiciones que dan lugar consistentemente al problema. ¿Cuáles son las condiciones que deben estar presentes para que el problema se manifieste?

Paso 4: Considerar los *inputs* de la producción. Investigar las relaciones entre las condiciones establecidas en el paso previo y los *inputs* de producción (equipos, materiales, personal y métodos). Relacionar todos los factores.

Paso 5: Determinar las condiciones óptimas. Con base en objetos reales, planos y estándares, determinar la condición óptima para cada factor causal. ¿Idealmente, qué condiciones, si están presentes, evitarían la producción del problema? Por ejemplo, ¿se han identificado valores estándares para las condiciones de proceso?

Paso 6: Investigar los métodos de medición. Determinar los métodos más fiables para medir los desfases entre las condiciones causales y sus valores ideales.

Paso 7: Identificar deficiencias. Relacionar todos los factores que se desvían del óptimo y cualquier anomalía o pequeñas deficiencias, investigar los procesos y mecanismos relevantes e identificar cualquier desviación de condiciones.

Paso 8: Formular e implantar plan de mejora. Redactar e implantar un plan para corregir cada deficiencia y controlar o eliminar su repetición.

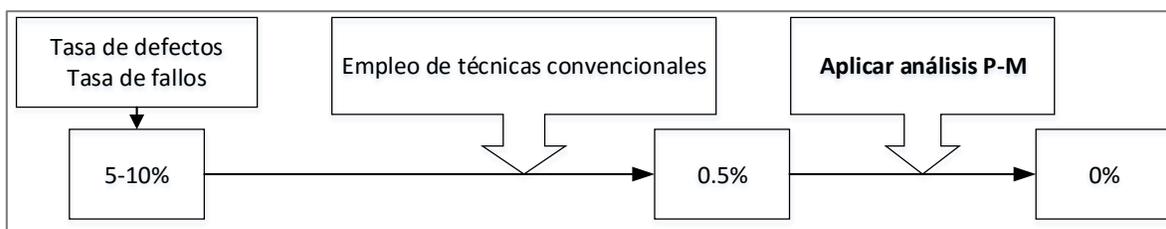


Figura 13. Efecto de la aplicación del Análisis P-M [25].

2.3.2.5 Análisis de riesgos de procesos (ARP)

Los procesos físicos o químicos en plantas deben desarrollarse en condiciones de trabajo determinadas, siendo la composición de las sustancias químicas, la cantidad de las mismas en procesos discontinuos o el flujo másico en procesos continuos, la presión, y la temperatura, algunas de las variables fundamentales del sistema que exigen ser perfectamente controladas [38].

El análisis de riesgos en este tipo de instalaciones requiere considerar todas las variables que condicionan el proceso físico o químico en cuestión, planteándose variaciones de las mismas ante posibles fallos o deficiencias, y consecuentemente la capacidad de respuesta de la instalación en base a sus características y a los elementos de seguridad de que está constituida, muchos de los cuales deben garantizar una respuesta activa [39].

Una de las técnicas existentes para la identificación y evaluación de riesgos es *HazOp* (*Hazard and operability studies* - Análisis de peligros y operabilidad). Tiene como objetivos principales: mostrar una herramienta de análisis de riesgos que permita detectar fallas de equipo y operacionales ocasionadas por fallas administrativas, integrar en un análisis de riesgos los controles administrativos y de ingeniería y mejorar la operabilidad y confiabilidad de los equipos de proceso [39].

El principio de la metodología es descubrir los factores que evitan que el sistema a considerar funcione según los objetivos del diseño [38]. Se busca determinar: a) las desviaciones de los parámetros de operación y de un paso del procedimiento o programa, b) las causas que las propician y sus consecuencias, c) los sistemas de protección o mitigación, que reducen la frecuencia de dichas causas y la gravedad de sus consecuencias, d) los índices de riesgos, los cuales se obtienen combinando las frecuencias/probabilidades y la gravedad y e) las recomendaciones para eliminar, reducir o controlar los riesgos encontrados y las acciones para resolverlas.

Se aplican de forma sistemática a cada una de las partes o "nudos" en que se divide la instalación (tuberías, equipos, servicios auxiliares, etc.), unas palabras-guías (No, Mas, Menos, Inverso, Además de, Parte de, Diferentes de y cualquier otra que sea atingente al análisis) asociadas a cada una de las variables que intervienen en el proceso: caudal, presión, temperatura, etc., tratando de averiguar la posibilidad de que una causa particular lleve a un mal funcionamiento de la instalación o incluso del lugar a una situación peligrosa [38].

Estas palabras-guías que caracterizan el método, son utilizadas cualificando o cuantificando a todas y cada una de las variables en vistas a estimular la reflexión sobre la diversidad de situaciones en que puede encontrarse la instalación, algunas inverosímiles y que dejarán de ser consideradas, pero otras por la posibilidad de producirse y/o por sus consecuencias serán analizadas [38].

2.3.2.6 Herramientas de control y gestión de la calidad

Las siete herramientas clásicas de control y gestión de calidad [30] se caracterizan por ser sencillamente interpretables al ser analizadas visualmente y por utilizar métodos estadísticos simples, por lo que resultan de fácil comprensión y aplicación, ver ejemplos en Figura 14. Estas corresponden a [30]:

Hoja de recogida de datos: sirve para recoger los datos necesarios y poder realizar un posterior análisis de éstos. Su principal utilidad proviene del empleo de datos objetivos a la hora de examinar un fenómeno determinado. Como sirven de base para adoptar decisiones, es importante que el método de recogida y el análisis de los propios datos garanticen una interpretación correcta del fenómeno estudiado.

Histograma: son diagramas de barras que muestran el grado y la naturaleza de variación dentro del rendimiento de un proceso. El histograma muestra la distribución de frecuencias de un conjunto de valores mediante la representación con barras. Permite tener una idea del tipo de distribución estadística.

El diagrama de Pareto: herramienta de representación gráfica que identifica los problemas más importantes, en función de su frecuencia de ocurrencia o coste (dinero, tiempo), y permite establecer las prioridades de intervención. Se basa en el principio de Pareto el cual indica que el 80 % de los problemas son originados por un 20 % de las causas y ayuda a separar los errores críticos, que normalmente suelen ser pocos, de los muchos no críticos o triviales.

El diagrama de Incidencia: se utiliza para recoger de manera gráfica todas las posibles causas de un problema o identificar los aspectos necesarios para alcanzar un determinado objetivo (efecto). También se le denomina diagrama causa-efecto o diagrama de Ishikawa.

El diagrama de correlación: herramienta gráfica para determinar si existe relación entre dos variables, normalmente de causa y efecto.

La estratificación: consiste en dividir los datos recogidos en grupos homogéneos para facilitar una mejor comprensión del fenómeno estudiado. A cada grupo homogéneo se lo denomina estrato. Permite investigar los aspectos más significativos o las áreas más importantes donde es necesario centrar la atención.

Gráfico de control: es una herramienta gráfica que se utiliza para medir la variabilidad de un proceso. Consiste en valorar si el proceso está bajo control o fuera de control en función de unos límites de control estadísticos calculados.

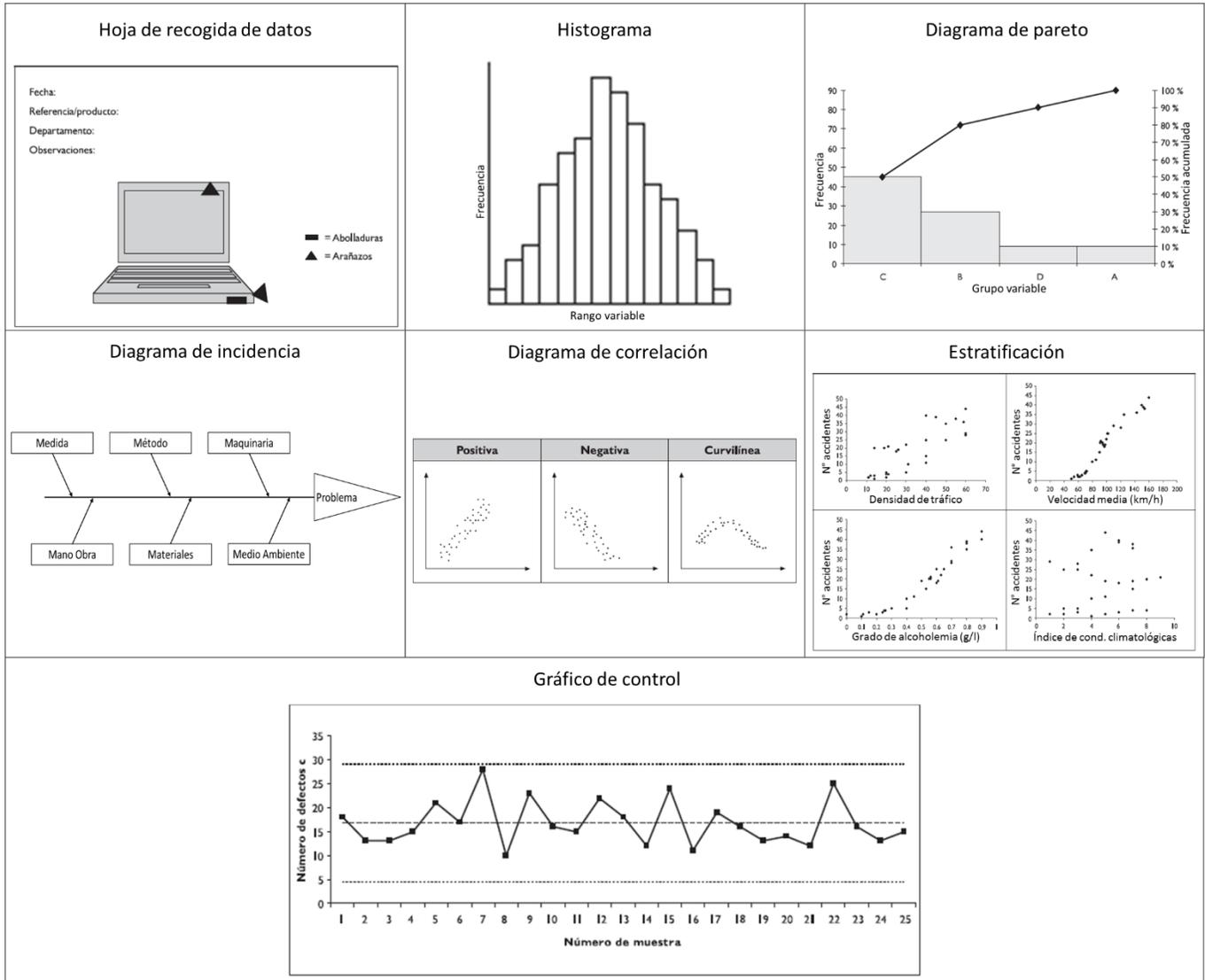


Figura 14. Ejemplos de herramientas de control y gestión de calidad [30].

3 Propuesta de Metodología de Análisis de Procesos para entregar las Bases de un Sistema de Información

Para abordar la construcción de una metodología genérica de análisis de procesos metalúrgicos y en particular una para el proceso de fusión flash de concentrado de cobre que permita entregar las bases de un sistema de información, en primer lugar, se debe considerar el enfoque o dimensión que se busca abarcar como producto de la aplicación de ésta. La propuesta de metodología se aborda del punto de vista de la eficiencia operacional, es decir, la minimización de pérdidas y la maximización de la capacidad de los recursos a través de la monitorización de los factores claves del proceso porque esto es un punto de gran interés para el proceso en estudio [40].

Se puede considerar que una desviación en las especificaciones del producto generado en el proceso es una falla del mismo y es pertinente abordarlo con las herramientas de análisis anteriormente planteadas para minimizarlo y en el mejor de los casos erradicarlo completamente.

Las metodologías de análisis de procesos revisadas en la sección 2.3 (RCM, TPM y TQM) y sus herramientas de análisis, son ampliamente utilizadas en las industrias de hoy en día [26]. Son herramientas ya probadas y perfeccionadas, además, buscan ser simples e intuitivas para facilitar su implementación. Aprovechando estas características se buscó en este trabajo utilizar las que mejor se adaptan a los requerimientos propios y en una secuencia adecuada respondiendo a las motivaciones del proyecto más arriba mencionadas.

En primer lugar, se observaron las formas de análisis por parte de las “*metodologías generales*” para entender cuál sería la más adecuada en relación al proceso metalúrgico en estudio. En segundo lugar, se realizó una comparación entre las “*metodologías específicas*” para conocer cuáles son sus ventajas y desventajas y analizar los atributos particulares de cada una de ellas. En tercer lugar, se definieron los requerimientos de la metodología a proponer y a partir de estos se analizó cuáles de las “*metodologías específicas*” se adaptaron mejor a ellos y la mejor secuencia de pasos para responder al mejor flujo de información. Finalmente, se definió un resumen y un esquema de la metodología propuesta.

3.1 Forma de Análisis de un Proceso

Cada “*metodología general*” tiene una forma particular de analizar un proceso, en donde por ejemplo, en una fase inicial se comienza analizando solo algunas partes de él sin mayor profundidad y en fases siguientes se abarca completamente con mayor profundidad.

Se caracterizó la forma de análisis de un proceso desde tres puntos de vista: extensión, momento y profundidad. La *extensión* se refiere al análisis de algunas partes o de la totalidad del proceso, el *momento* se refiere a la fase de análisis y la *profundidad* se refiere a si el análisis es superficial o completo.

Las diferentes fases consecutivas de la metodología TPM son: mejoras orientadas, mantenimiento autónomo, mantenimiento planificado, formación y adiestramiento,

gestión temprano de equipos, mantenimiento de calidad, actividades de departamentos administrativos y de apoyo, y gestión de seguridad y entorno. Las primeras fases se enfocan en algunas partes del proceso y paulatinamente abarcan el proceso completo, la profundidad de análisis es de menos a más a medida que se implementan las fases.

La metodología RCM cuenta con 7 fases: listado de todos los subsistemas, listado de funciones del sistema en su conjunto, fallos funcionales, consecuencias de cada modo de fallo, medidas preventivas, plan de mantenimiento y puesta en marcha. Desde las primeras fases se abarca el proceso completo y a medida que se avanza se torna más específico, la profundidad de análisis es de menos a más.

Los elementos básicos de TQM son: 1) políticas, la planificación y la administración; 2) el diseño del producto y el control de cambio de diseño; 3) El control del material adquirido; 4) Control de calidad de la producción; 5) contacto del usuario y el rendimiento de campo; 6) las medidas correctivas; y 7) la selección de empleados, capacitación y motivación. Al igual que TPM, en TQM las primeras fases se enfocan en algunas partes del proceso y paulatinamente abarcan el proceso completo y la profundidad de análisis es de menos a más a medida que se implementan las fases.

En la Figura 15 se muestra gráficamente la *extensión, momento y profundidad* para TPM, RCM y TQM. Se puede observar que las tres abordan la *profundidad* de la misma forma, de menor a mayor. Con respecto a la *extensión*, TPM y TQM analizan el proceso por partes y progresivamente se toma como conjunto, en cambio RCM lo aborda de manera conjunta para finalmente analizar las partes o sistemas específicos.

Vale recalcar que la metodología a proponer busca analizar un proceso particular del punto de vista de la eficiencia operacional y no busca ser una filosofía transversal a toda la organización como si son TPM y TQM, la propuesta buscada es similar a lo abordado por la metodología RCM que se acota a un proceso y no a la organización completa de la empresa. Por lo tanto, para la metodología a proponer es razonable abordar el proceso en conjunto y después analizar sus partes, como lo hace RCM, porque la complejidad no es tan extensa como las que abordan TPM y TQM que deben inicialmente analizar de manera separada demasiados frentes para poder comprender el conjunto.

En las tres metodologías analizadas, la profundidad de análisis tiene el mismo patrón (de menor a mayor profundidad), y es sensato considerar el mismo para la metodología a proponer porque es una manera progresiva de ir comprendiendo el proceso en análisis de lo más simple a lo más complejo.

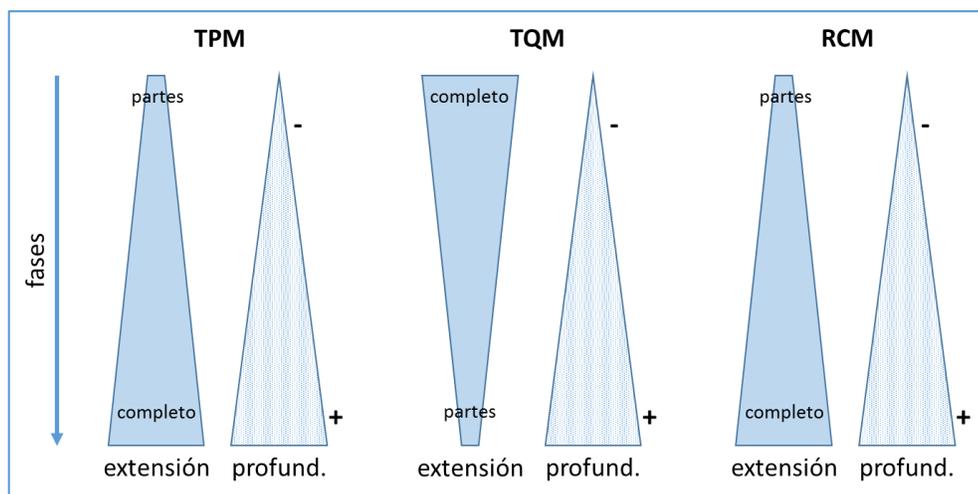


Figura 15. Comparación de la extensión y profundidad de análisis con respecto a las fases de una metodología.

3.2 Comparación de “metodologías específicas”

Con el fin de considerar la experiencia ampliamente desarrollada en las metodologías ya existentes de análisis de procesos, la Tabla 2 presenta los principales ventajas y desventajas, en relación a los objetivos buscados, detectadas en las “metodologías específicas” expuestas en la sección 2.3.2.

Con la identificación de ventajas y desventajas se puede tener una primera noción de las características, que, en relación a las motivaciones planteadas serían de utilidad o no para la estructuración de la metodología a plantear. Se considera que la representación gráfica y organización funcional es de relevancia porque el sistema de información será finalmente representado a través de paneles visuales que deben ser lo más intuitivos posibles, por otro lado, herramientas que requieran siempre del apoyo de un grupo de alta experiencia y conocimiento puede complicar el análisis simple y expedito que justamente se busca implementar con la metodología.

La metodología se estructura en diferentes etapas de análisis, con el progresivo uso de herramientas que permitan el levantamiento de información necesario para el análisis buscado y el correcto entendimiento entre los expertos del proceso y el analista, quien guiará las sucesivas etapas de la metodología.

Existen diferentes características particulares y diferenciadoras de cada herramienta de análisis, la aplicación e información relevante producto de su implementación depende, por ejemplo, de si el principio analítico es deductivo (de lo general a lo particular) o inductivo (de lo particular a lo general); si el resultado analítico es cualitativo o cuantitativo; entre otros. Los atributos analizados se exponen en la *Tabla 3* y son elegidos teniendo en cuenta que hay etapas que requieren de herramientas con ciertas características sobre otras.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de metodologías específicas.

Metodologías específicas		Ventajas	Desventajas
Análisis Funcional		- Representación gráfica del proceso. - Modelo general de los requerimientos y funciones del proceso.	- Construcción depende fuertemente de la experiencia de quienes lo construyen.
Análisis del árbol de fallos (FTA)		- Determinar factores causales más profundos de un problema o falla. - Representación gráfica.	- Puede suponer una sola fuente de problemas. - Intensiva en el uso de tiempo.
Análisis modal de fallos y efectos (FMEA)		- Identificación de puntos críticos. - Permite jerarquizar los problemas (gravedad, frecuencia y detectabilidad).	- Varios problemas o fallas no siempre son detectables. - Puede suponer una sola fuente de problemas.
Análisis P-M		- Enfoque en fallas o problemas críticos. - Principios físicos y químicos para dilucidar los mecanismos de fenómenos.	- Requiere de un grupo de alta experiencia en el proceso. - Intensiva en el uso de tiempo.
Análisis de Riesgos de Procesos (ARP)		- Permite determinar las desviaciones de los parámetros de operación. - Guiada: uso de palabras-guía asociada a cada variable.	- Intensiva en el uso de tiempo. - No necesariamente se identifica la causa raíz. - Falta de priorización de problemas.
Herramientas de control y gestión de la calidad	Hoja de recogida de datos	- Fácil implementación, universal.	-
	Histograma	- Determinación la distribución de probabilidades.	- Requiere siempre de serie de tiempo de la variable en análisis.
	Diagrama de Pareto	- Detección cuantitativa de las principales incidencias.	- No es fácilmente aplicable a todas las situaciones.
	Diagrama de Incidencia	- Fácil visualización de incidencias. - Rápida determinación de relaciones causales.	- Sólo análisis cualitativos.
	La estratificación	- Separación rápida en grupos.	-
	Diagramas de correlación	- Visualización directa de correlaciones.	- Requiere de datos comparables.
	Gráficos de control	- Método visual de tendencias.	- Uso sólo para variables medibles.

Tabla 3. Atributos de metodologías específicas.

Metodología específicas		Principio analítico	Resultado analítico	Relaciones causales	Detección de fallos o anomalías	Determinar soluciones o acciones directas	Representación gráfica	Nivel de conocimiento del proceso
Análisis Funcional		Deductivo	Cualitativo	Si	No	No	Si	Medio
Análisis del árbol de fallos (FTA)		Inductivo	Cuantitativo	Si	Si	Si	Si	Medio
Análisis modal de fallos y efectos (FMEA)		Inductivo	Cualitativo / cuantitativo	Si	Si	Si	No	Medio / alto
Análisis P-M		Deductivo	Cualitativo	Si	Si	Si	No	Alto
Análisis de Riesgos de Procesos (ARP)		Deductivo / inductivo	Cualitativo	Si	Si	Si	No	Medio / alto
Herramientas de control y gestión de la calidad	Hoja de recogida de datos	Deductivo / inductivo	Cualitativo / cuantitativo	No	-	No	No	-
	Histograma	-	Cuantitativo	No	No	No	Si	Bajo
	Diagrama de Pareto	Deductivo	Cuantitativo	No	No	No	Si	Bajo
	Diagrama de Incidencia	Deductivo	Cualitativo	No	Si	No	Si	Medio
	La estratificación	Deductivo	Cualitativo	No	No	No	No	Bajo
	Diagramas de correlación	-	Cualitativo / cuantitativo	No	No	No	Si	Bajo / medio
	Gráficos de control	-	Cualitativo / cuantitativo	No	No	No	Si	Medio

3.3 Requerimientos para la Metodología Propuesta

Dada la motivación del trabajo y las metodologías existentes, es de interés proponer los requerimientos básicos que deben ser considerados en la metodología para cumplir con las expectativas de análisis propuesto y que como fin tangible tiene la estructuración de las bases de un sistema de información. Los requerimientos fueron planteados como respuesta a lo observado en visitas a terreno y lo solicitado por la empresa Contac en reuniones de asesoría [41], estos son:

- a) Determinación del objetivo de análisis.
- b) Recopilación de datos e información.
- c) Modelación conceptual del proceso en análisis en base a relaciones causales.
- d) Determinación condiciones óptimas o normales de operación.
- e) Determinación y priorización de los sistemas o subprocesos que tienen mayor impacto en relación al objetivo de análisis.
- f) Determinación de variables y/o factores incidentales en los sistemas o subprocesos de mayor prioridad de análisis.
- g) Determinación de indicadores y alarmas en relación a los factores incidentales determinados, como base para el panel de información.
- h) Esquema preliminar del panel de información.

Se relacionan los requisitos anteriores con las “*metodologías específicas*” comparadas en la sección 3.2. Un *Análisis Funcional* puede responder a los requerimientos a), b) y c) porque justamente es un modelo conceptual del proceso, incluye al objetivo de análisis y sus relaciones son causales; un *análisis modal de fallos y efectos (FMEA)* es adecuado para e) porque a través de él se obtiene una medida cuantitativa de prioridad; el *diagrama de incidencia* y la *estratificación* se adaptan a f) porque estas herramientas permiten buscar y agrupar variables y factores incidentales en relación a un objetivo o sistema; para d) y g) la *hoja de recogida de datos* puede ser de gran utilidad; para b) en si cualquier herramienta y sobretodo las antes mencionadas cumplen con recopilar datos e información; finalmente f) y h) requieren de otros conceptos de diseño que serán particulares al caso de aplicación.

3.4 Metodología Propuesta

En la sección 2.1 se expusieron los principios generales del análisis de procesos, en donde se mostró una estrategia general de análisis de procesos complejos a través de un conjunto de etapas habituales. En consideración a lo anterior y a lo planteado en las secciones 3.1, 3.2 y 3.3, la Metodología de Análisis de Procesos propuesta comprende una serie de herramientas que se van aplicando de manera ordenada por etapas, de esta forma la información de una etapa es utilizada en la siguiente. Es de estructura deductiva (que va de lo general a lo particular), abarca inicialmente el proceso completo para progresivamente enfocarse en los subsistemas y la complejidad de análisis es ascendente.

En la Tabla 4 se resume con una descripción, alcance y herramientas las etapas de la metodología propuesta y en la Figura 16 un esquema general. En la siguiente sección, se entrega el detalle de cada etapa en conjunto a su aplicación al caso de estudio, se

realizó esto para facilitar la comprensión de la metodología y no dejar desprovista su aplicación de la explicación metodológica.

Tabla 4. Resumen de metodología. Descripción, alcances y herramientas.

Etapa	Descripción	Alcances	Herramientas
Recomendación inicial: Antecedentes Generales	Se recomienda recopilar información y definir claramente el objetivo de análisis.	<ul style="list-style-type: none"> Objetivos y límites de análisis Descripción, metas, manuales y diagramas del proceso Recopilación de información preliminar 	<ul style="list-style-type: none"> La herramienta dependerá del objetivo de análisis y proceso. Ejemplo, análisis de capacidad del proceso
1 Análisis Funcional	Modelación conceptual del proceso: funciones que deben realizarse para cumplir con un propósito clave (que deriva del objetivo de análisis).	<ul style="list-style-type: none"> Descomposición funcional del proceso en relación al objetivo planteado Definición de estándar y relevancia de funciones 	<ul style="list-style-type: none"> Se representa esquemáticamente a través de un Diagrama de Descomposición Funcional (DDF).
2 Priorización de Funciones	A partir de las funciones representadas en el DDF, se busca conocer cuáles de ellas son más relevantes en relación al objetivo de análisis.	<ul style="list-style-type: none"> Determinar y ordenar funciones más relevantes en DDF 	<ul style="list-style-type: none"> Análisis modal de fallos y efectos Diagrama de Descomposición Funcional Priorizado (DDFP)
3 Factores Incidentales	Por orden de priorización, se determinan los Factores Incidentales de las funciones del último nivel del DDFP.	<ul style="list-style-type: none"> Identificación de Factores Incidentales Caracterización de Factores 	<ul style="list-style-type: none"> Diagramas de Factores Incidentales (DI)
4 Análisis de Factores Críticos	Determinación de los factores incidentales más relevantes en cada Función en relación al objetivo de análisis (Factores Críticos).	<ul style="list-style-type: none"> Determinación de Factores Incidentales Críticos según Diagramas Incidentales en análisis 	<ul style="list-style-type: none"> Análisis de Criticidad (Frecuencia, Detectabilidad y Gravedad)
5 Bases Panel de Supervisión	Definición de Indicadores y alarmas de estado de cada Función. Definición de indicadores y alarmas, en base a los factores críticos identificados.	<ul style="list-style-type: none"> Determinación de indicadores relevantes Diseño (maqueta) de paneles 	<ul style="list-style-type: none"> Indicadores Herramientas de visualización

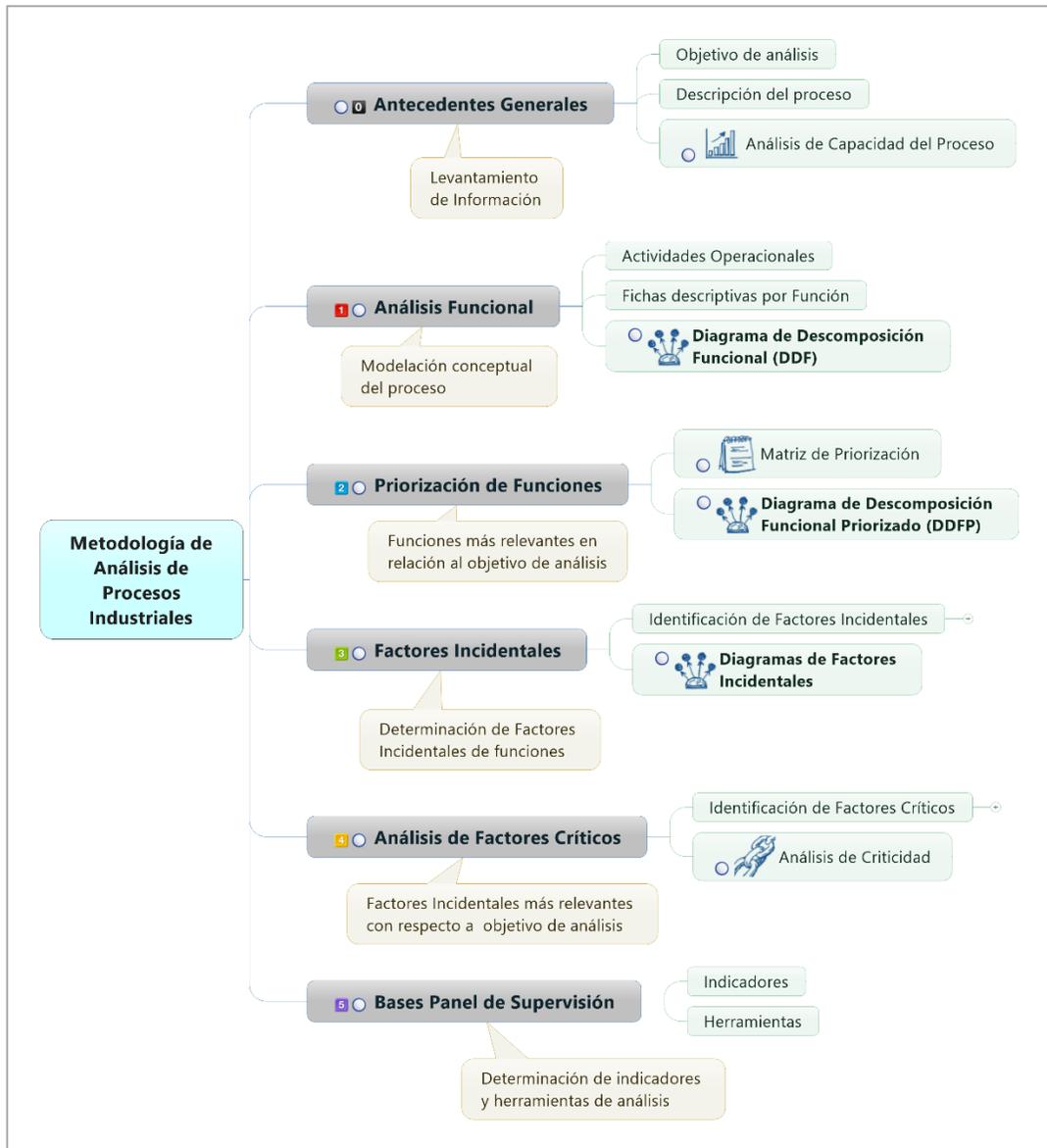


Figura 16. Esquema de metodología propuesta.

Si bien, la metodología fue desarrollada considerando su aplicación al proceso de fusión flash de concentrados de cobre, ésta podría ser aplicada a otros procesos industriales porque el principio de análisis y herramientas utilizadas permiten su aplicación de manera genérica con leves modificaciones pertinentes.

4 Aplicación de la Metodología Propuesta

Se aplicó la metodología de análisis propuesta al caso de estudio “Proceso de fusión flash, Fundición Chuquicamata”. El objetivo de análisis fue *minimizar la variabilidad de la ley de cobre en el eje*, definido en reuniones de trabajo [40] como un objetivo de alto interés para mejorar la eficiencia operacional del proceso.

Cada etapa de la metodología se expone en dos partes, en la primera se indican: una introducción, el propósito y cómo se construye la etapa indicando las herramientas de análisis, y en la segunda se expone el resultado de aplicación al caso de estudio.

Las etapas a desarrollar comprenden: Antecedentes (Etapa 0) Análisis Funcional (Etapa 1), Priorización de Funciones (Etapa 2), Factores Incidentales (Etapa 3), Análisis de Factores Críticos (Etapa 4) y Bases Panel de Información (Etapa 5), tal como se especifica en la Sección 3.4.

4.1 Antecedentes generales del proceso de fusión flash Fundición Chuquicamata

La información técnica y operacional del proceso de fusión flash se obtuvo de las siguientes fuentes:

- Manual de Operación Horno Flash (preliminar), Fundición Chuquicamata [14].
- Informe de ingeniería: Descripción General de Instalaciones, División Codelco Norte [12].
- Tesis: *Modelación Dinámica de la Fusión Flash* (Roberto Parada) [42].
- Informe de ingeniería: *Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata* [43].
- Diagramas de flujos de sistemas y procesos [14].

La supervisión y validación de la información se realizó con el experto en Horno Flash ingeniero metalurgista Noel Pérez [40]. La recopilación de información relativa a la operación del proceso se realizó en sesiones de trabajo con algunos operarios, jefes de turno y el metalurgista del proceso. De igual manera, se validó la información final con el metalurgista del Horno Flash. Para mayor información técnica del proceso referirse al Anexo 8.2.

Cualquier dato de planta expuesto en este trabajo es una representación arbitraria del proceso y fueron generados especialmente para la realización de este informe.

4.1.1 Análisis de la Capacidad del Proceso

Como primera aproximación al proceso, y dado el objetivo de análisis de minimizar la variabilidad de la ley de cobre en el eje se realizó el análisis de capacidad del proceso para conocer si el proceso es capaz de cumplir con las especificaciones (relación entre los resultados operacionales y los límites de especificación). Para mayor detalle sobre la definición de Análisis de Capacidad del Proceso ver Anexo 8.3.

La Figura 17 presenta un diagrama con la distribución de frecuencias de la ley de cobre en el eje para las ollas de eje obtenidas en un año. Se puede apreciar que los datos tienen un comportamiento muy similar a la distribución normal, lo anterior muestra que el

proceso se encuentra bajo control estadístico y las causas de variación son de causa común [44].

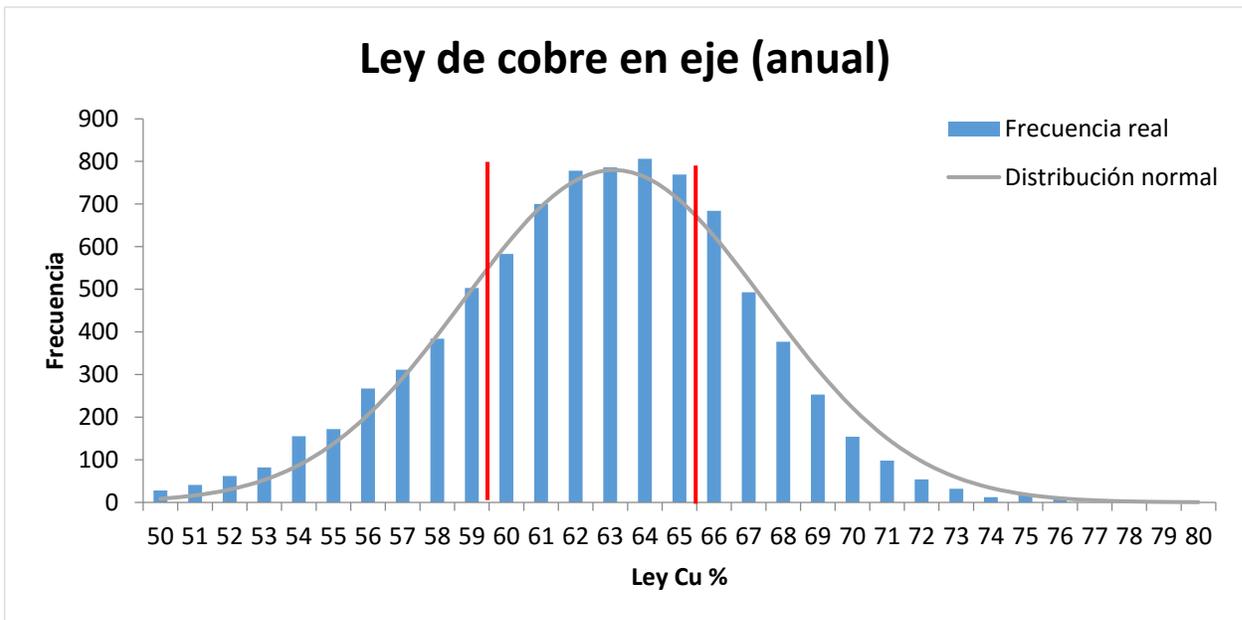


Figura 17. Distribución de ley de cobre, anual. Se han normalizado los datos, preservando los que tienen relación directa al proceso.

Los datos de la Figura 17 fueron normalizados considerando que leyes bajo el 50% corresponden a “bajadas de nivel del horno” [40]. El promedio anual fue 63,1% y la desviación estándar 4,4%.

De lo anterior, es pertinente realizar el análisis de capacidad del proceso de fusión en el Horno Flash y saber cuál fue su desempeño en el año. Se seleccionaron como indicadores los índices de capacidad del proceso potencial y real, C_p y C_{pk} , respectivamente (ver Anexo 8.3 para mayor información), pues permiten conocer la variabilidad del proceso y, además, contrastarla con la tolerancia o especificación predefinida del proceso: 60% a 65% de ley de cobre en el eje.

En la Figura 18 se muestran los indicadores para los 12 meses del año. Un índice C_p igual o mayor a 1 (uno) indica que el “proceso es capaz” en relación a los límites establecidos, y un índice C_{pk} igual a C_p indica que el proceso está centrado en relación a los límites establecidos.

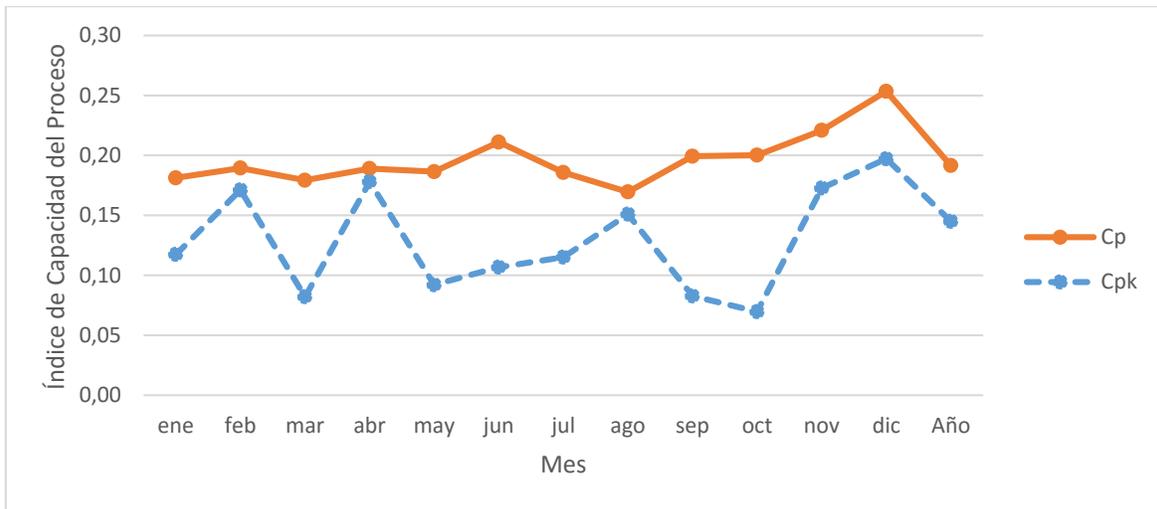


Figura 18. Índice de capacidad del proceso en un año arbitrario.

Se puede concluir que, si bien el proceso se encuentra controlado estadísticamente, no es capaz en relación a los límites de especificación pues presenta valores de C_p en torno a 0,20. Esto se puede deber a que:

- Se es muy exigente en definir límites de especificación de 60% - 65%Cu.
- Las modificaciones del proceso (incorporación de calcina para fusión, por ejemplo) han inducido gran variabilidad.
- Aún no se ha llegado al control de variabilidad buscado o de diseño.

La importancia del análisis de la variabilidad de ley de cobre en eje se justificó en que el producto debe ser entregado en un rango de concentración 60% - 65%Cu, fuera de él se generan ineficiencias en el proceso de fusión y posteriormente en el de conversión. Alguno de los efectos o ineficiencias producidas por generación de eje fuera de rango con respecto al cobre son:

Sobre 65%Cu:

- Mayor consumo de recursos en área Horno Flash, de oxígeno principalmente [40].
- Mayor contenido de impurezas como arsénico en eje, por equilibrio de fases [15].
- Mayor contenido de cobre en escoria, dado por el equilibrio de fases: a mayores leyes de cobre en eje, mayor es la ley de cobre de equilibrio en escoria [15].
- Mayor tiempo de residencia del eje en el horno [40].

Bajo 60%Cu:

- Mayor consumo de oxígeno en convertidores, altos consumos intermitentes producen ineficiencias en plantas generadoras de oxígeno [40].
- Mayor tiempo de soplado a escoria en convertidores [40].
- Si la razón de baja ley es una separación deficiente de fases, existe arrastre de eje en escoria: alto contenido de cobre en escoria [15].
- Si la razón de baja ley es una separación deficiente de fases, existe arrastre de escoria en eje y por consiguiente sus impurezas (arsénico, por ejemplo) [15].

4.1.2 Análisis General de Incidencia

La variabilidad se refiere a la diversidad de resultados de un proceso y para reducirla es necesario entender los motivos de las diferencias que afectan posteriormente al producto o al servicio que se ofrece. El control de la variación puede darse a través de sus causas incidentales [44].

Las causas comunes por las que una operación puede presentar variabilidad (según Ishikawa [44]) son:

- Materias Primas: materiales principales del proceso.
- Materiales: materiales extras necesarios en el proceso.
- Métodos: técnicas empleadas en la operación específica o global del proceso.
- Medio Ambiente: Condiciones exteriores a los límites de un proceso.
- Mano de Obra: personal involucrado en la operación, supervisión, gestión y apoyo del proceso.

El proceso de fusión flash de concentrado de cobre se puede representar de manera simple como se muestra en la Figura 19, en el que cualquier desviación en alguno de sus elementos podría generar variabilidad en el producto.

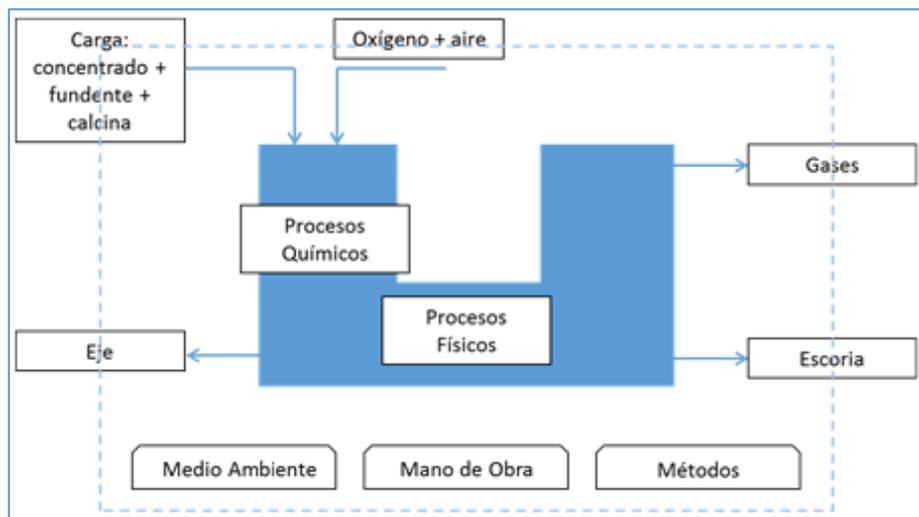


Figura 19. Representación del proceso fusión flash de concentrado de cobre.

Se identificaron a modo general los factores incidentales:

- Materias Primas: concentrado, calina.
- Materiales: fundente, oxígeno, aire, petróleo, agua.
- Métodos: dosificación y transporte en sistema Clyde, almacenaje en tolvas, dosificación por pérdida de peso, fusión flash, sedimentación (separación de fases), entre otros.
- Medio Ambiente: condiciones exteriores al proceso como factores ambientales.
- Mano de Obra: operarios, supervisores, jefes de turno, entre otros.

Como se puede apreciar, son diversos los factores que pueden influir en el producto final y con distinto grado de importancia en el proceso de fusión del Horno Flash. En este

trabajo de memoria se consideraron los relacionados a materias primas, materiales y métodos, sin profundizar en los relacionados a medio ambiente y mano de obra, ya que requieren de un análisis más extenso.

Según lo recabado en visitas a terreno [40], se seleccionó un set de variables representativas de los ítems de materias primas, materiales y métodos, para conocer la correlación que tienen con la ley cobre en el eje y analizar el grado de incidencia en ella. Las variables seleccionadas corresponden a:

- Flujo de alimentación al Horno Flash.
- Ley de cobre en carga.
- Ley de hierro en carga.
- Ley de azufre en carga.
- Enriquecimiento.
- Coeficiente de oxígeno.
- Presión interior Horno Flash.
- Temperatura baño Horno Flash.

Se calcula el *coeficiente de correlación de Parson* [44] (que indica el grado de correlación lineal entre dos variables) entre la ley de cobre en el eje y cada una de las variables mencionadas. Los resultados se presentan en la Tabla 5. Se correlaciona el promedio diario para todos los días de un año arbitrario.

Tabla 5. Coeficiente de correlación entre variables seleccionadas y ley de eje en cobre.

Variable	Coeficiente de Correlación
Ley de eje en cobre	1 (referencia)
Flujo de alimentación al Horno Flash	0,55
Ley de cobre en carga	~ 0
Ley de hierro en carga	~ 0
Ley de azufre en carga	~ 0
Enriquecimiento	0,59
Coeficiente de oxígeno	~ 0
Presión interior Horno Flash	~ 0
Temperatura baño Horno Flash	0,32

El rango para el coeficiente de correlación es [-1,1], en donde -1 indica correlación lineal perfecta inversa, 1 indica correlación lineal perfecta directa y 0 correlación nula. Las variables que presentan cierto grado de correlación lineal son: flujo de alimentación al Horno Flash, enriquecimiento y temperatura del baño, las cuales explicarían de mejor manera la variabilidad de ley de cobre en el eje por sobre las demás.

La correlación lineal encontrada muestra que hay relación entre algunas variables, pero eso no significa que las que son cercanas a cero no la tengan, más bien, pueden existir otras correlaciones no lineales porque los procesos físicos y químicos involucrados son bastante complejos.

Para mayor detalle se seleccionan indicadores de dispersión y se correlacionaron linealmente con la variabilidad de la ley de cobre en el eje, expresada como desviación estándar. En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos, donde el intervalo de cálculo para cada indicador es diario para un año arbitrario.

Tabla 6. Coeficiente de correlación entre indicadores de variables y dispersión de la ley de cobre en el eje.

Prioridad	Variable	Factor correlación
-	Desviación estándar de ley de cobre en el eje	1,00 (referencia)
1	Desviación estándar de flujo de alimentación	0,50
2	Desviación estándar de enriquecimiento	0,44
3	Flujo acumulado del cambio de <i>set-point</i> del flujo de alimentación (Flujo acumulado de escalones)	0,35
4	Desviación estándar temperatura baño	0,23
5	Desviación estándar presión interior horno	0,21
6	Número de cambios del promedio local en flujo de alimentación (N° de escalones)	0,16
7	Desviación cobre carga	0,16
8	Desviación estándar coeficiente de oxígeno	0,10

Lo anterior muestra que la mayor relevancia la tienen nuevamente las variaciones relacionadas al flujo de alimentación y al enriquecimiento (en la práctica las variaciones del flujo de alimentación se relacionan con la magnitud y el número de cambios en el *set-point* principalmente).

Según los resultados anteriores, la variación de ley de cobre en la alimentación no es tan relevante en comparación a otras variables. Según reuniones en terreno la ley de cobre en la alimentación es un factor que sí incide en la ley de cobre en el eje [40], por lo que pueden existir otras relaciones más complejas que a través del coeficiente lineal no se dejaron en evidencia.

Como primer acercamiento al proceso, el estudio anterior es relevante pero no concluyente y se recomienda aplicar la metodología propuesta para el estudio de las relaciones causales de la **variabilidad de la ley de cobre en el eje**.

4.2 Etapa 1: Análisis Funcional

Se realizó el primer lugar la descomposición funcional del proceso, y en segundo lugar la definición de estándares de cada función.

4.2.1 Fundamentos de la Descomposición Funcional

¿Qué es?

Es una técnica deductiva que permite modelar conceptualmente un proceso, relacionando todas las operaciones o funciones que deben llevarse a cabo para cumplir con un propósito clave predeterminado (en directa relación con el objetivo operacional en

estudio) y se representa esquemáticamente en un Diagrama de descomposición funcional como el de la Figura 20.

¿Para qué sirve?

El propósito de este análisis es definir (identificar) la relación entre los “requerimientos funcionales operacionales” y las “necesidades funcionales técnicas” que las soportan. Cuando se haya completado, el diagrama muestra toda la red de funciones u operaciones que conducen al cumplimiento del propósito clave del proceso.

La metodología en general se puede aplicar a diferentes ámbitos del proceso, por ejemplo: seguridad, gestión de activos, eficiencia energética, eficiencia operacional, entre otros, dependiendo de la declaración del propósito clave. Para un mismo proceso y diferentes enfoques o propósitos claves generarán diferentes diagramas de descomposición funcional porque las funciones de soporte serán diferentes.

Definiciones:

- *Operación o Función*: Finalidad prevista de un elemento, sistema o proceso, descrita por un estándar de rendimiento solicitado. Una descripción de la función completa debe incluir los límites específicos de rendimiento.

¿Cómo se construye?

El análisis funcional se elabora de lo general a lo particular, se deben identificar funciones discretas, es decir, suficientemente completas en su descripción de modo que representen una acción integral. El significado de la función debe ser claramente comprensible y describir una función que debe ser alcanzada.

El análisis funcional debe elaborarse respetando un formato de redacción: **verbo + objeto + condición** para cada función. El verbo describe qué sucede, el objeto hacia qué o para quién se dirige el desempeño y la condición describe el contexto en el cual el desempeño tiene lugar.

En el diagrama de descomposición funcional se representa específicamente cada evento funcional por un bloque que ocurre después de la función anterior. Se pregunta sucesivamente qué funciones hay que llevar a cabo para permitir que la función precedente se logre.

Pasos:

- I. Declarar el Propósito clave o Función principal (Nivel 0): Identificar el **objetivo de análisis** y los **objetivos operacionales**. Con ellos se determina el **propósito clave** o **función clave**.
- II. Identificar las funciones principales (Nivel 1): Constituyen el primer nivel de desagregación. Identificar las **actividades operacionales** que permiten cumplir el propósito clave, las de mayor relevancia o las que engloban a otras se traducen en **funciones principales**.

- III. Las que soportan a las anteriores son **funciones básicas** (Nivel 2). Corresponde al segundo nivel de desagregación.
- IV. La identificación de **sub-funciones** y **elementos de competencia** (Nivel 3 y 4) responde a la lógica de preguntarse qué funciones hay que llevar a cabo para permitir que la función precedente se logre. Este nivel de desagregación se relaciona con equipos o sistemas específicos.

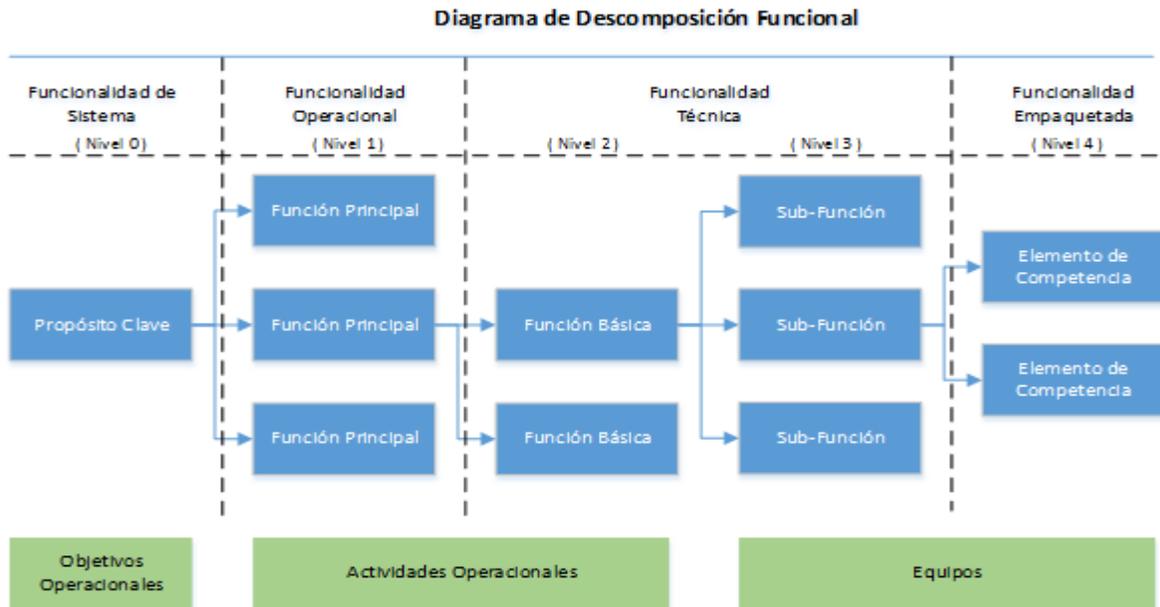


Figura 20. Diagrama de Descomposición Funcional (esquema)² [17].

4.2.1.1 Descomposición Funcional aplicada al Caso de Estudio.

Recurrentemente se usarán ciertos conceptos definidos a continuación:

- **Carga:** concentrado, calcina y/o fundente.
- **Mezcla:** "carga" + suministros de alimentación (oxígeno y aire).

Aparte del Nivel 0, se determinó desagregar en dos niveles completos: Nivel 1 y Nivel 2, y un tercero parcial, Nivel 3, en los casos que se requiera de mayor detalle.

a) Propósito clave (Nivel 0)

Para determinar el propósito clave se considera el objetivo operacional declarado en la misión del complejo Horno Flash y el objetivo operacional de estudio.

- **Objetivo operacional:** Misión del complejo Horno Flash - **"Garantizar el abastecimiento de eje de cobre**, con la calidad y en la oportunidad requeridas por nuestros clientes, mediante un proceso de fusión estable, seguro, de máxima efectividad y ambientalmente sustentable"

² Los niveles de desagregación necesarios dependen del grado de detalle con que se desee esquematizar y de la magnitud del proceso a analizar. Se recomiendan 3 niveles.

- **Objetivo operacional de análisis: Minimizar la variabilidad de ley de cobre en eje.**

A partir de lo anterior se define el propósito clave: **Garantizar el abastecimiento de eje de cobre con "mínima variabilidad en la ley de cobre"**

b) Funciones principales (Nivel 1)

En el proceso de fusión flash o complejo Horno Flash existe una división en áreas operacionales que se utilizan como base inicial para el análisis. En cada una de ellas se identifica una funcionalidad operacional. Esto se realiza considerando que la división ya establecida representa todas las actividades operacionales necesarias para garantizar el abastecimiento de eje de cobre y en primera instancia la operación deficiente de algún área incide en la ley de cobre aumentando su variabilidad.

En la Figura 21 se muestra un esquema general del complejo Horno Flash y la división en áreas:

- Área 00: Servicios generales
- Área 03: Manejo de carga
- Área 04: Horno Flash
- Área 05: Caldera
- Área 06: Manejo y limpieza de gases metalúrgicos
- Área 07: Manejo de polvos

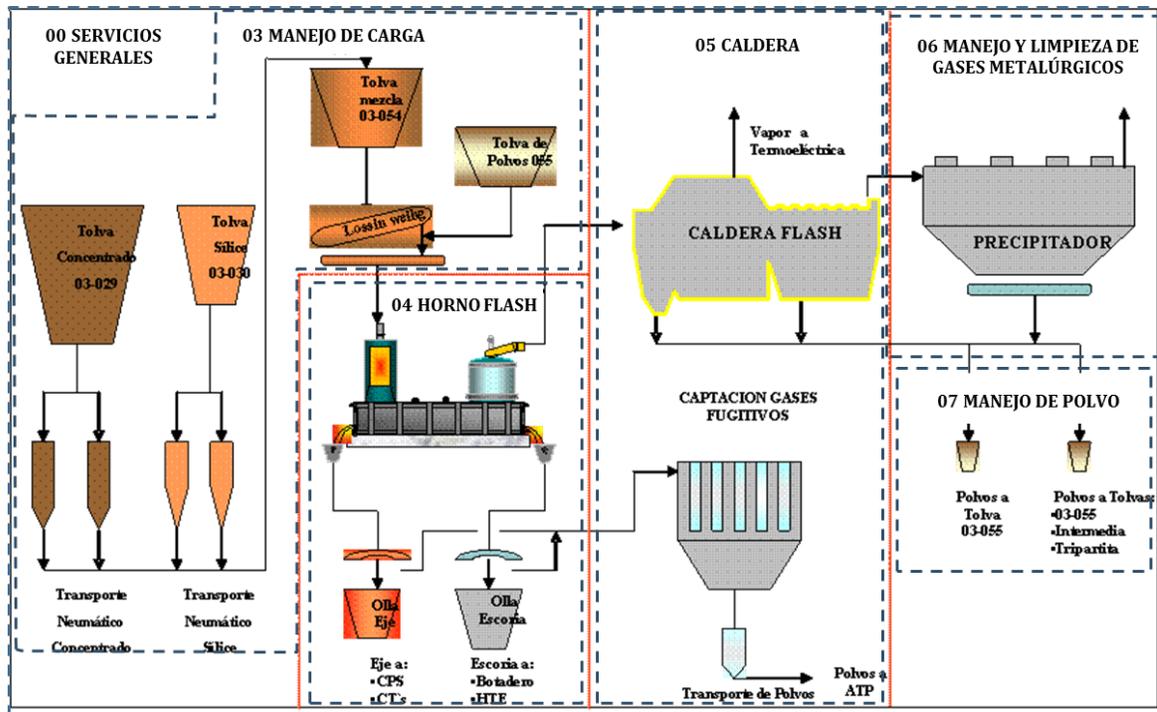


Figura 21. Esquema general complejo Horno Flash [12].

El establecimiento final de las funciones principales se estructuró en sesiones de trabajo, donde se buscó englobar la información teórica existente y la información práctica

proveniente de la experiencia. Para ello, se fueron completando un set de tablas basadas en el formato de redacción: verbo + objeto + condición, ver sección 8.4. A modo de ejemplo, se muestra la forma de estructuración relacionada al Área 03 - Manejo de carga:

1. En primer lugar, se consideró el alcance del Área 03 a través de la declaración de sus límites: *“Desde recepción de concentrado seco, sílice y calcina DMH en tolvas hasta sistema de cama deslizante air slide”*.
2. Se determinó un verbo que representa de la manera más completa la operación llevada a cabo en esta área: *“preparar”*.
3. Se identificó el objeto al cual se aplica la acción del verbo anterior: *“carga”*.
4. La acción y objeto se desenvuelven en un contexto particular que define el objetivo de la función, en este caso se determinó que *“Preparar carga”* debe responder a: *“Requerimientos de producción y mezclas homogéneas”*, poniendo especial énfasis en la última parte que es atingente al objetivo de estudio.
5. Finalmente, se estructuró la función como: *“Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash”*. Ver Tabla 7.

Tabla 7. Tabla ejemplo de estructuración de una Función.

Área	Nombre	Descripción	Verbo	Objeto	Condición	Operación / Función
Área 03	Manejo de Carga	Desde recepción de concentrado seco, sílice y calcina DMH en tolvas hasta sistema de cama deslizante <i>“air slide”</i>	Preparar	Carga	Requerimientos de producción y mezclas homogéneas	Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash

En las Tabla 8 se adjunta la estructuración de las seis funciones principales relacionadas a las seis áreas del complejo Horno Flash. Las dos primeras áreas se relacionan con el horno aguas arriba, la tercera con el horno y las tres últimas con el horno aguas abajo, estas últimas impactan la ley del eje porque modificaciones en el proceso aguas abajo influyen en la operación aguas arriba a través de la modificación en los parámetros operacionales y del punto óptimo de operación, en la sección siguiente se detallan con mayor detalle las influencias.

Tabla 8. Identificación de Funciones Principales. Estructura: verbo + objeto + contexto.

Área	Nombre	Descripción	Verbo	Objeto	Condición	Operación / Función
Área 00	Servicios Generales	Necesidades de servicios y equipos asociados al Horno Flash para su operación	Disponer	Suministro de servicios	Cantidades y calidad requerida para correcta operación con mínima variabilidad	Disponer del suministro de servicios necesarios para la correcta operación con mínima variabilidad
Área 03	Manejo de Carga	Desde recepción de concentrado seco, sílice y calcina DMH en tolvas hasta sistema de cama deslizante <i>“air slide”</i>	Preparar	Carga	Requerimientos de producción y mezclas homogéneas	Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash

Tabla 8. Identificación de Funciones Principales. Estructura: verbo + objeto + contexto. (Continuación)

Área	Nombre	Descripción	Verbo	Objeto	Condición	Operación / Función
Área 04	Horno Flash y circuito secundario de enfriamiento	Desde la alimentación de mezcla concentrado-carga fría-fundente-calcula DMH, alimentación de aire enriquecido, hasta la salida de los gases por <i>up-take</i> , y salida de líquidos de sangría.	Asegurar	Continuidad operacional / eje	Eje en concentración 60% - 65% de cobre	Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash
Área 05	Caldera recuperadora de vapor	Desde salida de gases de Up-Take hasta precipitadores electrostáticos. Por el lado de la línea de vapor, desde las bombas de circulación hasta la salida del domo.	Enfriar	Gases provenientes del Horno Flash	Mantener temperatura dentro de límites de diseño	Enfriar gases provenientes del Horno Flash en caldera para adecuarlos a procesos y equipos siguientes
Área 06	Manejo y limpieza de gases metalúrgicos (hasta cámara de mezcla)	Desde la salida de los gases metalúrgicos de la caldera hasta la cámara de mezcla.	Limpiar	Gases metalúrgicos	Adecuar para planta de tratamiento de gases (disminuir polvo y temperatura)	Limpiar gases metalúrgicos del polvo arrastrado para enviar a planta de tratamiento de gases
Área 07	Manejo de polvo (hasta tolva tripartita)	Desde la colección de polvos en la Caldera y en los precipitadores electrostáticos hasta la tolva tripartita.	Manejar	Polvos metalúrgicos	Tener stock para alimentar al Horno Flash	Manejar polvos metalúrgicos, provenientes de caldera y precipitadores electrostáticos, según stock necesario para alimentación

c) Funciones básicas (Nivel 2)

Como se mencionó en la sección 4.2 cada función principal se desglosó en sus funciones básicas. Este nivel responde a las “funcionalidades técnicas” necesarias para el soporte de las “funcionalidades operacionales”. Se desagrega en base a los requisitos de diseño considerando además fichas técnicas de equipos y esquemas como diagramas de flujo e instrumentación existentes, teniendo siempre en cuenta la incidencia que cada función aporta al objetivo operacional en estudio.

La estructuración de cada función se expone en el Anexo 8.4. Se desagregaron todas las funciones principales en funciones básicas y en sub-funciones. A modo de ejemplo, se muestra la construcción relacionada a la función principal: “*Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash*”:

- I. En primer lugar, se consideraron las bases de diseño y parámetros operacionales del Horno Flash asociados a la ejecución de las actividades operacionales correspondientes:
 - i) La recepción de concentrado de cobre, fundente y calcina DMH en sus tolvas respectivas, manteniendo un stock de operación y de emergencia en

- caso de eventualidades.
- ii) Alimentar "carga" en condiciones de buena homogeneidad y mezcla.
 - iii) Transportar neumáticamente concentrado de cobre, fundente y calcina DMH. La misma instalación debe ser capaz de mezclar y homogeneizar.
 - iv) Dosificación de "carga", almacenada en T54, en sistema LWF.
 - v) Alimentación de "carga" al quemador de concentrado.
 - vi) Recirculación y dosificación de polvos metalúrgicos al Horno Flash.
- II. Se seleccionaron las acciones, objetos y contextos que mejor representan las operaciones antes planteadas. Por ejemplo, para el primer ítem de la parte anterior se consideraron: mantener (verbo), tolvas (objeto) y stock en tolvas respectivas (contexto).
- III. De lo anterior se configura la primera Función Básica: *"Mantener stock en tolvas de materias primas y tolva de carga"*

d) Funciones Básicas (Nivel 3)

- IV. De igual manera, se estructuran las sub-funciones correspondientes:
- i) Recepcionar concentrado de cobre seco desde secadores a tolva 29.
 - ii) Recepcionar fundente desde planta de sílice y alimentar tolva 30.
 - iii) Recepcionar calcina desde DMH y alimentar tolva 001.
 - iv) Mantener stock de tolva 54 en nivel operacional.

El diagrama de descomposición funcional generado como resultado del análisis anterior se presenta en la Figura 22.

4.2.2 Definición de Estándares

¿Qué es?

Luego de haber construido el Diagrama de Descomposición Funcional para las funciones en los distintos niveles de desagregación, falta aún determinar los límites en los que se pueda considerar una "buena operación" de ellas. Se determinan entonces en esta sección los estándares de cada función y el impacto de cada una de ellas sobre el objetivo de análisis.

¿Para qué sirve?

El propósito de este análisis es determinar los rangos de operación correctos para una función, de esta manera se sabe además cuáles son las condiciones fuera de estándar o "condiciones subestándar".

La relación entre funciones y el objetivo de análisis es causal, pero a medida que el nivel de desagregación es mayor ésta es menos directa, por lo tanto, se busca registrar el impacto que cada función ejerce sobre el objetivo de análisis y así tener noción directa en futuras secciones de la metodología.

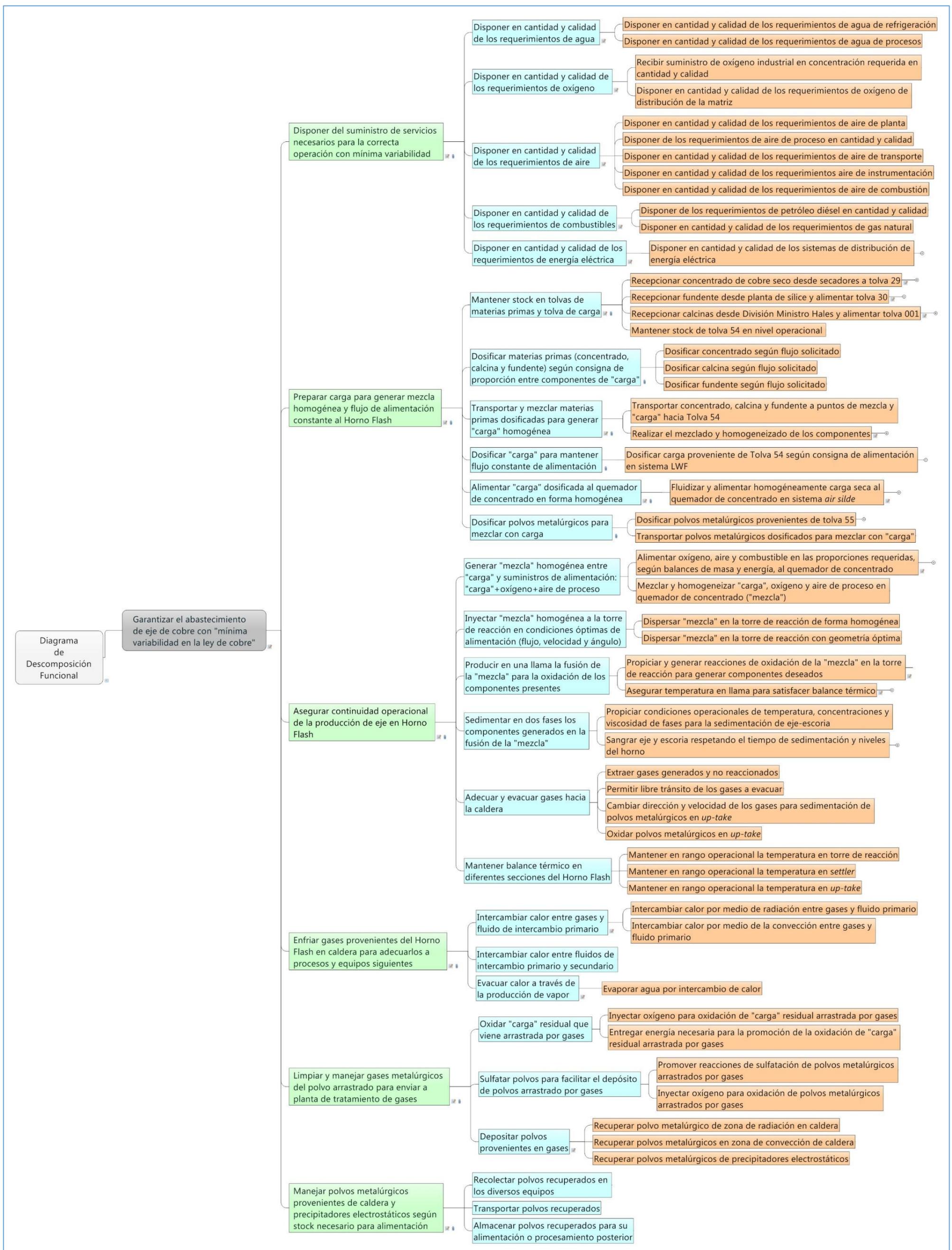


Figura 22. Diagrama de Descomposición Funcional (DDF).

¿Cómo se construye?

Un estándar debe responder por lo menos a: las condiciones de calidad, mínimos y máximos permitidos, tiempos de operación, entre otros.

Pasos:

- I. Se comienza determinando cuál es el estándar para el Propósito clave.
- II. Se determina el estándar para las demás funciones en orden de desagregación: funciones principales, funciones básicas, subfunciones y otros niveles en caso de existir.
- III. En lo posible completar todos los estándares y el impacto que puede generar cada función al objetivo de análisis.
- IV. Si por algún motivo es difícil determinar el estándar, ya sea por falta de datos o análisis, dejarlo como pendiente y completarlo en la sección de indicadores (diseño del panel) cuando se cuente con mayores antecedentes.
- V. Completar la Tabla 9.

Tabla 9. Tabla ejemplo de estándar y relevancia de cada función en relación al objetivo de análisis.

Nivel	Función	Descripción	Estándar	Relevancia
...

4.2.2.1 Definición de Estándares aplicados al Caso de Estudio

La Tabla 10 presenta las fichas descriptivas para los Niveles 0 y 1 del diagrama de descomposición funcional. En el Anexo 8.5 se adjuntan las demás fichas que derivan de los niveles 2 y 3.

4.3 Priorización de Funciones

¿Qué es?

Habiéndose definido las funciones y la definición de estándares en el análisis funcional, la forma y magnitud de incidencia de cada función con respecto al objetivo de análisis es diferente, por lo tanto, es importante tener un orden de prioridad para conocer cuál es la que más impacta en relación a las demás. Por otro lado, las funciones del Diagrama de descomposición funcional pueden ser numerosas y dependerán del nivel de detalle buscado, por lo que continuar el análisis con todas ellas puede ser intensivo en el uso de recursos. Por lo anterior, inicialmente se recomienda el enfoque en las que mayor impacto exhiban.

¿Para qué sirve?

Ordenar/priorizar las funciones determinadas en la etapa de Análisis Funcional, en relación al impacto que tienen con respecto al objetivo de análisis.

Tabla 10. Ficha descriptiva de las funciones del Nivel 0 y 1.

Nivel	Función	Descripción	Estándar	Relevancia (cómo podría afectar)
0	Garantizar el abastecimiento de eje de cobre con "mínima variabilidad en la ley de cobre"	Propósito Clave	Estándar fundición: 60% – 65% ley de cobre en eje y cumplir con programa de fundición	Misión de Horno Flash y objetivo de estudio del análisis
1	Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash	Relacionado a Área 03	Variabilidad del flujo de alimentación: pendiente razón de calcina real vs SP alta: pendiente	Fluctuaciones en flujo y composición de la alimentación al Horno Flash
1	Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash	Relacionado a Área 04	Estándar fundición: 60% – 65% ley de cobre en eje Estándar operacional: - Concentrados exotérmicos generan eje en torno a 60% de cobre, concentrados menos exotérmicos se sitúan en torno 65%. - Por turno/día máx. 2% dispersión	Deficiencias en el proceso de fusión de concentrado puede generar directamente desviaciones en las características del producto (eje).
1	Enfriar gases provenientes del Horno Flash en caldera para adecuarlos a procesos y equipos siguientes	Relacionado a Área 05	Temperatura de salida de caldera menor a 400°C. Temperatura de entrada zona de convección menor a 580°C	Presión y temperatura de los gases son variables relacionadas a estados de equilibrio en el horno.
1	Disponer del suministro de servicios necesarios para la correcta operación con mínima variabilidad	Relacionado a Área 00	Estándar fundición: en cantidad y calidad del servicio requerido (en manual de operación Horno Flash)	Suministros como oxígeno y aire se relacionan directamente con coeficiente de oxígeno y enriquecimiento.
1	Limpiar gases metalúrgicos del polvo arrastrado para enviar a planta de tratamiento de gases	Relacionado a Área 06	Generación de polvos menor a 7%.	Problemas aguas abajo puede generar paradas o intermitencias de operación.
1	Manejar polvos metalúrgicos, provenientes de caldera y precipitadores electrostáticos, según stock necesario para alimentación	Relacionado a Área 07	Mantener stock en tolva 55 según estándar	Recirculación de polvos se relaciona con balance de energía principalmente.

¿Cómo se construye?

Se basa en la herramienta de análisis de criticidad: análisis modal de fallos y efectos a nivel general. Luego se reorganiza el Diagrama de Descomposición Funcional en un "Diagrama de Descomposición Funcional Priorizado" en orden ascendente de relevancia.

Herramienta

La herramienta de análisis se basa en un análisis modal de fallos y efectos a nivel global en el que se consideran cuatro modos de falla genéricos: "falta total de la función", "menos de lo requerido", "más de lo requerido" y "calidad deficiente". Se analizan sus efectos y posibles causas de forma genérica para otorgar un valor a los criterios de frecuencia (F), gravedad (G) y detectabilidad (D). Finalmente se obtienen el IPR (Índice de Prioridad de Riesgo, $IPR = F \times G \times D$). Todo lo anterior se completa en la Tabla 11.

La suma del IPR de los cuatro modos de falla considerados entrega el índice global para la función. Para un mismo nivel de desagregación se comparan los índices globales y se ordena de mayor a menor relevancia. Se pueden considerar otros modos de fallas y criterios dependiendo del objetivo y proceso analizado.

Tabla 11. Ejemplo de tabla para analizar la prioridad de funciones.

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
...	Falta total de la función	...	...	-	-	-	-
	Menos de lo requerido	...	...	-	-	-	-
	Más de lo requerido	...	...	-	-	-	-
	Calidad deficiente	...	...	-	-	-	-
				Suma			-

Rango de criterios: A determinar para cada análisis, en este caso se utilizan:

- Frecuencia: 1 (baja) - 5 (alta)
- Gravedad: 1 (baja) - 5 (alta)
- Detectabilidad: 1 (alta) - 5 (baja)
- IPR (Índice de Prioridad de Riesgo): $IPR = F \times G \times D$ 1 (baja) - 125 (alta)

4.3.1 Priorización de Funciones aplicados al Caso de Estudio

A partir del Diagrama de Descomposición Funcional construido en la sección 4.2, fueron priorizadas las funciones del primer nivel de desagregación (nivel 1) y luego para las dos primeras de ellas: 1) “Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash” y 2) “Producir eje con 60-65% en contenido de cobre en Horno Flash”, fueron priorizadas sus funciones básicas (nivel 2). No se siguió con la priorización porque se consideró que para el resultado buscado las dos primeras funciones engloban el mayor porcentaje de influencia en la variabilidad de la ley de cobre, de hecho, los análisis posteriores se enfocan solo en la primera de ellas: “Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash”.

El Análisis modal de fallos y efectos simplificado de la primera función principal se muestra en la Tabla 12, las demás tablas se adjuntan en el Anexo 8.6. El valor asignado a cada criterio fue determinado con el consultor y basado en la experiencia que este tiene del proceso. Los efectos y causas son genéricos y sirven de guía y respaldo para la justificación de los valores numéricos de los criterios.

Tabla 12. Análisis Modal de Fallos y Efectos global de la primera función principal.

FUNCIÓN PRINCIPAL		FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR	
1 Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash	Falta total de la función	- Detención Horno Flash	- Falla de sistemas de mezcla y transporte de carga	2	5	1	10	
	Menos de lo requerido	- Pérdida de capacidad de producción - Menor calidad eje	- Disponibilidad de sistemas deficiente	4	3	3	36	
	Más de lo requerido	- No aplica	- No aplica	-	-	-	-	
	Calidad deficiente	- Calidad de eje deficiente - Difícil control operacional	- Gestión de carga deficiente - Fallas sistemas y equipos	5	3	3	45	
				Suma			91	

Se priorizaron las funciones comparando el valor numérico “Suma” de cada una, la de mayor prioridad es la que tiene el valor más alto y se representan en un nuevo diagrama: “Diagrama de Descomposición Funcional Priorizado (DDFP)”, columna vertebral del análisis metodológico y utilizado en los siguientes análisis (Figura 23).

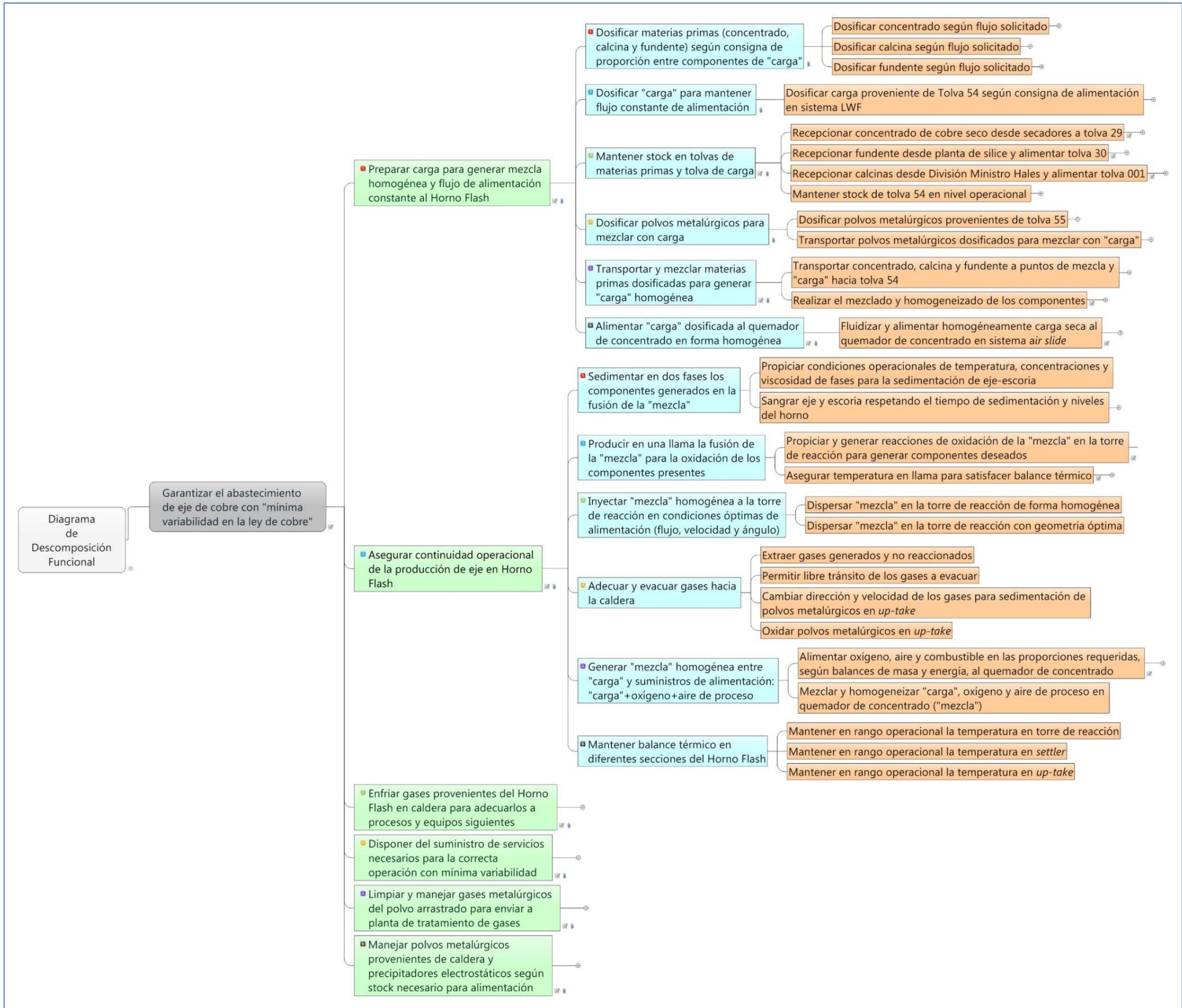


Figura 23. Diagrama de Descomposición Funcional Priorizado: proceso fusión Horno Flash.

4.4 Factores Incidentales

¿Qué es?

Se definen los factores incidentales como todos los elementos, variables o causas que repercuten en una operación o función, llegando en ciertos casos a alterarla o interrumpirla.

Se puede considerar que la desagregación en funciones corresponde a una serie de factores incidentales (funciones) organizados de forma causal en un diagrama. A su vez, cada función es una configuración de factores incidentales más específicos que ella misma, por lo tanto, el último nivel de desagregación (sub-función) se puede desagregar en ellos para obtener variables más específicas y/o independientes unas de otras.

Los factores incidentales del último nivel de desagregación corresponden, por ejemplo, a flujos, presiones, temperaturas, entre otras variables. La información historizada pertenece principalmente a este tipo de variables y con ella se pueden hacer análisis relevantes del proceso en secciones posteriores.

¿Para qué sirve?

El propósito de esta sección es la identificación de la mayor cantidad de factores incidentales de una sub-función (Nivel 3), de esta manera se documenta todo lo que podría influir en una función y a su vez en el objetivo de análisis.

¿Cómo se construye?

El análisis se basa en la segmentación de los factores incidentales en categoría generales: máquinas, métodos, materiales, medición, gestión, medio ambiente, personas y mantenimiento, representándolos en un diagrama de incidencia.

Pasos

- I. Seleccionar las funciones del último nivel de desagregación a analizar.
- II. Determinar las categorías generales que se utilizarán en el análisis. Como ejemplo de ellas se tienen: máquinas, métodos, materiales, medición, gestión, medio ambiente, personas y mantenimiento. Pero dependerá del análisis las categorías pertinentes a utilizar.
- III. Para cada categoría general analizar cuáles son los factores incidentales que le competen, apoyar el análisis en diagramas de flujo, de instrumentación y cualquier documento que sea útil.
- IV. Construir el diagrama de incidencia, método gráfico del análisis.

4.4.1 Factores Incidentales en el Caso de Estudio

En la sección 4.3 se acotó que el enfoque de análisis se centraría en la primera función del primer nivel de priorización, en esta sección se construyeron los Diagramas de incidencia para sus sub-funciones. La Figura 24 muestra el diagrama de descomposición funcional priorizado indicando el número del diagrama de incidencia (DI#) para cada función del último nivel de desagregación. En Anexo 8.7 se adjuntan los 13 diagramas de incidencia y a modo de ejemplo se adjunta el diagrama de incidencia correspondiente a la sub-función: “Dosificar concentrado según flujo solicitado” en la Figura 25.

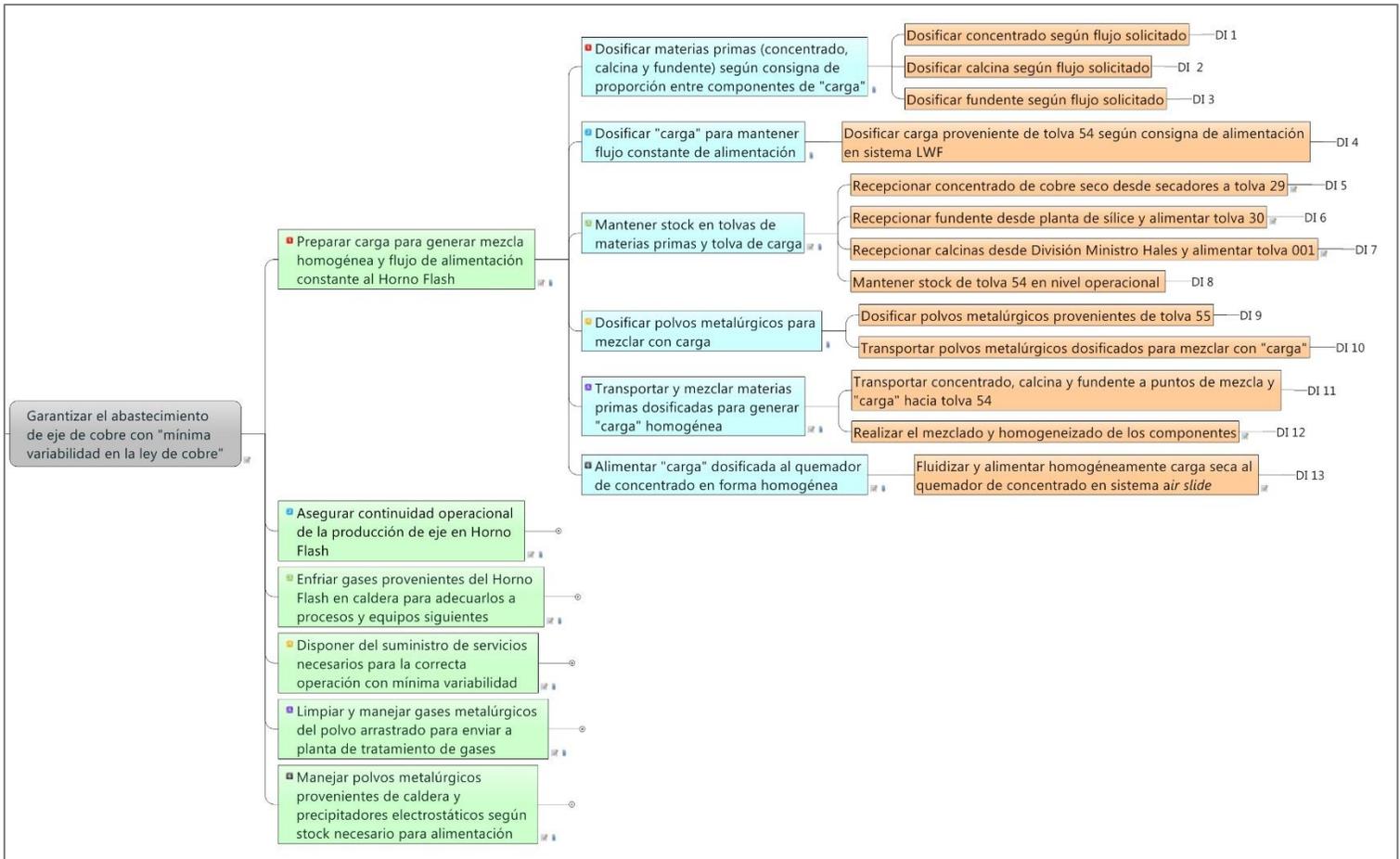


Figura 24. Indicación de Diagramas de Incidencia por Función en Diagrama de Descomposición Funcional.

Los factores incidentales pueden ser clasificados de diferentes maneras, por ejemplo, según la capacidad de influir en ellos, de medirlos, del impacto en el proceso, etc. En este caso se caracterizaron por su condición de ser “manipulable” o “no manipulable” en color amarillo y gris, respectivamente. Otra caracterización se deriva de un análisis posterior consistente en identificar el set de factores “más críticos” en base al objetivo de análisis.

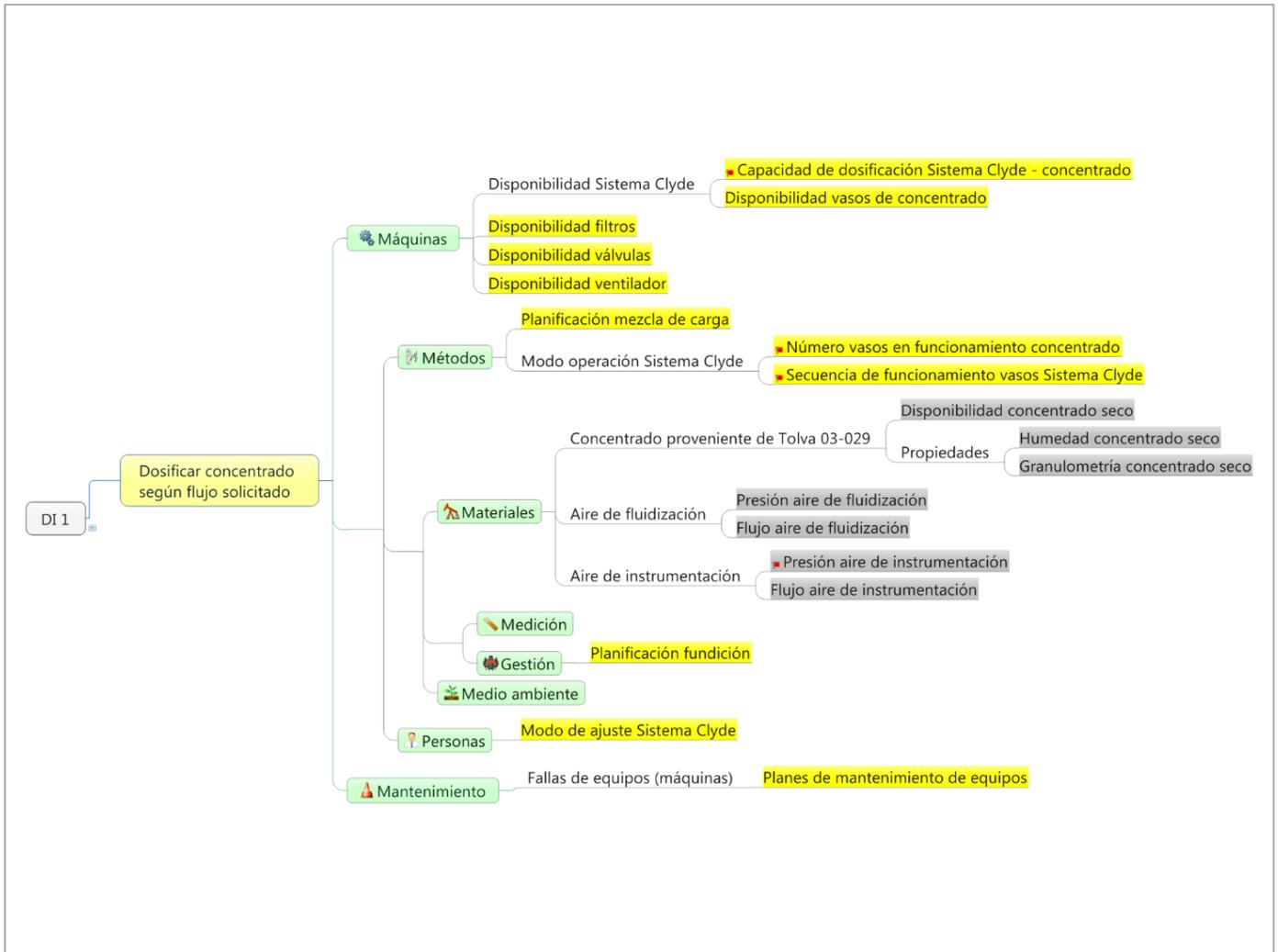


Figura 25. Diagrama de Incidencia 1.

4.5 Análisis de Factores Críticos

¿Qué es?

Los factores críticos son todos los factores incidentales que se considera tienen mayor relevancia en relación al objetivo de análisis con respecto a los otros. Si bien, se identificaron los factores incidentales en una función particular, no todos tienen la misma relevancia y/o impactan de la misma forma, hay un conjunto que es más relevante de monitorear.

¿Para qué sirve?

El objetivo principal de esta sección es seleccionar los factores incidentales críticos para cada función del último nivel de desagregación del Diagrama de Descomposición Funcional, y sobre ellos aplicar un análisis más detallado identificando indicadores y alertas en la sección posterior.

¿Cómo se construye?

El estudio se basa en un análisis de criticidad considerando los diferentes modos de falla que puede presentar una función, se analizan sus efectos y posibles causas otorgando un valor a los criterios de frecuencia (F), gravedad (G) y detectabilidad (D). Finalmente se obtienen el IPR (Índice de Prioridad de Riesgo, $IPR=F \times G \times D$) para tener una referencia de la importancia de cada modo de falla.

Con la información y análisis obtenidos previamente, en donde es crucial el aporte realizado por un experto en la operación, se procede a utilizar los diagramas de incidencia y ver la pertinencia de cada factor incidental sobre los diferentes modos de falla. Se selecciona el grupo que fue considerado como de “mayor relevancia”.

El análisis planteado es primordialmente de carácter cualitativo y su pertinencia se justifica en el hecho de basarse en información y experiencia consolidada en el proceso, además de contar con los análisis previos que permiten un orden estructurado al análisis. Con el tiempo puede ser relevante ir revisando y actualizándolo, algunos factores dejarán de ser críticos y otros lo serán, dependiendo del contexto y contingencia del proceso ³.

Pasos

- I. Elegir una función del último nivel de desagregación.
- II. Determinar todos los posibles modos de falla que presenta o puede presentar la función.
- III. Registrar en la matriz de análisis modal de fallos y efectos los efectos y causas de cada modo de falla.
- IV. Otorgar una valoración a los criterios de frecuencia, gravedad y detectabilidad para después calcular el IPR.
- V. Con el diagrama de incidencia pertinente, determinar cuáles de los factores incidentales son más relevantes con respecto a las causas de cada modo de falla.
- VI. Los factores críticos son los factores incidentales que tienen mayor relevancia, se pueden determinar como los que inciden en el modo de falla con mayor IPR o los que se repiten en mayor frecuencia.
- VII. Completar Tabla 13.

³ Nota: El Análisis modal de fallos y efectos es la misma herramienta utilizada en la sección 4.3, pero el objetivo y nivel de detalles requeridos son diferentes, en este caso el análisis es más profundo y se busca correlacionar factores incidentales con modos de falla, en el otro caso se buscó determinar de manera general los modos de falla para obtener un indicador cuantitativo de incidencia.

Tabla 13. Ejemplo de Tabla para realizar la prioridad de funciones.

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
...	Nº 1	...	...	-	-	-	-
	Nº 2	...	...	-	-	-	-
	Nº 3	...	...	-	-	-	-
	Nº ...	...	...	-	-	-	-
						Suma	-

Rango de criterios: A determinar para cada análisis, en este caso se utilizan:

- Frecuencia: 1 (baja) - 5 (alta)
- Gravedad: 1 (baja) - 5 (alta)
- Detectabilidad: 1 (alta) - 5 (baja)
- IPR (Índice de Prioridad de Riesgo): $IPR = F \times G \times D$ 1 (baja) - 125 (alta)

4.5.1 Factores Críticos para el Caso de Estudio

De los diagramas de incidencia se obtuvo un gran número de factores incidentales para cada función, los cuales de una u otra manera impactarán en el proceso, pero de todos ellos solo algunos son responsables de la mayoría de eventos o situaciones que se alejan del buen funcionamiento buscado.

Para cada una de las sub-funciones (tercer nivel de desagregación) se realizó un análisis de criticidad determinando los modos de falla más relevantes, sus posibles causas y efectos, se completó la tabla del análisis y a cada criterio se le asignó un valor en base a la experiencia del consultor.

Con los diagramas de incidencia obtenidos en la sección 4.4 y sus tablas respectivas se analizó la relación entre un factor y cada modo de falla. Si esta existió, se analizó la relevancia de cada factor considerando el IPR del modo de falla. Se seleccionó el grupo de factores incidentales con mayor relevancia y se les denominó “factores críticos”⁴. En esta parte el criterio del consultor es relevante porque a partir de su experiencia en el proceso se determinaron las relaciones buscadas.

Los factores incidentales críticos se identificaron en el diagrama de incidencia con un símbolo en rojo. Luego de identificados los factores críticos, se realizó una ficha resumen para cada uno que incluye: objetivo, rango o *set-point*, impacto en proceso, TAGs asociados e indicador determinado. En los casos en los que no se encontró información almacenada en los servidores PI para el análisis, se formuló una recomendación de acción.

Ejemplo de aplicación, función: “Dosificar concentrado según flujo solicitado”

En primer lugar, se completó la tabla del análisis de criticidad con los modos de fallas (

Tabla 14) y se analizaron las causas y efectos posibles, se otorgaron valores a los criterios de frecuencia, gravedad y detectabilidad para calcular el IPR. Ver

Tabla 14.

⁴ Nota: Un factor incidental puede estar presente en varias funciones y ser crítico en una pero no necesariamente en otra.

Tabla 14. Análisis de Criticidad. Función: "Dosificar concentrado según flujo solicitado".

1 OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES						
	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Dosificar concentrado según flujo solicitado Sistema Clyde concentrado (2 sistemas, cada uno con 2 vasos)	(1) Caída de un vaso en un sistema en funcionamiento	- Disminución de flujo de concentrado a T54 - Problema de mezcla y homogeneización con demás componentes (razón calcina) - Retardo (cambiar a otro sistema)	- Falla de algún componente del vaso (válvula, celda de carga, rotofeed) - Fluctuaciones en aire de instrumentación - Fluctuaciones en aire de fluidización	2	1	1	2
	(2) Falla de un sistema completo	- Bajada de flujo o flujo cero de concentrado a T54 - Problema de mezcla y homogeneización con demás componentes (razón calcina real) - Retardo (cambiar a otro sistema)	- Falla de algún componente del vaso (válvula, celda de carga, rotofeed) - Caída de aire de instrumentación - Caída de aire de fluidización	2	4	1	8
	(3) Capacidad de dosificación deficiente de concentrado	- Variaciones de la razón de calcina, impactando en operación del horno (mayor que la propuesta) - Posible vaciado de tolva 54	- Sistemas de control - Calidad del concentrado (densidad aparente)	2	2	2	8

Observando los factores incidentales del diagrama de incidencia 1 (Figura 25 en sección 4.4 de factores incidentales), cada uno de ellos se relaciona con cada modo de fallo analizando su impacto (Tabla 15), para finalmente determinar cuáles de ellos son más relevantes.

Tabla 15. Relevancia de los Factores Incidentales.

Factor Incidental	Afecta al modo de falla	Nota
Capacidad de dosificación sistema Clyde – concentrado	(1), (2) y (3)	Actualmente la dosificación es variable.
Disponibilidad vasos de concentrado	(1), (2) y (3)	Actualmente la disponibilidad es alta.
Disponibilidad filtros	(1) y (3)	Actualmente la disponibilidad es alta.
Disponibilidad válvulas	(1), (2) y (3)	Actualmente la disponibilidad es alta.
Disponibilidad ventilador	(1)	Actualmente la disponibilidad es alta.
Planificación mezcla de carga	(3)	Más genérico, no afecta fuertemente.
Número vasos en funcionamiento concentrado	(1), (2) y (3)	Actualmente número de vasos y secuencia no son óptimas.
Secuencia de funcionamiento vasos sistema Clyde	(1), (2) y (3)	Actualmente número de vasos y secuencia no son óptimas.
Disponibilidad concentrado seco	(3)	Actualmente la disponibilidad es alta.
Humedad concentrado seco	(3)	Actualmente poco relevante.
Granulometría concentrado seco	(1) y (3)	Actualmente poco relevante.
Presión aire de fluidización	(1) y (3)	Actualmente poco relevante.
Flujo aire de fluidización	(1) y (3)	Actualmente poco relevante.
Presión aire de instrumentación	(1), (2) y (3)	Relevante porque afecta a nivel general los tres modos de falla.
Flujo aire de instrumentación	(1), (2) y (3)	Actualmente poco relevante.
Planificación fundición	-	Actualmente poco relevante en esta función.
Modo de ajuste sistema Clyde	(1), (2) y (3)	Actualmente poco relevante.
Planes de mantenimiento de equipos	(1), (2) y (3)	Actualmente poco relevante.

Finalmente, se determinaron los factores críticos de esta función:

- Capacidad de dosificación sistema Clyde – concentrado
- Número vasos en funcionamiento concentrado

- Secuencia de funcionamiento vasos sistema Clyde
- Presión aire de instrumentación

En el Anexo 8.8 se exponen los análisis de criticidad y factores críticos seleccionados para cada una de las sub-funciones de la primera función principal, en las figuras adjuntas en la sección de factores incidentales (Anexo 8.7) se indican con una bandera roja los factores críticos. En Anexo 8.8 se adjunta la tabla descriptiva de cada factor crítico.

4.6 Bases del Panel de Supervisión

En la metodología propuesta, las bases del panel de información se fundamentan principalmente en la determinación de indicadores relevantes para una correcta toma de decisiones, que idealmente consideren el estado actual y pasado del proceso para prevenir condiciones futuras.

Aparte de los indicadores a determinar se pueden generar otras herramientas que apoyen el análisis y la estructuración de un sistema de información integral como, por ejemplo, modelos basados en estimaciones a partir de datos estadísticos y probabilísticos, entre otros.

Con respecto a los resultados de la aplicación en el caso de estudio, en una primera etapa se consideró la determinación de indicadores pertinentes y en una segunda etapa, la propuesta de herramientas de información que apoyen la interpretación de indicadores.

4.6.1 Determinación de indicadores y herramientas

¿Qué es?

La operación óptima de una función debe considerar la monitorización continua de su estado actual y el registro histórico de su desempeño, información relevante a la hora de tomar decisiones de mejora y del conocimiento global del proceso.

En el caso de los factores críticos, hay información relevante que debe ser gestionada en forma de alerta en caso que se produzca un evento que incida en el objetivo de análisis.

¿Para qué sirve?

El objetivo principal de esta sección es seleccionar:

- I. Los indicadores que permitan entregar información sobre los estados de operación (normal, intermedio y anormal) en el caso de funciones.
- II. Los indicadores de alerta que permiten anteponerse a situaciones que puedan afectar el normal cumplimiento de la función principal, representado en el objetivo de análisis y que dependen principalmente de los factores incidentales.

¿Cómo se construye?

La determinación de indicadores se realiza en dos etapas, la primera corresponde a la identificación de indicadores para cada función, y la segunda a la identificación de indicadores para el caso de los factores críticos.

I. Indicadores por *función*

- i) En la etapa de “Análisis Funcional” se realizaron las fichas descriptivas y en ellas se estableció el *Estándar* y la *Relevancia* de cada función en relación al objetivo de análisis.
- ii) Con lo anterior y la información histórica disponible (TAGs⁵), se procede a buscar la(s) variable(s) que representen de mejor manera la operación de una función.
- iii) A partir de indicadores estándares (Anexo 8.9), u otros indicadores más específicos, representar la(s) variable(s) elegida(s) considerando que la información buscada debe ser representativa del nivel de desagregación (niveles 0, 1, 2, 3) y contexto específico.
- iv) Los rangos de estado para cada indicador se determinan en relación al indicador específico, como ejemplo se puede considerar: normal, intermedio y anormal.

II. Indicadores para *factores críticos*

- i) En la etapa de “Análisis de criticidad” se realizaron las fichas descriptivas de los factores críticos, en donde se identificó el *rango o set-point e Impacto en el proceso*.
- ii) Con lo anterior y la información histórica disponible, se procede a buscar los TAGs asociados.
- iii) Con la información disponible en los TAGs, se identifican Indicadores estándar (Anexo 8.9), u otros indicadores más específicos. En el caso que no existan TAGs con información pertinente al análisis o los indicadores no sean estándar o se requiera de otras herramientas, dejar registro de ello a través de recomendaciones sobre futuras implementaciones o de los indicadores propuestos.
- iv) Los rangos de estado para cada indicador se determinan en relación al indicador específico, como ejemplo se puede considerar: normal, intermedio y anormal.

4.6.1.1 *Resultados para el Caso de Estudio*

La aplicación de esta etapa al proceso en estudio se basó en la determinación de indicadores de estado (estado actual de una función) e indicadores que permiten prever condiciones futuras que pueden impactar negativamente al objetivo de estudio. Además, se consideró la construcción de dos herramientas: un escenario de análisis para tolvas y una herramienta de estimación de leyes. Se expone lo realizado para cada caso:

a) Indicadores de estado por Función

⁵ TAG: código asociado a una variable en el sistema *PI-System* para la identificación de una variable.

De las fichas descriptivas, la experiencia adquirida y el apoyo del consultor, se identificaron los indicadores más representativos para cada función y subfunción, según el Diagrama de Descomposición Funcional Priorizado de la Figura 26.

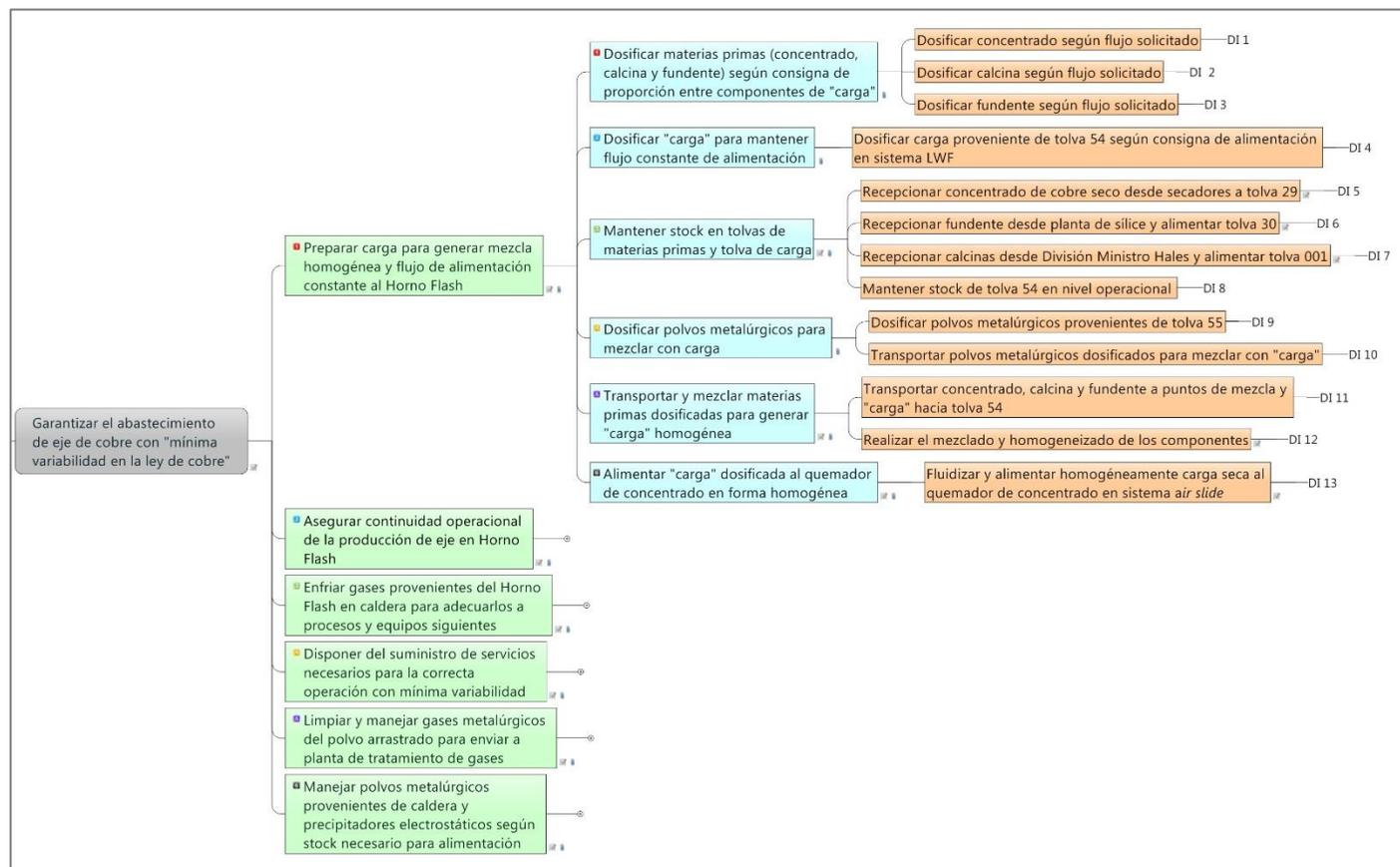


Figura 26. Funciones del Diagrama de Descomposición Funcional a las cuales se les determina indicador.

Algunos de los indicadores determinados se exponen en la Tabla 16 y la lista completa en Anexo 8.9. Existen algunos casos en que habiéndose determinado un indicador adecuado no existía la información historizada necesaria como para calcularlo, por lo que se deja propuesto para futuras actualizaciones.

Para los demás, los rangos de estado utilizados son: normal, intermedio y anormal, se les asigna un código de color: verde, amarillo y rojo, respectivamente. Se considera el mes de mejor desempeño de la ley de cobre en eje, representado a través de la capacidad del proceso (C_p), y se calculan los diferentes indicadores. Para el cálculo de los límites:

- Normal (verde): 80% de los casos con mejor desempeño del indicador.
- Intermedio (amarillo): 15% de los casos con mejor desempeño del indicador después de rango normal.
- Anormal (rojo): 5% de los casos restantes, considerados como de peor desempeño del indicador.

El mes de mejor desempeño según el indicador general de la ley de cobre en eje, la capacidad del proceso, es diciembre del año ficticio, para mayor información ver sección 4.1 de Antecedentes. Existen algunos casos en que se escogieron otros meses por un tema de disponibilidad de información.

La creación de indicadores supuso la creación de TAGs para la historización de la información, en Anexo 8.9 se detallan.

Tabla 16. Indicadores por función y rango. Definición de rangos: verde (Lim Inf - Lim1), amarillo (Lim1 - Lim2) y rojo (Lim2 - Lim Sup).

Nivel	Función	Indicador propuesto	Rango			
			Lim Inf	Lim 1	Lim 2	Lim Sup
0	Garantizar el abastecimiento de eje de cobre con "mínima variabilidad en la ley de cobre"	Capacidad del Proceso (C_{pk})	-	-	-	-
1	Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash	Desviación estándar de Flujo de Alimentación al HF	0	2,48	10,60	inf
		Desviación estándar de Razón de Calcina	0	8,95	20,85	inf
2	Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash	Porcentaje de ollas en estándar	100%	22%	13%	0%
3	Enfriar gases provenientes del Horno Flash en caldera para adecuarlos a procesos y equipos siguientes	Temperatura a la salida de caldera	0	370	390	inf
4	Disponer del suministro de servicios necesarios para la correcta operación con mínima variabilidad	Desviación estándar de la presión del aire de instrumentación	0	2,31	3,37	inf
5	Limpiar gases metalúrgicos del polvo arrastrado para enviar a planta de tratamiento de gases	Porcentaje de recuperación de polvos	-	-	-	-
6	Manejar polvos metalúrgicos, provenientes de caldera y precipitadores electrostáticos, según stock necesario para alimentación	Desviación estándar del flujo de polvos al Horno Flash	0	0,04	0,51	inf

b) Indicadores y herramientas para los factores críticos

El análisis de factores críticos se realizó en base a la información histórica disponible en los servidores PI, si esta no existía o no estaba disponible se dejó propuesto el indicador o simplemente planteado el factor crítico para completar en futuras actualizaciones.

Se identifican dos grupos de factores críticos: el primero de ellos es fácilmente caracterizable a través de indicadores estándares, como los incluidos en Anexo 8.9 y en su análisis son independientes unos de otros. El segundo grupo se caracteriza por la interrelación entre ellos y supone un análisis más detallado.

Los Factores críticos del primer grupo se estudiaron a través de fichas de análisis incluidas en Anexos 8.9 para determinar indicadores pertinentes. El segundo grupo se caracterizó a través de dos herramientas que consistieron en el estudio de escenarios

para la monitorización del stock de tolvas y un modelo simple de estimación de ley en la carga a la entrada del quemador de concentrado.

b.1. Determinación de indicadores

La Tabla 17 presenta algunos indicadores determinados a través del análisis de las fichas incluidas en el Anexo 8.9. Se muestra el indicador, el periodo de medición y la indicación en caso de anomalía, además de los límites para los tres intervalos (verde, amarillo y rojo).

Además, se calculó un indicador de variabilidad para las cuatro variables operacionales más relevantes utilizadas en la operación del proceso [40] (flujo de alimentación, coeficiente de oxígeno, enriquecimiento y razón de calcina) por considerarse de alto interés para la operación y al objetivo de estudio.

Tabla 17. Factores Incidentales y análisis de medición y/o indicador.

Sub-Función	Factores Incidentales Críticos	Descripción medición	Rango			
			Lim Inf	Lim 1	Lim 2	Lim Sup
Dosificar "carga" proveniente de tolva 54 según consigna de alimentación en sistema LWF	Disponibilidad Sistema de Alimentación 1	Indicador: Error dosificación línea 1 de 2% Tiempo: 1 hora Indicación: Error fuera de rango permisible Nota: Revisar condición de tornillo 1	100 %	66%	31%	0%
		Indicador: Error dosificación línea 1 de 3% Tiempo: 1 hora Indicación: Error fuera de rango permisible Nota: Revisar condición de tornillo 1	100 %	81%	47%	0%
	Disponibilidad Sistema de Alimentación 2	Indicador: Error dosificación línea 2 de 2% Tiempo: 1 hora Indicación: Error fuera de rango permisible Nota: Revisar condición de tornillo 2	100 %	75%	41%	0%
		Indicador: Error dosificación línea 2 de 3% Tiempo: 1 hora Indicación: Error fuera de rango permisible Nota: Revisar condición de tornillo 2	100 %	87%	51%	0%
	Nivel de fluidez carga	-	-	-	-	-

b.2. Herramienta 1: Escenarios de stock de tolvas

El set de factores críticos que corresponde a la función "mantener stock en tolvas de materias primas y tolva de carga" se analizó en base a la creación de escenarios con respecto al stock de las tolvas de concentrado (T29), calcina (T001) y carga (T54) para evitar que estas llegaran a niveles bajos o críticos que impacten en la operación del proceso impactando finalmente en la variabilidad en la ley de cobre en el eje.

En resumen, cada uno de los tres escenarios para una tolva se definió por el nivel de carga respectivo con una serie de alertas y recomendaciones para cada caso, que depende del entorno e impacto del material de la tolva. En el Anexo 8.9 se incluye el

detalle de los escenarios para las tres tolvas y en la Figura 27 se muestra el escenario para la tolva 29 de concentrado.

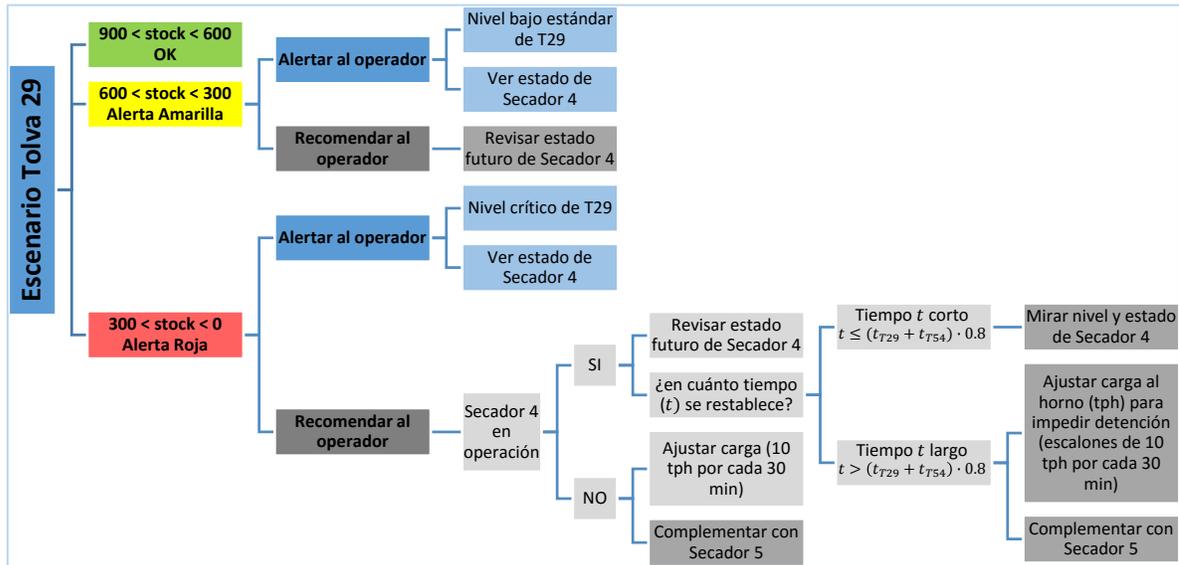


Figura 27. Escenario de stock de la tolva 29 de concentrado.

b.3. Herramienta 2: Estimación de las leyes de cobre, hierro, azufre, sílice y arsénico

Los factores críticos de la función: “alimentar carga dosificada al quemador de concentrado en forma homogénea” influyen directamente con las proporciones de mezcla entre la carga y los gases de combustión (aire y oxígeno) y en la combustión posterior en la torre de reacción. Es por ello, que además de asegurar la homogeneidad de alimentación al quemador de concentrado (QC) se consideró pertinente efectuar una estimación de las leyes de Cu, Fe, S, SiO₄ y As a la entrada del QC a partir de mediciones que se realiza en dos puntos del proceso.

A modo de ejemplo, se adjunta un gráfico con las leyes estimadas para dos días de operación del proceso, Figura 28.

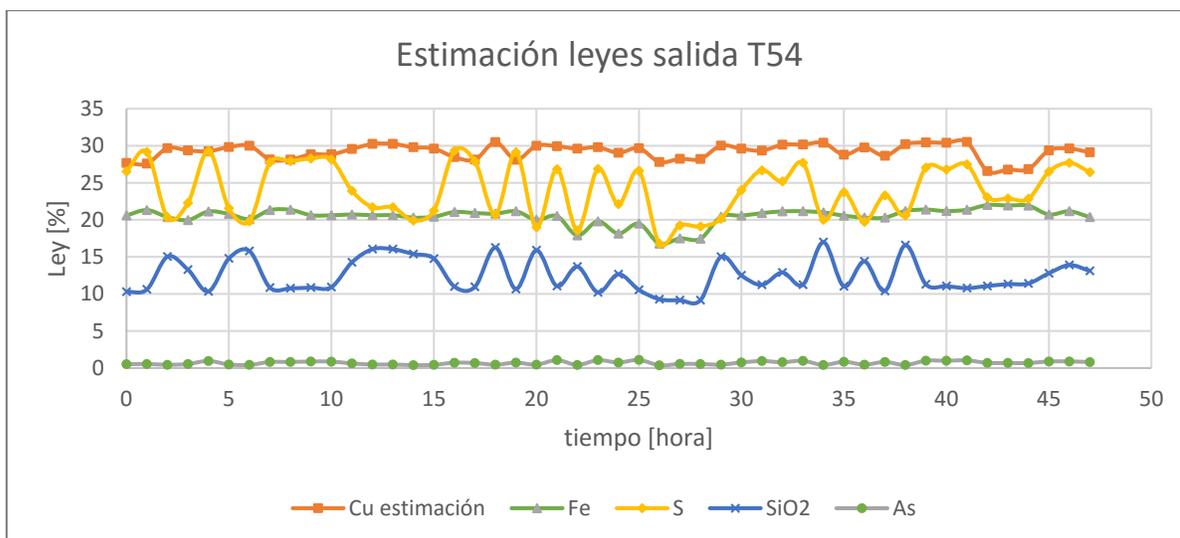


Figura 28. Leyes de Cu, S, S, SiO₄ y As a la salida de tolva 54.

5 Propuesta de Panel de Supervisión

5.1 Despliegues del Panel de Supervisión

El análisis desarrollado en las secciones anteriores tiene el objetivo final de la construcción de pantallas de visualización para el monitoreo de los indicadores planteados y la aplicación de las herramientas propuestas. Las pantallas o despliegues deben contener toda la información necesaria para alertar e informar en caso de algún evento que se desvíe del normal funcionamiento y pueda aumentar la variabilidad de la ley de cobre en eje. En ese contexto el análisis metodológico ha permitido la detección de variables claves que son importantes de monitorear.

Como punto de partida para el panel de supervisión y considerando que el análisis se genera en torno a él, se utiliza el Diagrama de Descomposición Funcional (DDF) como principal herramienta para estructurar la información y como base visual para los usuarios. Este se incluye en la pantalla principal denominada "Overview" en que se cada función se representó con un bloque y líneas entre ellos que simbolizan las relaciones causales.

Cada bloque, que representa una función, cuenta con una luz: verde, amarilla y roja en relación a los indicadores de estado determinados en la sección anterior. Además, cada bloque tiene un botón que permite la navegación a una pantalla específica con la información de indicadores. La visualización se basa en el despliegue de gráficos dada la capacidad de mostrar información en tiempo real y pasado, y además de poder realizarse predicciones de manera visual en algunos casos.

Para cada sub-función (último nivel de desagregación del DDF) se contempló un despliegue con los indicadores determinados y las herramientas desarrolladas en torno a los factores críticos.

La construcción de los paneles se realizó en base a los programas preinstalados en los sistemas informáticos del Horno Flash: *Datalink* y *ProcessBook*, y se utilizaron

herramientas nativas, a modo de facilitar el posterior uso y actualización por parte del usuario. Esto responde a una de las restricciones iniciales del proyecto que consideró preferentemente el uso de herramienta de *PI-System*.

En el diseño de la aplicación se prevé como usuarios al operario de la consola del Horno Flash y al metalurgista del proceso. Para el operario, la pantalla “Overview” le entregará información de estado de las funciones y una visión general de estas y de los factores incidentales. En el caso del metalurgista, podrá navegar e identificar condiciones pasadas y futuras a través del análisis de gráficos.

Se adjunta un esquema de los despliegues propuestos en la Figura 29 y desde la Figura 30 a la Figura 37 se muestran fotos de los despliegues desarrollados.

Vale recalcar que el enfoque del trabajo realizado se centró en la propuesta y aplicación de la metodología de análisis, por lo que el desarrollo del panel de supervisión es un ejemplo que puede ser ampliamente mejorado con el fin de abarcar toda la información recopilada y los análisis desarrollados. Se recomienda para futuras actualizaciones la implementación de notificaciones y recomendaciones con la valiosa información obtenida a través de la aplicación de la metodología en el proceso.

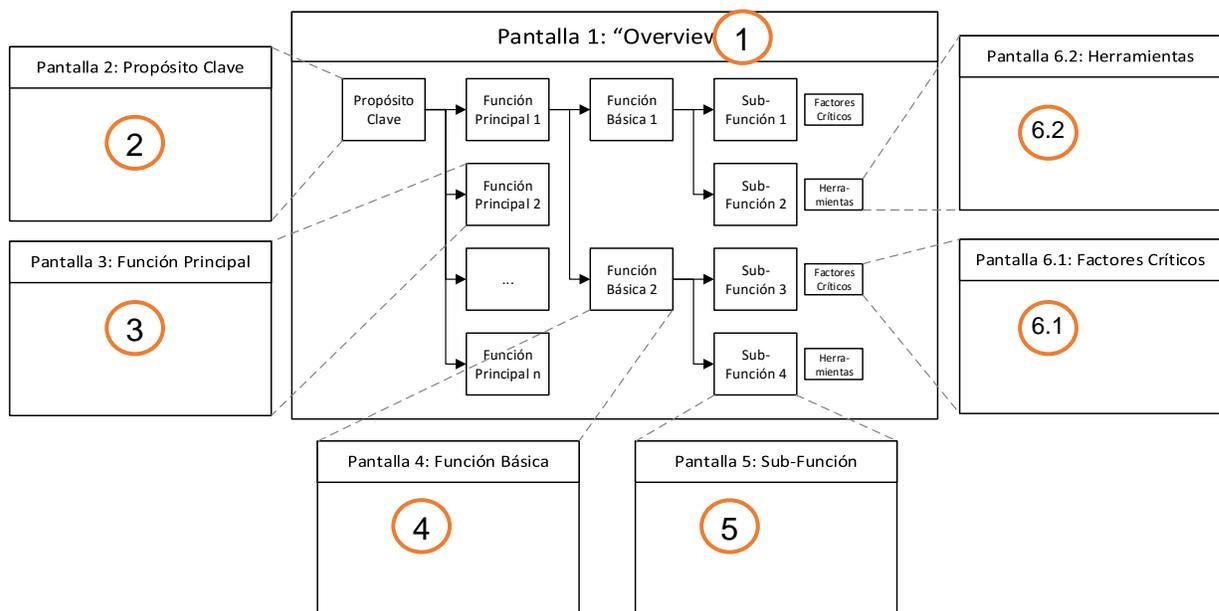


Figura 29. Esquema de las pantallas consideradas para el panel de supervisión propuesto.

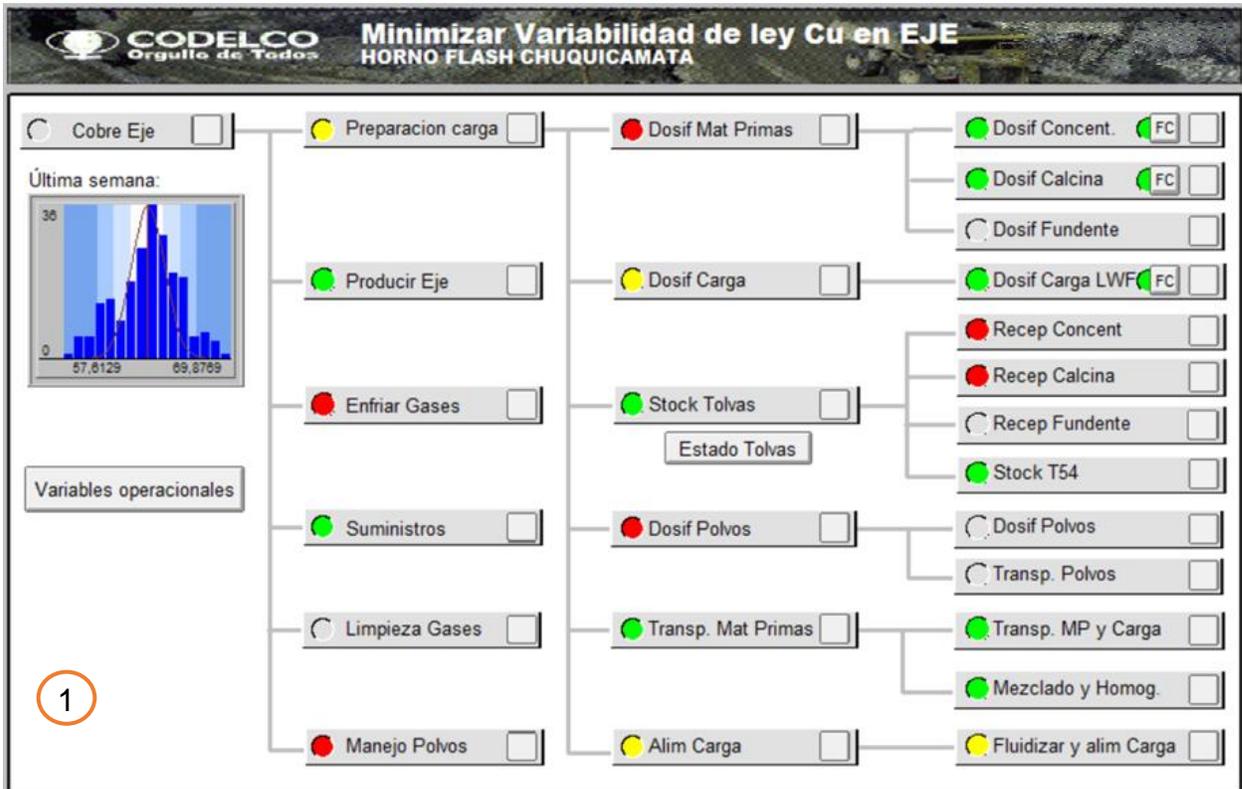


Figura 30. Despliegue "Overview" del panel de información.



Figura 31. Despliegue "Resumen" ley de cobre en el eje.

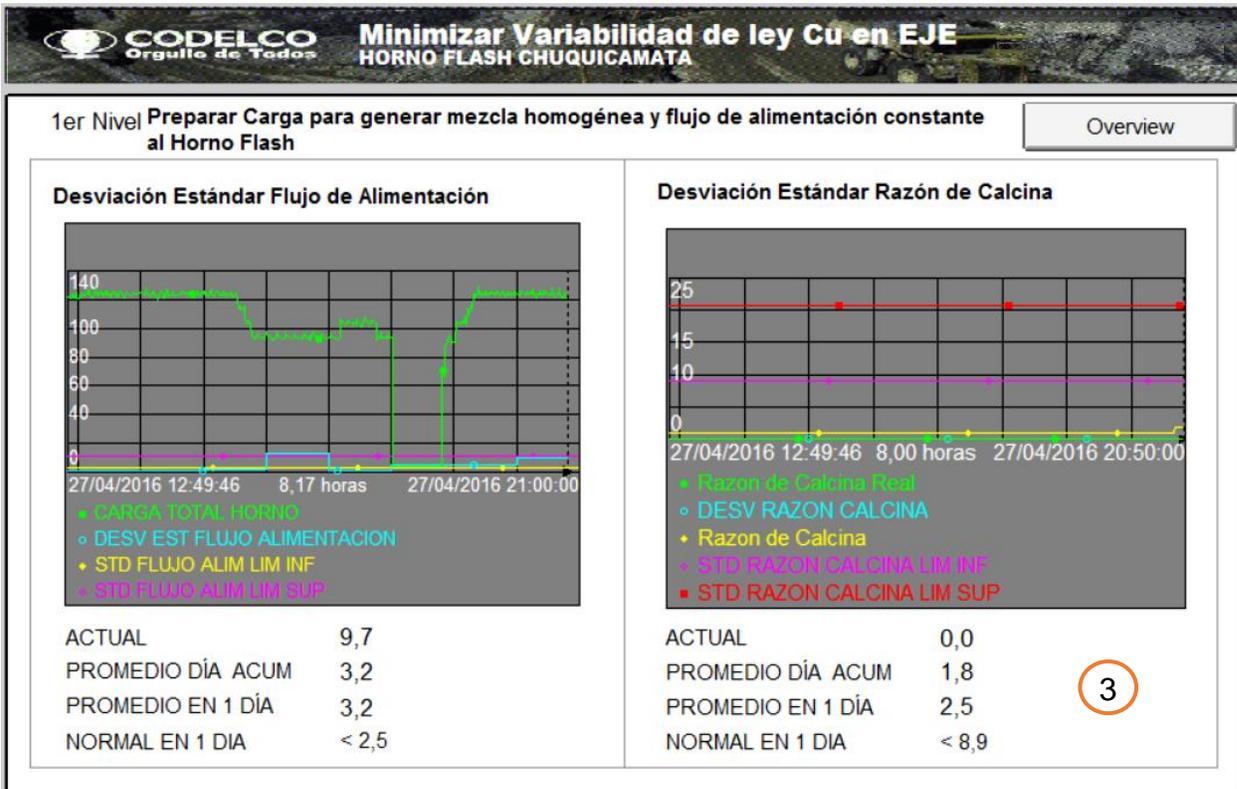


Figura 32. Despliegue "Indicadores de Función".

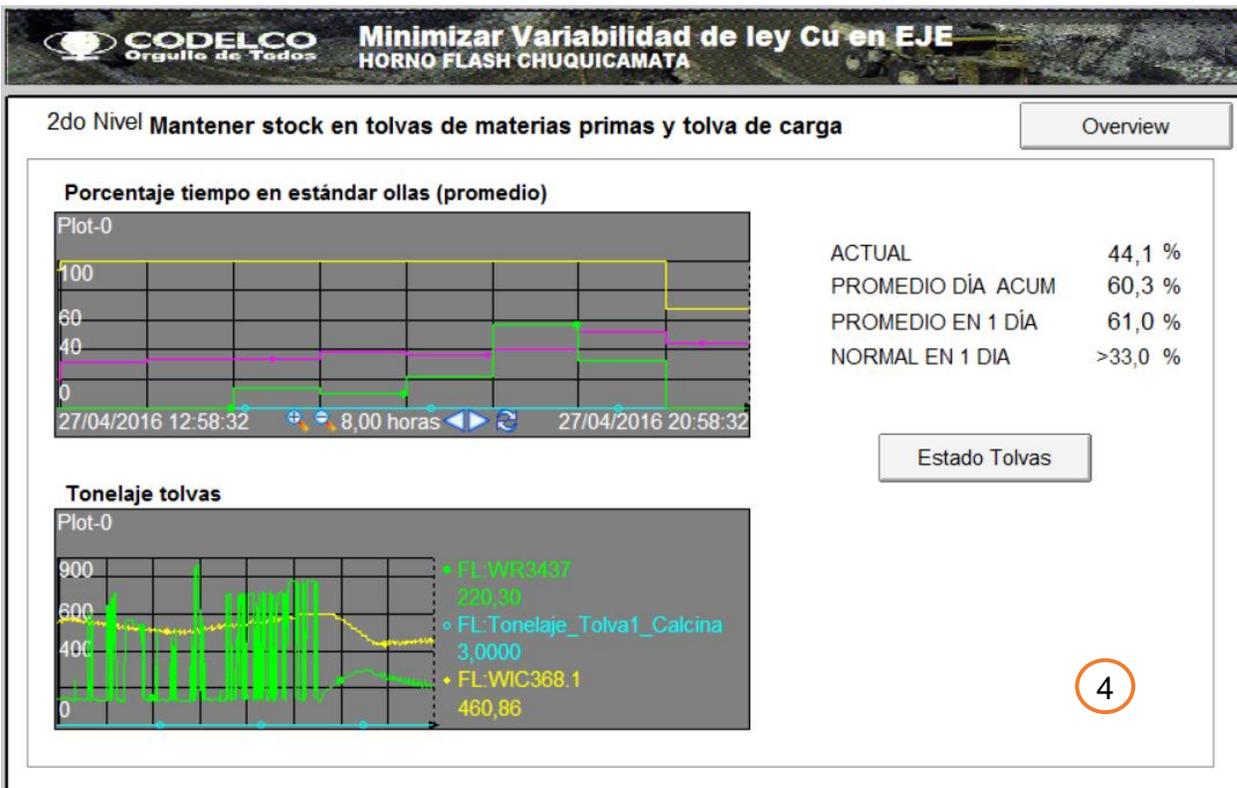


Figura 33. Despliegue "Indicadores de Función".

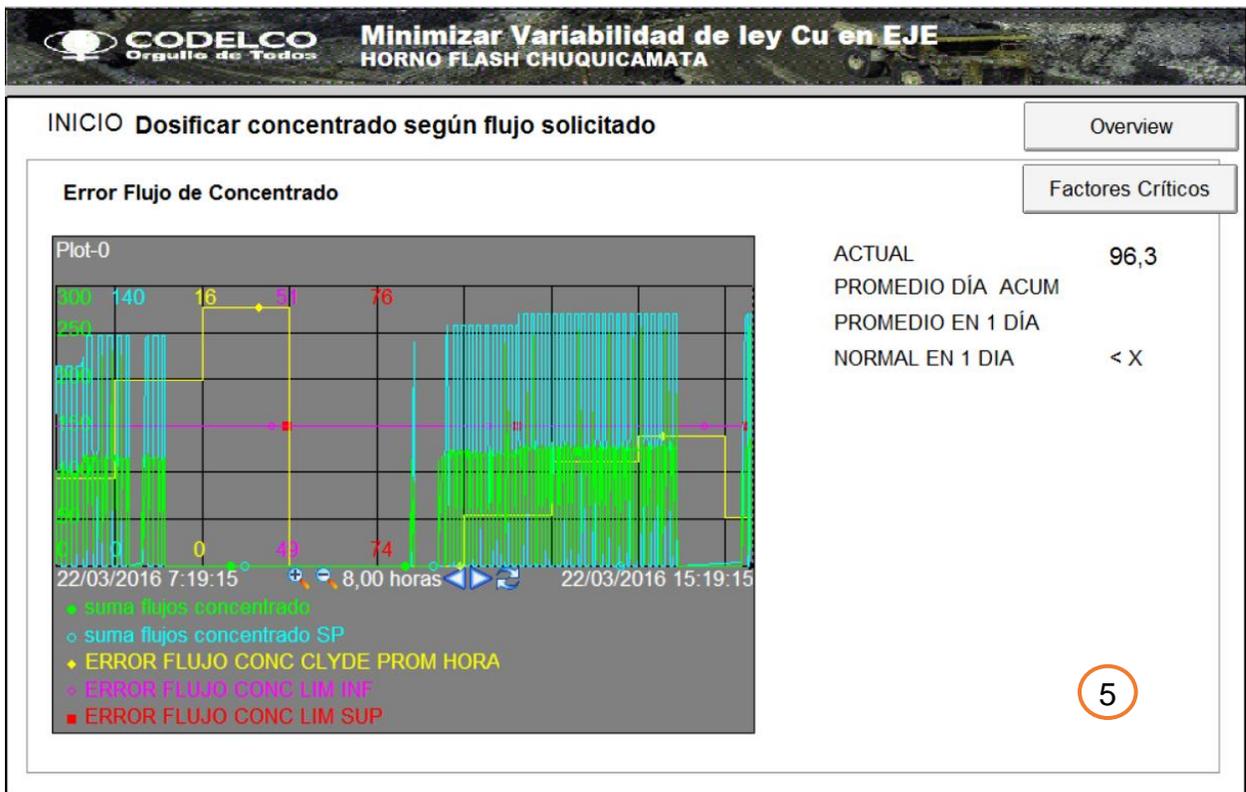


Figura 34. Despliegue "Indicadores de Función".

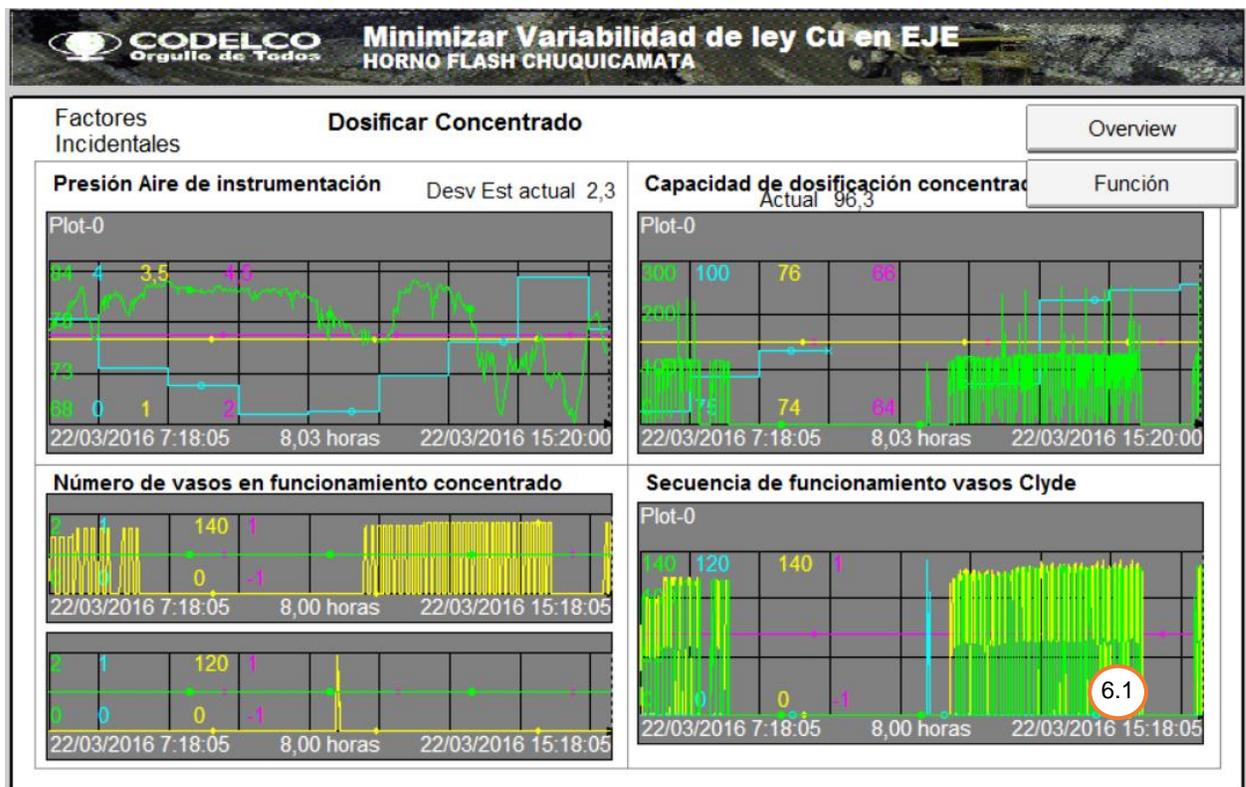


Figura 35. Despliegue "Factores Incidentales".

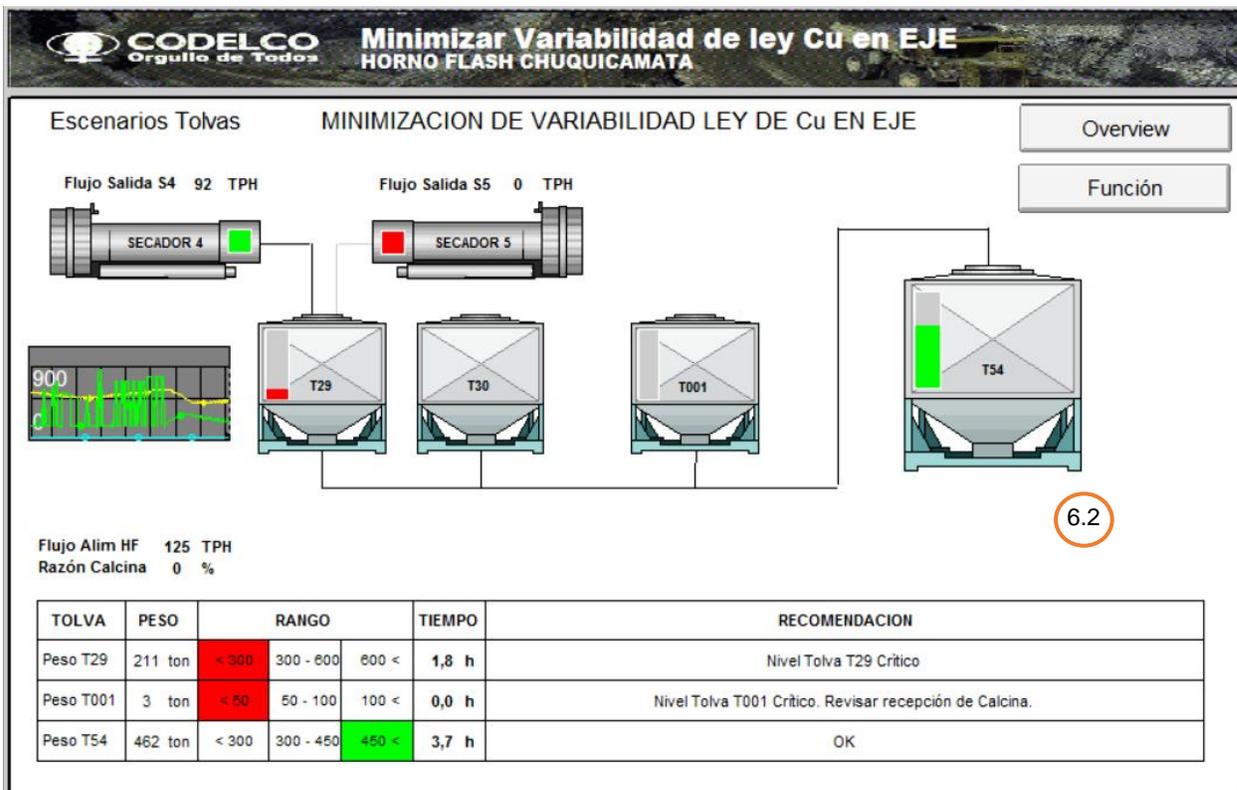


Figura 36. Despliegue "Panel de información de tolvas".

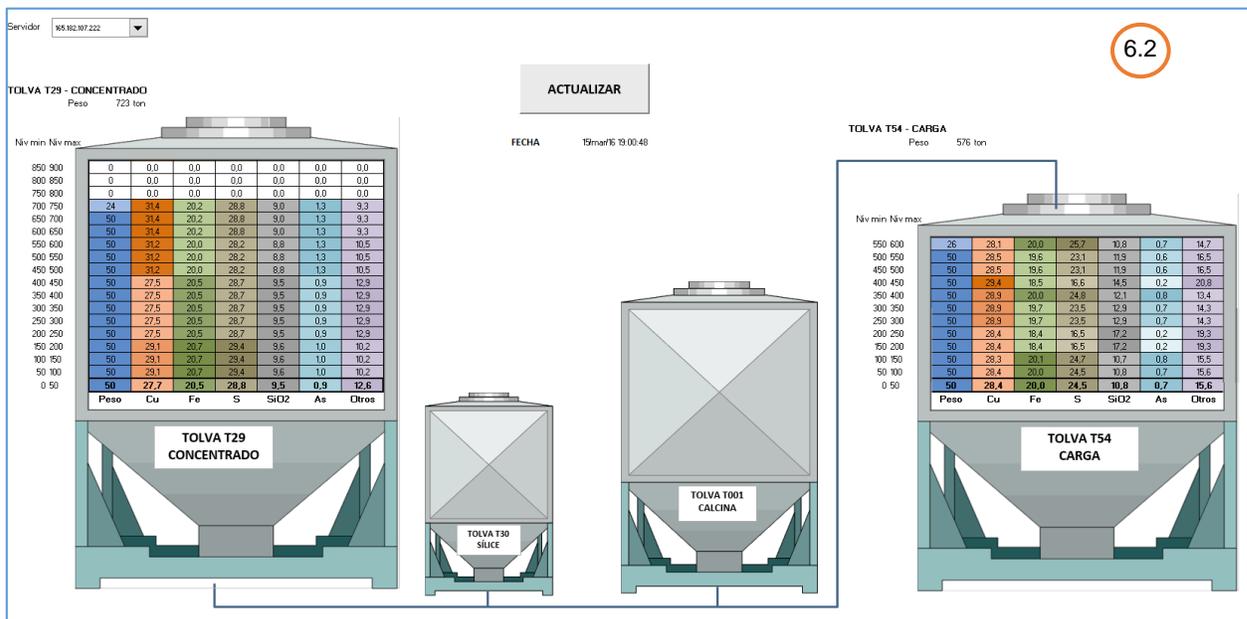


Figura 37. Despliegue "Estimación de leyes en tolvas".

5.2 Aplicación del Panel de Supervisión

Los resultados medibles de la operación de la aplicación anteriormente expuesta en la sección 5.1 deben ser monitoreados en un periodo de tiempo de por lo menos un par

de meses por los operarios y supervisores del proceso. A modo de práctica se realizó un monitoreo esporádico en un periodo de dos semanas y se pudo observar el potencial de análisis de la herramienta.

Se pudieron detectar a través del análisis de los despliegues ciertas condiciones operacionales y eventos que impactan negativamente la variabilidad de la ley de cobre en el eje, dentro de las que se pueden mencionar:

- Alta variabilidad en la razón de calcina provocada por una operación no óptima del sistema de dosificación y transporte de materias primas.
- Condiciones de alta variabilidad en la dosificación de carga en los dos sistemas de dosificación por pérdida de peso.
- Bajo stock de las tolvas de materias primas y carga.
- Transporte de materias primas y carga deficientes a través de la detección de fluctuaciones anormales en la presión del suministro de aire de transporte.
- Alimentación no homogénea de carga al quemador de concentrado por las cuatro aberturas dispuestas para ello.

Por ejemplo, con los datos utilizados en el proceso de prueba de la aplicación, se modeló un incidente para testear la capacidad de respuesta de la aplicación a la información presentada. Se planteó un problema potencial como es el taponamiento en el sistema de alimentación al Horno Flash (HF) que por lo general provoca detenciones del HF antes de su solución. Se modeló que algunas de las aberturas de alimentación al HF se encontraron parcialmente obstruidas y la carga alimentada en esas condiciones ingresó en proporciones desiguales produciendo una mezcla no homogénea con los gases de proceso y por consiguiente una combustión deficiente en la torre de reacción.

Observando el gráfico superior de la Figura 38 se puede apreciar que las temperaturas de cada abertura en el primer tercio del periodo se mueven de manera similar, es decir, no hay obstrucción. Posterior a ello se aprecian diferencias visibles entre ellas. Con el indicador propuesto para este caso (diferencia de cada temperatura con respecto al promedio) representado en el gráfico inferior, se hubiese detectado y evitado la alimentación no homogénea de carga, suceso que persistió por poco más de dos días en que finalmente se tendría que detener el proceso.

Vale recordar que uno de los principales factores que influye en la variabilidad de la ley de cobre en el eje son las variaciones sobre el flujo de alimentación de carga, que en este caso deriva en la detención total del proceso si no se identifica a tiempo el incidente analizado.



Figura 38. Representación de la modelación de un incidente potencial. FL:WTOTAL corresponde la tasa de alimentación al horno en ton/h, FL:TI-X corresponde a las temperaturas en cada abertura en °C y DIF_TEMPX_QC al indicador respectivo en °C.

El análisis anterior es un ejemplo donde se puede apreciar el aporte de la metodología implementada al proceso de fusión de concentrado en el Horno Flash.

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Las exigencias actuales en los procesos industriales suponen desafíos cada vez más complejos que deben ser abordados de manera multidisciplinaria y con proyección de futuro. Gran parte de los procesos deben afrontar costos de producción cada vez más altos con requerimientos operacionales más estrictos, en simples palabra, se debe realizar “más con menos”.

A través del presente trabajo se dejó en evidencia la importancia de la información en un proceso industrial y cómo la generación de conocimiento a partir de ella es un factor clave. Es aquí donde los sistemas de información permiten gestionar aquella información necesaria para implementar aspectos específicos en la toma de decisiones informada.

El proceso en estudio, la fusión flash de concentrados de cobre, es de alta complejidad porque se lleva a cabo a temperaturas que bordean los 1300°C y no es posible “ver” fácilmente lo que ocurre al interior del horno, en ese sentido la información disponible del proceso es crucial para entender lo que ocurre y buscar acciones oportunas para propiciar una operación óptima. El objetivo de análisis planteado en este trabajo fue estudiar la variabilidad de la ley de cobre en el eje, un objetivo operacional de alto interés e impacto tanto para el mismo proceso como para el siguiente, la conversión.

La variabilidad de la ley de cobre en el eje es alta para el Horno Flash, el indicador capacidad del proceso reveló que el proceso no es capaz de cumplir con el rango de especificaciones de 60 a 65%. Como antecedente, la ley de cobre en el eje se correlacionó linealmente con algunas variables claves del proceso en donde las principales fuentes que indujeron variabilidad fueron el *flujo de alimentación* y el *enriquecimiento de oxígeno*, pero no se detectó como relevante la *ley de cobre en la alimentación*, que según operarios e información de planta sí es relevante porque operacionalmente es fácilmente detectable la relación. Entonces, de lo anterior fue pertinente aplicar un estudio metodológico más profundo de la variabilidad de la ley de cobre en el eje y sus factores incidentales.

Se compararon tres metodologías de análisis de procesos (mantenimiento productivo total, mantenimiento basado en la confiabilidad y mantenimiento total de la calidad) y sus herramientas de apoyo y se logró estructurar a través de ellas las bases y conceptos necesarios para plantear una metodología de análisis de procesos para ser aplicada al proceso de fusión de concentrados de cobre.

La metodología propuesta comprende una serie de herramientas que se van aplicando de manera ordenada por etapas, de forma que la información de una etapa es utilizada en la siguiente, es de estructura deductiva, es decir, va de lo general a lo particular y la complejidad de análisis es ascendente en donde se abarca inicialmente el proceso completo para progresivamente enfocarse en los subsistemas.

Las seis etapas de la metodología propuesta son: Antecedentes generales, donde se recopila la información y se determina el objetivo de análisis; Análisis Funcional que representa la modelación conceptual del proceso a través de un quiebre funcional en

relación al objetivo de análisis; Priorización de Funciones, donde se estudia el impacto de cada función; Factores Incidentales, que engloban el conjunto de variables que impactan en el proceso; Análisis de Factores Críticos para determinar las variables más importantes; y las Bases del Panel de Supervisión en donde se determinan los indicadores y herramientas de análisis que serán utilizadas en el panel de supervisión.

Como resultado de la aplicación de la metodología al proceso de fusión flash, se determinó que hay subprocesos que influyen más en la variabilidad de la ley de cobre en el eje como, por ejemplo, el proceso de mezcla y transporte de la carga que será alimentada al horno influye más que el proceso mismo de fusión, esto se explica del punto de vista que la alimentación de carga, a través del flujo de alimentación y su composición, interviene en el punto de equilibrio operacional del proceso.

Se plantearon las bases para la conformación de un sistema de información centrado en la minimización de la ley de cobre en el eje a través de la determinación de indicadores de estado y la creación de dos herramientas enfocadas en mejorar la información disponible del proceso. Como ejemplo tangible de su aplicación se desarrolló una herramienta de visualización a través de un set de despliegues con gráficos en tiempo real de los indicadores propuestos y de las herramientas desarrolladas en los programas *ProcessBook* y *DataLink* de *PI-System*.

Los resultados de largo plazo tienen estrecha relación con las tres motivaciones planteadas al comienzo del trabajo, la primera buscó la valorización de la información del proceso para una toma de decisiones más completa. Esto se logró a través de los indicadores y herramientas propuestas que ayudan en la interpretación del proceso y por consiguiente en una toma de decisiones más informada.

La segunda motivación buscó la comunicación entre el “procesista” y el “analista”, el primero familiarizado con el proceso productivo, mientras que el segundo con herramientas más complejas de análisis. Esto se logró tomando en cuenta que la metodología en sí misma es un medio de comunicación entre ambos actores y que sus etapas son caminos guiados para la comprensión del proceso y la posterior aplicación de herramientas de análisis más complejas.

La tercera motivación contempló la capacidad de registrar la información recopilada y el conocimiento adquirido a través de ella, y esto se logró principalmente a través de las etapas secuenciales que contemplan el registro ordenado de la información en fichas y tablas, por ejemplo. Es un precedente para nuevas implementaciones y nuevos objetivos de análisis, un punto de partida con una estructura organizada de la información que minimizará los tiempos para familiarizarse con el proceso y permitir así el traspaso más expedito del conocimiento generado.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda aplicar la metodología de manera ordenada y en la secuencia propuesta para que la información a obtener tenga la consistencia necesaria para los análisis posteriores y el conocimiento buscado, y para que el panel de supervisión a desarrollar sea representativo de la situación a monitorear y analizar.
- El foco principal del trabajo realizado se centró en la propuesta y aplicación de la metodología para determinar indicadores y herramientas relevantes como bases para un panel de supervisión. Este último fue desarrollado como un ejemplo de aplicación y se recomienda complementarlo y mejorarlo considerando conceptos propios del diseño gráfico y de la interacción de un usuario, se puede mejorar la interfaz y la interacción con el usuario.
- Con respecto al caso de estudio, en primer lugar, se recomienda complementar el panel de supervisión propuesto para que considere notificaciones de efectos y causas sobre las situaciones detectadas por los indicadores, dado que esa información fue recopilada a través de la aplicación de la metodología. Además, se recomienda complementar con la utilización de otros indicadores propios de la operación del proceso. En segundo lugar, el modelo de estimación de leyes propuesto a partir del análisis de factores críticos puede ser mejorado para obtener mejores estimaciones. Se recomienda aumentar la frecuencia de muestreo y mejorar el modelo de desplazamiento de carga en las tolvas.
- La metodología planteada debería ser aplicable a otros equipos y procesos de similares características con las modificaciones pertinentes.

7 Bibliografía

- [1] SALAZAR B. 2012. Ingeniería Industrial Online. [En línea]. <<http://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/procesos-industriales/>>. [consulta: 06-Dec-2015].
- [2] FELDER R. M. y ROUSSEAU R. W. 2004. Principios elementales de los procesos químicos, 3a ed. México, 686p.
- [3] MORANDÉ F. 2012. ¿Sería posible un Chile sin esta actividad? [en línea] Revista Qué pasa Minería. <<http://www.quepasamineria.cl/index.php/galerias/item/819-%C2%BFser%C3%ADa-posible-un-chile-sin-esta-actividad>> [consulta: 08-Aug-2015].
- [4] DE RAMÓN A. 1988. Historia del sector industrial en Chile. Santiago, Inst. Hist. Pontif. Univ. Católica Chile. Vol. 4.
- [5] BANCO CENTRAL DE CHILE. [en línea]. <<http://www.bcentral.cl/>>. [consulta: 06-Aug-2015].
- [6] DIRECON - Ministerio de Relaciones Exteriores. 2015. Informe Anual Comercio Exterior de Chile 2014-2015. 1ra ed. Santiago, Direcon. 311p.
- [7] COMISIÓN CHILENA DEL COBRE. 2015. Observatorio de Costos Industria Minera del cobre. Santiago. 20p.
- [8] E. HAINDL. 2015. El fin del superciclo de precios del cobre. Diario Financiero, Santiago, 01-Sep-2015.
- [9] CONSEJO MINERO. 2016. Minería en Cifras. Santiago, 63p.
- [10] CODELCO, Corporación Nacional del Cobre de Chile. [en línea]. <<http://www.codelco.com/>>. [consulta: 14-Nov-2015].
- [11] CHILE. Ministerio del Medio Ambiente. 2013. Decreto 28: Establece Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico. 12 diciembre 2013. 11p.
- [12] MINERÍA Y MEDIO AMBIENTE LTDA. 2009. Descripción General de Instalaciones División Codelco Norte Codelco Chile. Chuquicamata, 120p.
- [13] ETCHEVERRY J. 2013. Modelo de Gestión para la optimización del proceso de conversión de la Fundición Chuquicamata. Tesis para optar al grado de magister en gestion y direccion de empresas – version mineria. Santiago, Universidad de Chile, Facultas de Ciencias Físicias y Matemáticas. 61p.
- [14] FUNDICIÓN Y REFINERÍA - DIVISIÓN CHUQUICAMATA. 2013. Manual de Operación Horno Flash (preliminar). Chuquicamata. 227p.
- [15] EXTRACTIVE Metallurgy of Copper. 2011. Por Davenport W. "et al". 5ta ed. Amsterdam, Elsevier Ltd. 481p.
- [16] SISTEMAS de Información Gerencial. 2012. KENNETH C. "et al". 12a ed. México: Pearson Educación, 640p.

- [17] JIMÉNEZ O. 2007. Análisis y diseño de un sistema de monitoreo de costos operacionales en línea de procesos mineros. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Santiago, Universidad de Chile, Facultas de Ciencias Físicas y Matemáticas. 112p.
- [18] OSISOFT. PI-System. 2015. [en línea]. <https://www.osisoft.com/software-support/what-is-pi/What_Is_Pi.aspx>. [consulta: 18-Dec-2015].
- [19] DEFINICION.DE. 2014. Concepto de información. [en línea]. <<http://definicion.de/informacion/>>. [consulta: 15-Sep-2015].
- [20] INFORMACIÓN y conocimiento: la difusión de TICs en la industria. 2003. Por Yoguel G. "et al". 1ra ed. Santiago, CONICET. 23p.
- [21] HIDALGO A. y León G. 2006. La importancia del conocimiento científico y tecnológico en el proceso innovador. Santiago, Investig. y Prod. Científica II. No. 39. 32p.
- [22] ROWLEY J. 2007. The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy. Inf. Sci., vol. 33, no. 2: 163–180.
- [23] BISCHOF K. B. y Himmelblau D. M. 2004. Análisis y simulación de procesos. España, Reverté S.A. 616p.
- [24] HARRINGTON E. 1913. The Twelve Principles of Efficiency. The Engineering Magazine Co., N.Y. 12p.
- [25] SUZUKI T. 1996. TPM en industrias de procesos. 1ra ed. Madrid, JIPM. 404p.
- [26] WOODHOUSE J. 2001. Combining the best bits of RCM, RBI, TPM, TQM, Six-Sigma and other 'solutions'. Mix. best Mod. methods, vol. 1, no. 1: 1–9.
- [27] MANSILLA N. 2011. Aplicación de la Metodología de Mantenimiento Productivo Total (TPM) para la Estandarización de Procesos y Reducción de Pérdidas en la Fabricación de Goma de Mascar en una Industria Nacional. Memoria para optar al título Profesional de Ingeniera en Alimentos. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. 133p.
- [28] NASA. 2008. Reliability-Centered-Maintenace-Guide Final. EEUU. 472p.
- [29] RENOVE TECNOLOGÍA. 2014. Mantenimiento Petroquímica. [en línea].<<http://www.mantenimientopetroquimica.com/rcm.html>>. [consulta: 18-Jul-2015].
- [30] GESTIÓN DE LA CALIDAD: Conceptos, Enfoques, Modelos y Sistemas Camisón. 2006. Camisón C. "et al". 1ra ed. Madrid, Pearson Educación, S.A. 1464p.
- [31] GONZALEZ R. 2006. Diseño Estrategia Operacion centrada en Confiabilidad para Minera Spence S.A. Tesis para optar al grado de magister en gestion y direccion de empresas. Santiago, Universidad de Chile, Facultas de Ciencias Físicas y Matemáticas. 70p.
- [32] INC. 2014. Total Quality Management (TQM). [en línea]. <<http://www.inc.com/encyclopedia/total-quality-management-tqm.html>>. [consulta: 16-Jul-2015].

- [33] AMERICAN SOCIETY for Quality. ASQ. [en línea]. <<http://http//asq.org/>>. [consulta: 16-Jul-2015].
- [34] CHILEVALORA Y OIT. 2012. Guía de Apoyo para la Elaboración del Análisis Funcional. Santiago, OIT. 35p.
- [35] NASA. 2007. NASA Systems Engineering Handbook. Syst. Eng., vol. 6105, no. June. EEUU. 360p.
- [36] PIQUÉ T. y A. Cejalvo. 1992. NTP 333: Análisis probabilístico de riesgos: Metodología del Árbol de fallos y errores. España, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. 9p.
- [37] BESTRATEN R. y M. Orriols.2004. NTP 679 : Análisis modal de fallos y efectos . AMFE. España, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. 10p.
- [38] BESTRATÉN M. 1987. NTP 238 : Los análisis de peligros y de operabilidad en instalaciones de proceso. Madrid, Inst. Nac. Secur. e Hig. en el Trab. 9p.
- [39] INSTITUTO MEXICANO DE INGENIEROS QUÍMICOS A.C. 2000. Análisis de riesgos de procesos (ARP): Un esquema de mejora de la técnica 'HazOp'. Ciudad de México, Tecnol. Ciencia, Educ., vol. 15, no. 2: 49–60.
- [40] PÉREZ N. 2015. Reuniones de asesoría con experto en Horno Flash. En: CONTAC INGENIEROS. Santiago, casa matriz. sp.
- [41] YACHER L. 2015. Reuniones de asesoría con experto en Horno Flash. En: CONTAC INGENIEROS. Santiago, casa matriz. sp.
- [42] PARADA R. 1999. Modelación Dinámica de la Fusión Flash. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Metalurgista. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería. 205p.
- [43] CHISHOLM M. 2015. Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata. Chuquicamata, Codelco. 43p.
- [44] GUTIÉRREZ H. y De la Vara R. 2009. Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma. 2da ed., no. 1. México D.F, McGraw-Hill. 502p.

8.2 Descripción de Áreas del Proceso complejo Horno Flash

Áreas que conforman el complejo asociado al Horno Flash [14]:

- Área 00: Servicios generales.
- Área 03: Manejo de carga (desde tolva de concentrado seco, tolva de sílice y tolva de recepción de calcina DMH).
- Área 04: Horno Flash y circuito secundario de enfriamiento.
- Área 05: Caldera (hasta entrega de vapor saturado en la salida domo).
- Área 06: Manejo y limpieza de gases metalúrgicos (hasta cámara de mezcla).
- Área 07: Manejo de polvo (hasta tolva tripartita).

Área 00: Servicios generales

Requerimientos de Agua: El agua es requerida como agua de refrigeración, requerida en los circuitos de refrigeración del horno y como agua de procesos que se utiliza en la caldera recuperadora de calor.

Requerimientos de Oxígeno: El oxígeno se utiliza para el enriquecimiento del aire de proceso, como consumo de oxígeno anular y en la lanza del quemador, además de la sulfatación de polvos metalúrgicos en el *up-take* y en las lanzas perforadoras de sangrías.

Requerimientos de Aire: Se concentran en el aire de proceso que se utiliza en el quemador de concentrado del Horno Flash para producir la oxidación de los sulfuros y como aire de sulfatación en *up-take* y la caldera; el aire de transporte que se utiliza para el sistema de transporte y mezclado de concentrado seco, calcina y sílice; el aire de instrumentación requerido por los equipos de accionamiento neumático; y el aire de combustión de los quemadores auxiliares.

Requerimientos de Combustibles: En el *up-take* y la caldera se dispone de quemadores duales, que operan con gas natural o petróleo diésel; sin embargo, en condiciones normales de proceso no se requiere del uso de estos quemadores ya que la operación es autógena.

Sistema de distribución de energía eléctrica: Comprende salas eléctricas y distribución en 13.8 kV y 400 V.

Área 03: Manejo de carga

El alcance de esta área comprende desde la recepción de concentrado de cobre en la tolva 03-029, la recepción de fundente (sílice) en la tolva 03-030 y la recepción de calcina dmh en la tolva tol-001, incluyendo la tolva de polvos de caldera 03-055, hasta el sistema de cama deslizante “*air slide*” para alimentación de la mezcla concentrado, sílice y calcina al Horno Flash.

Bases de diseño

Concentrado seco y carga fría: La alimentación de concentrado seco al Horno Flash, se realiza desde la tolva de concentrado seco 03-029 es alimentada desde los secadores N° 4 o N° 5, vía transporte neumático. La tolva 03-029 de capacidad de 900 ton, tiene como autonomía máxima 7,5 a 8 horas de operación.

Fundente (Sílice): La alimentación de fundente al Horno Flash se realiza desde la tolva 03-030, con capacidad de 150 toneladas. Esta tolva tiene una autonomía máxima de 41 a 44 horas.

Calcina de División Ministro Hales: La alimentación de calcina DMH al Horno Flash, se realiza desde la tolva de calcina TOL-001 con capacidad de 500 toneladas, la cual es alimentada desde la recepción de calcinas DMH, vía transporte neumático. Bajo el mismo mecanismo de transporte, la calcina es mezclada al concentrado de cobre y fundente que vienen desde los vasos presurizados, enviando la mezcla final a la tolva 03-054.

Mezclado y transporte de concentrado, fundente (sílice) y calcina DMH: El traspaso desde sus respectivas tolvas del concentrado seco más carga fría, fundente y calcina DMH, se realiza mediante un sistema de transporte neumático los cuales envían esta carga mezclada hacia la tolva 03-054 de 600 toneladas. La tolva 03-054 de 600 toneladas tiene una autonomía entre 4,4 y 4,7 horas. Los sistemas de transporte neumático son de provisión de la empresa Clyde Process. Desde la tolva 03-054 es alimentado el sistema de dosificación por pérdida de peso (Sistema *Loss-in-Weight Feeder*). Las descargas convergen a una cama deslizante por aire, sistema denominado “*air slide*”.

Polvos metalúrgicos: Además del concentrado, carga fría, fundente (sílice) y calcina DMH, se alimenta al Horno Flash polvos metalúrgicos recirculados. Estos polvos provienen desde la tolva 03-055 y se dirigen, a través del alimentador de rastras, hacia el “*air slide*”, que alimenta al quemador del Horno Flash.

Área 04: Horno Flash y circuito secundario

El alcance de esta área comprende desde la alimentación de mezcla concentrado – carga fría – fundente – calcina DMH y polvos, alimentación de aire enriquecido, hasta la salida gases por *up-take*, y salida de líquidos de sangría.

Bases de diseño

El Horno Flash presente en la Fundición Chuquicamata debe procesar 2.800 ton/día de concentrado seco – carga fría – fundente – calcina DMH y polvos con una capacidad instalada de 3.000 ton/día.

La fusión del concentrado en el horno genera como producto eje cuya ley de cobre se debería encontrar en un rango de 60% a 65% y como subproductos escorias, cuya ley en cobre varía aproximadamente de un 2% a 5%, gases con un alto contenido de anhídrido sulfuroso (SO_2) a la salida de los precipitadores electrostáticos y polvos

metalúrgicos arrastrados en estos gases cuyo coeficiente de generación por diseño es del orden del 10%.

En el proceso realizado en el horno se funde una extensa gama de concentrados que presentan una gran cantidad de impurezas como zinc, bismuto, arsénico, antimonio, selenio, telurio, níquel y mercurio que pueden ser eliminadas efectivamente en la fundición de concentrado.

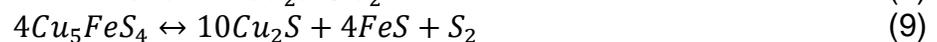
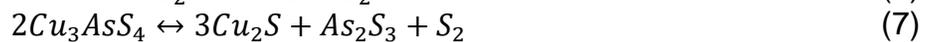
Las reacciones que se producen en el horno son exotérmicas. Los gases que se producen en el horno se generan a una alta temperatura (1280 °C a 1310 °C). La energía (calor) asociada a los gases es recuperada en la caldera junto al horno, generando vapor saturado. Además, estos gases presentan una alta concentración de anhídrido sulfuroso (SO_2) por lo que es posible y necesario su tratamiento en plantas de ácido para la producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Durante el proceso de fusión se utiliza fundente (sílice) con el objeto realizar una separación de fases entre el eje y la escoria formando una escoria del tipo fayalítica ($2FeO \cdot SiO_2$). La cantidad de fundente a utilizar dependerá de la calidad del concentrado (porcentaje de hierro en el concentrado).

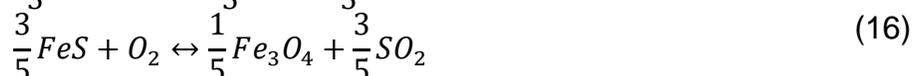
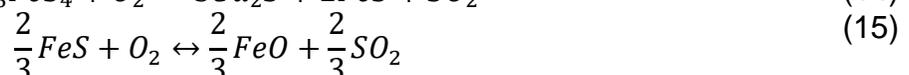
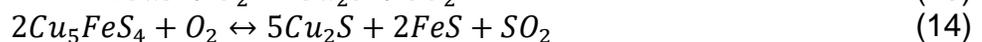
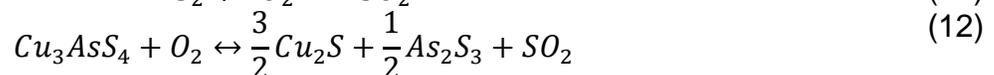
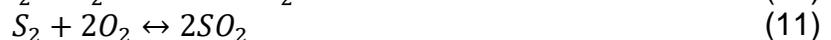
El diseño del quemador permite la utilización de altos niveles de enriquecimiento de oxígeno, lo que favorece la operación con un aumento de productividad, concentración de gases en SO_2 y en ahorro de combustible.

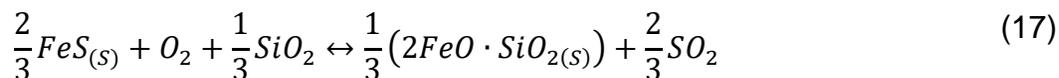
Las reacciones químicas que ocurren en el proceso de fusión de concentrado en el Horno Flash son las siguientes:

Reacciones de disociación:



Reacciones de oxidación:

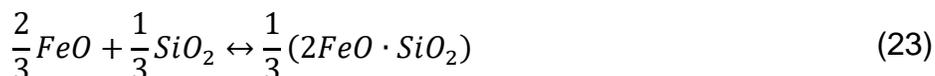




En el *settler* o sedimentador la magnetita (Fe_3O_4) generada se puede reducir de acuerdo a la siguiente reacción:



Por último, la formación de escoria fayalítica se realiza a través de la siguiente reacción:



Los elementos químicos presentes en las distintas fases que se producen en el Horno Flash son los siguientes:

- Eje: *Cu, Ni, Co, Au, Ag, Fe, As* (sulfuros de Fe y Cu).
- Escoria: *Si, Al, Ca, Mg, Mo, Fe, As*, óxidos Cu_2S arrastrado físicamente.
- Gases: con contenido de polvos de *Zn, As, Sb, Bi, S*.

Los líquidos generados en el Horno Flash son sangrados a través de canaletas y recibidos en ollas (5 placas de eje y 6 placas de escoria). El eje se transfiere a los convertidores Peirce-Smith (CPS) en ollas a través de las grúas de la nave mientras que las escorias se llevan a botadero en ollas por camiones transportadores de escoria.

Los gases generados en el horno flash se evacúan a través del *up-take* del horno y se dirigen a la caldera asociada para la recuperación del calor que traen.

Área 05: Caldera recuperadora de vapor

El área de la caldera queda comprendida desde la salida del *up-take* conectado con el marco de entrada de gases a la caldera y el ducto de gases hacia los precipitadores electrostáticos. Por el lado de la línea de vapor, desde las bombas de circulación hasta la salida del domo.

Bases de diseño

Los gases generados en el Horno Flash son enfriados, en la caldera asociada al Horno Flash, desde una temperatura de 1300 °C hasta una temperatura aproximada de 370 °C. En la caldera se recupera el calor de los gases de combustión produciendo vapor.

Los gases generados en el Horno Flash pasan a la cámara de radiación de la caldera. La sección de radiación cuenta con cinco pantallas de radiación a través de las

cuales se produce la absorción de calor de los gases. Esta zona presenta una gran área transversal por lo que la velocidad de los gases al ingresar disminuye produciéndose sedimentación de polvos.

Posteriormente los gases ingresan al área de convección donde el área transversal es menor que el área transversal de la zona de radiación. En el área de convección se encuentran presentes siete bancos de convección que retiran el calor remanente de los gases.

Tanto para las pantallas de radiación y los bancos de convección, se cuenta con martillos golpeadores que remueven los polvos que se adhieren.

El agua utilizada en la caldera, necesaria para la recuperación del calor absorbido por las pantallas de radiación y los bancos de convección, circula a través de las cañerías de alta presión impulsada por las bombas de agua de circulación.

Área 06: Manejo y limpieza de gases metalúrgicos

El alcance del área comprende desde la salida de los gases metalúrgicos de la caldera, hasta la cámara de mezcla.

Bases de diseño

Precipitadores Electrostáticos: Los gases que salen de la caldera recuperadora de calor se encuentran en un rango de temperatura de 350 °C a 400 °C. Una cantidad considerable de polvo es removida en la caldera y otra cantidad debe ser removida en precipitadores electrostáticos (PPEE) antes de dirigirse a las plantas de ácido. Los precipitadores poseen una eficiencia de 99% a capacidad máxima.

Ventiladores de Tiro Inducido (VTI): Los gases primarios totales a la salida de los precipitadores electrostáticos son manejados a través de dos VTI. Los gases primarios descargados por los VTI son conducidos hacia la cámara de mezcla para ser mezclados con los gases del CT-2 y CPS, para tratamiento en plantas de ácido.

Área 07: Manejo de polvo

El alcance del área comprende desde la colección de polvos en la caldera y en los precipitadores electrostáticos hasta la tolva tripartita. Los polvos metalúrgicos se obtienen de la limpieza de los gases provenientes de la caldera y de los precipitadores electrostáticos, los cuales son transportados neumáticamente a una tolva de polvos, y reciclados al Horno Flash para maximizar la recuperación de cobre.

8.3 Análisis de Capacidad del Proceso

Índices de capacidad potencial del proceso (C_p) [44]:

Este índice es un indicador de la capacidad potencial del proceso que resulta de dividir el ancho de las especificaciones (variación tolerada) entre la amplitud de la variación natural del proceso. El índice de capacidad del proceso se define como:

$$C_p = \frac{\text{Intervalo de tolerancia}}{\text{Variación natural}} = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

donde σ representa la desviación estándar del proceso, mientras que USL y LSL son las especificaciones superiores e inferiores, respectivamente. Como se observa, el índice C_p compara el ancho de las especificaciones o la variación tolerada para el proceso con la amplitud de la variación real de este.

Se dice que 6σ (seis veces a desviación estándar) es la variación tolerada, en que entre $\mu \pm 3\sigma$ (μ es el promedio) se encuentra el 99.7% de los valores de una variable con distribución normal.

Para que el proceso sea considerado como capaz de cumplir con las especificaciones, se requiere que la variación real (natural) siempre sea menor que la variación tolerada. La interpretación para el indicador:

- $C_p > 1$: el proceso es capaz, prácticamente todos lo que se produzca estará dentro de las tolerancias requeridas.
- $C_p = 1$: cualquier desajuste provocará que lo producido no sea aceptable o esté fuera de las tolerancias requeridas.
- $C_p < 1$: el proceso no es capaz.

Índice de la capacidad real del proceso (C_{pk}) [44]

Es un ajuste del índice C_p que toma en cuenta el centrado del proceso, incluyendo el promedio μ . Se evalúa de forma separada el cumplimiento de las especificaciones inferior y superior a través de los *índices de capacidad para la especificación superior* (C_{pu}) e *inferior* (C_{pl}). El índice de la capacidad real del proceso corresponde al menor de ellos, o sea, donde hay menor cumplimiento de alguna de las especificaciones.

$$C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} ; C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \rightarrow C_{pk} = \min(C_{pu}; C_{pl})$$

El índice C_{pk} siempre va a ser menor o igual al índice C_p . Resultados de C_{pk} :

- $C_p = C_{pk}$: proceso centrado en el punto medio de las especificaciones.
- $C_p > C_{pk}$: proceso descentrado.

8.4 Tablas de Análisis Funcional

Tabla 18. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función Principal: "Disponer del suministro..."

Función Principal	Suministros	Verbo	Objeto	Contexto	Función Básica	Suministro específico	Sub-Función
Disponer del suministro de servicios necesarios para la correcta operación con mínima variabilidad	Agua	Disponer	Requerimientos de agua	Cantidad y calidad	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de agua	Agua de refrigeración	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de agua de refrigeración
						Agua de procesos	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de agua de procesos
	Oxígeno	Disponer	Requerimientos de oxígeno	Cantidad y calidad	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de oxígeno	Oxígeno industrial	Recibir suministro de oxígeno industrial en concentración requerida en cantidad y calidad
						Oxígeno de distribución de la matriz	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de oxígeno de distribución de la matriz
	Aire	Disponer	Requerimientos de aire	Cantidad y calidad	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de aire	Aire de planta	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de aire de planta
						Aire de proceso	Disponer de los requerimientos de aire de proceso en cantidad y calidad
						Aire de transporte	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de aire de transporte
						Aire de instrumentación	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos aire de instrumentación
						Aire de combustión	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de aire de combustión
	Combustibles	Disponer	Requerimientos de combustibles	Cantidad y calidad	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de combustibles	Petróleo diésel	Disponer de los requerimientos de petróleo diésel en cantidad y calidad
						Gas natural	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de gas natural
	Energía eléctrica	Disponer	Requerimientos de energía eléctrica	Cantidad y calidad	Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de energía eléctrica	Distribución de energía eléctrica	Disponer en cantidad y calidad de los sistemas de distribución de energía eléctrica

Tabla 19. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: "Preparar carga para generar mezcla ..."

Función Principal	Actividad Operacional	Verbo	Objeto	Contexto	Función Básica	Actividad Operacional Específica	Sub-Función
Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash	Según la base de diseño se requiere la recepción de concentrado de cobre, fundente y Calcina DMH en sus tolvas respectivas, manteniendo un stock de operación y de emergencia en caso de eventualidades	Mantener	Tolvas	Stock en tolvas respectivas	Mantener stock en tolvas de materias primas y tolva de carga	Recepción de concentrado de cobre	Recepcionar concentrado de cobre seco desde secadores a tolva 29
						Recepción fundente	Recepcionar fundente desde planta de sílice y alimentar tolva 30
						Recepción de calcina DMH	Recepcionar calcinas desde División Ministro Hales y alimentar tolva 001
						Alimentación constante de carga a Horno Flash	Mantener stock de tolva 54 en nivel operacional
	Según parámetros operacionales del horno se debe alimentar "carga" en condiciones de buena homogeneidad y mezcla	Dosificar	Materias primas (concentrado y calcina) y materiales (fundente)	Consigna de proporción entre componentes para generar "carga" (representado a través de razón de calcina)	Dosificar materias primas (concentrado, calcina y fundente) según consigna de proporción entre componentes de "carga"	Dosificación de concentrado	Dosificar concentrado según flujo solicitado
						Dosificación de calcina	Dosificar calcina según flujo solicitado
						Dosificación de fundente	Dosificar fundente según flujo solicitado
	Según las bases de diseño se requiere transportar neumáticamente concentrado de cobre, fundente y Calcina DMH. La misma instalación debe ser capaz de mezclar y homogeneizar	Transportar y mezclar (dos acciones porque el sistema las realiza en conjunto)	Carga: concentrado de cobre, fundente y calcina DMH	Generación de "carga" homogénea	Transportar y mezclar materias primas dosificadas para generar "carga" homogénea	Transporte neumático de concentrado de cobre, fundente, calcina DMH y "carga"	Transportar concentrado, calcina y fundente a puntos de mezcla y "carga" hacia tolva 54
						Mezclado y homogeneizado	Realizar el mezclado y homogeneizado de los componentes
	Dosificación de "carga", almacenada en T54, en sistema LWF	Dosificar	Carga: concentrado de cobre, fundente y calcina DMH	Sistema de dosificación por pérdida de peso (<i>Loss-in Weight Feeder</i>)	Dosificar "carga" para mantener flujo constante de alimentación	Dosificación de carga en las dos líneas de dosificación	Dosificar carga proveniente de tolva 54 según consigna de alimentación en sistema LWF

Tabla 19. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: "Preparar carga para generar mezcla ..." (Continuación)

Función Principal	Actividad Operacional	Verbo	Objeto	Contexto	Función Básica	Actividad Operacional Específica	Sub-Función
Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash	Alimentación de "carga" al quemador de concentrado	Alimentar	Carga: concentrado de cobre, fundente y calcina DMH	Fluidización en sistema de cama deslizante (<i>Air Slide</i>)	Alimentar "carga" dosificada al quemador de concentrado en forma homogénea	Fluidización y alimentación en <i>Air Slide</i>	Fluidizar y alimentar homogéneamente "carga" al quemador de concentrado en sistema <i>Air Silde</i>
	Recirculación y dosificación de polvos metalúrgicos al Horno Flash	Dosificar	Polvos Metalúrgicos	Mezclar polvos metalúrgicos con "carga"	Dosificar polvos metalúrgicos para mezclar con carga	Dosificación de polvos metalúrgicos	Dosificar polvos metalúrgicos provenientes de tolva 55
						Transporte de polvos metalúrgicos	Transportar polvos metalúrgicos dosificados para mezclar con "carga"

Tabla 20. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: "Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash"

Función Principal	Actividad Operacional	Verbo	Objeto	Contexto	Función Básica	Actividad Operacional Específica	Sub-Función
Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash	Alimentación de "carga" y suministros para generar "mezcla" homogénea	Generar / mezclar	"Mezcla"	"Mezcla" homogénea entre "carga" y suministros de alimentación	Generar "mezcla" homogénea entre "carga" y suministros de alimentación: "carga"+oxígeno+aire de proceso	Alimentación de suministros según balances de masa y energía	Alimentar oxígeno, aire y combustible en las proporciones requeridas, según balances de masa y energía, al quemador de concentrado
						Mezclar y homogeneizar suministros con "carga" en QC	Mezclar y homogeneizar "carga", oxígeno y aire de proceso en quemador de concentrado ("mezcla")
	Inyección de "mezcla" a través del quemador de concentrado a torre de reacción	Inyectar	"Mezcla" homogénea	En quemador de concentrado en condiciones óptimas de inyección (flujo, velocidad y ángulo)	Inyectar "mezcla" homogénea a la torre de reacción en condiciones óptimas de alimentación (flujo, velocidad y ángulo)	Dispersión homogénea de la mezcla para reacción homogénea	Dispersar "mezcla" en la torre de reacción de forma homogénea
						Dispersión con geometría óptima para reacción homogénea	Dispersar "mezcla" en la torre de reacción con geometría óptima
	Fusión flash de la mezcla de concentrado, calcina DMH, carga fría y aire de proceso	Producir / fundir / reaccionar	Llama, fusión de la "mezcla"	Fusión de "mezcla" y reacciones de oxidación de componentes sulfurados presentes	Producir en una llama la fusión de la "mezcla" para la oxidación de los componentes presentes	Reacciones de oxidación de componentes sulfurados	Propiciar y generar reacciones de oxidación de la "mezcla" en la torre de reacción para generar componentes deseados
						Mantener balance térmico para el soporte de reacciones de oxidación	Asegurar temperatura en llama para satisfacer balance térmico

Tabla 20. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: "Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash" (Continuación)

Función Principal	Actividad Operacional	Verbo	Objeto	Contexto	Función Básica	Actividad Operacional Específica	Sub-Función
Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash	Sedimentación de las fases generadas en la torre de reacción	Sedimentar	Dos fases: eje y escoria	Fases distinguibles y homogéneas cada una de ellas	Sedimentar en dos fases los componentes generados en la fusión de la "mezcla"	Generación de las condiciones necesarias u óptimas para la sedimentación de fases	Propiciar condiciones operacionales de temperatura, concentraciones y viscosidad de fases para la sedimentación de eje-escoria
						Retirar (sangrar) eje y escoria en funciones de los niveles del horno y tiempos de sedimentación	Sangrar eje y escoria respetando el tiempo de sedimentación y niveles del horno
	Evacuación de los gases producidos de la reacción de fusión	Adecuar y evacuar	Gases provenientes de las reacciones de oxidación y gases inertes	Enviar en condiciones óptimas a caldera	Adecuar y evacuar gases hacia la caldera	Evacuación de gases	Extraer gases generados y no reaccionados
						Evitar acreciones y obstáculos físicos al libre tránsito de gases	Permitir libre tránsito de los gases a evacuar
						Eliminación del exceso de polvo en gases	Cambiar dirección y velocidad de los gases para sedimentación de polvos metalúrgicos en <i>up-take</i>
						Oxidación de polvos para buen manejo en caldera y precipitadores	Oxidar polvos metalúrgicos en <i>up-take</i>
	Propiciar condiciones operacionales óptimas para el balance térmico del Horno Flash	Mantener, propiciar	Balance de energía, balance térmico	En las tres secciones del horno: torre de reacción, <i>settler</i> y <i>up-take</i>	Mantener balance térmico en diferentes secciones del Horno Flash	Entrega de energía (quemadores de petróleo) o refrigeración de torre de reacción	Mantener en rango operacional la temperatura en torre de reacción
						Entrega de energía (quemadores de petróleo) o refrigeración de <i>settler</i>	Mantener en rango operacional la temperatura en <i>settler</i>
						Entrega de energía (quemadores de petróleo) o refrigeración de <i>up-take</i>	Mantener en rango operacional la temperatura en <i>up-take</i>

Tabla 21. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: "Enfriar gases provenientes..."

Función Principal	Actividad Operacional	Verbo	Objeto	Contexto	Función Básica	Actividad Operacional Específica	Sub-Función
Enfriar gases provenientes del Horno Flash en Caldera para adecuarlos a procesos y equipos siguientes	Enfriar gases calientes provenientes del Horno Flash a través del intercambio de calor	Intercambiar	Calor / energía	Capacidad de intercambio y rangos de temperaturas de operación	Intercambiar calor entre gases y fluido de intercambio primario	Propuesto	Propuesto
	Intercambio de calor entre fluidos de intercambio primario y secundarios	Intercambiar	Calor / energía	Capacidad de intercambio y rangos de temperaturas de operación	Intercambiar calor entre fluidos de intercambio primario y secundario	Propuesto	Propuesto
	Evacuación de calor a través de la producción de vapor	Retirar evacuar	Calor / energía	Rangos operacionales de temperatura en secciones de caldera	Evacuar calor a través de la generación de vapor	Propuesto	Propuesto

Tabla 22. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: "Limpiar gases metalúrgicos..."

Función Principal	Actividad Operacional	Verbo	Objeto	Contexto	Función Básica	Actividad Operacional Específica	Sub-Función
Limpiar gases metalúrgicos del polvo arrastrado para enviar a planta de tratamiento de gases	Oxidación de "carga" residual que no ha reaccionado	Oxidar / reaccionar	"Carga" residual	Arrastre excesivo por gases	Oxidar "carga" residual que viene arrastrada por gases	Propuesto	Propuesto
	Sulfatación de polvos a la salida de HF y entrada de caldera	Sulfatar	Polvos, "carga" residual	Adherencia excesiva a paredes de polvos no sulfatados	Sulfatar polvos para facilitar el depósito de polvos arrastrado por gases	Propuesto	Propuesto
	Depositar polvo adherido a superficies en caldera y PPEE	Depositar	Polvos	Depósito de polvo a través de gravedad y golpes en caldera y PPEE	Depositar polvos provenientes en gases	Propuesto	Propuesto

Tabla 23. Estructuración de funciones básicas y sub-funciones, función principal: "Manejar polvos metalúrgicos..."

Función Principal	Actividad Operacional	Verbo	Objeto	Contexto	Función Básica	Actividad Operacional Específica	Sub-Función
Manejar Polvos Metalúrgicos provenientes de caldera y precipitadores electrostáticos según stock necesario para alimentación	Recolección de polvos de caldera y PPEE	Recolectar	Polvos recuperados	Equipos en donde se recuperan polvos: caldera y PPEE	Recolectar polvos recuperados en los diversos equipos	Propuesto	Propuesto
	Transporte y dosificación de polvos	Transportar	Polvos recuperados	Desde equipos a tolvas y de ellas a proceso	Transportar polvos recuperados	Propuesto	Propuesto
	Almacenaje de polvos y aseguramiento de stock según requerimientos operacionales	Almacenar	Polvos recuperados	Mantener stock de polvos según requerimientos operacionales	Almacenar polvos recuperados para su alimentación o procesamiento posterior	Propuesto	Propuesto

8.5 Fichas descriptivas del Análisis Funcional

Se adjuntan las fichas descriptivas de las funciones correspondientes al diagrama de descomposición funcional. Se detallan las seis funciones principales y las funciones básicas y sub-funciones de las primeras dos funciones principales.

Tabla 24. Estándar y relevancia de cada función en relación al objetivo de análisis.

Nivel			Función	Descripción	Estándar	Relevancia
0			Garantizar el abastecimiento de eje de cobre con "mínima variabilidad en la ley de cobre"	Propósito clave	Estándar fundición: 60% – 65% ley de cobre en eje Cumplir con programa de fundición	Misión de Horno Flash y objetivo de estudio del análisis
Nivel			Función	Descripción	Estándar	Relevancia (cómo podría afectar)
1			Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash	Relacionado a Área 03	<i>Variabilidad del flujo de alimentación: pendiente</i> <i>Razón de calcina real vs SP alta: pendiente</i>	Fluctuaciones en flujo y composición de la alimentación al Horno Flash
1	1		Mantener stock en tolvas de materias primas y tolva de carga	Recepción de materias primas sólidas para stock, mezcla y alimentación de Horno Flash	Nivel de tolvas en rango no crítico. T 029: 450 – 900 ton T 030: 50 – 150 ton T 001: 100 – 500 ton T 054: 450 – 600 ton	Bajo stock puede afectar en mezclas deficientes, bajar/detener el flujo de alimentación al horno, baja tolerancia a factores externos (falla en secadores, por ejemplo)
1	1	1	Recepcionar concentrado de cobre seco desde secadores a tolva 29	Recepción de concentrado desde secadores en tolva de concentrado	Nivel de tolva en rango de operación. T 029: 450 – 900 ton	Bajo stock puede provocar mezclas deficientes, bajar/detener el flujo de alimentación al horno, baja tolerancia a factores externos (falla en secadores, por ejemplo)
1	1	2	Recepcionar fundente desde planta de sílice y alimentar tolva 30	Recepción de fundente desde planta de sílice en tolva de sílice	Nivel de tolva en rango de operación. T 030: 50 – 150 ton	Bajo stock puede provocar relación deficiente de sílice o baja en el flujo de alimentación
1	1	3	Recepcionar calcinas desde DMH y alimentar tolva 001	Recepción de calcina proveniente de DMH en tolva de calcina	Nivel de tolva en rango de operación. T 001: 100 – 500 ton	Bajo stock puede provocar mezclas deficientes, baja tolerancia a factores externos (ajuste de balance térmico por calcina)
1	1	4	Mantener stock de tolva 54 en nivel operacional	Recepción de "carga" mezclada y alimentación a dosificador de carga	Nivel de tolva en rango de operación. T 054: 450 – 600 ton	Bajo stock puede provocar bajar/detener flujo de alimentación al horno, baja tolerancia a fallas de procesos aguas arriba
1	2		Dosificar materias primas (concentrado, calcina y fundente) según consigna de proporción entre componentes de "carga"	Dosificación de concentrado, calcina y fundente según requerimiento de mezcla	Error de dosificación: pendiente (relación entre razón de calcina real c/r SP)	Dosificación deficiente provoca mezclas deficientes en cuanto a la relación de componentes, generando problemas relacionados a fusión y oxidación, problemas en balances de masa y energía
1	2	1	Dosificar concentrado según flujo solicitado	Dosificación de concentrado según requerimiento de mezcla	Error de dosificación: pendiente (relación entre flujo de concentrado real c/r SP)	Ídem

Tabla 25. Estándar y relevancia de cada función en relación al objetivo de análisis. (Continuación)

Nivel			Función	Descripción	Estándar	Relevancia (cómo podría afectar)
1	2	2	Dosificar calcina según flujo solicitado	Dosificación de calcina según requerimiento de mezcla	Error de dosificación: pendiente (relación entre flujo de concentrado real c/r SP)	Ídem
1	2	3	Dosificar fundente según flujo solicitado	Dosificación de fundente según requerimiento de mezcla	Error de dosificación: pendiente (relación entre flujo de concentrado real c/r SP)	Ídem
1	3		Transportar y mezclar materias primas dosificadas para generar "carga" homogénea	Transporte de concentrado, calcina y fundente para su mezclado y posterior transporte de "carga" a tolva 54	Capacidad de transporte mayor o igual a la de fusión (flujo promedio) Mezclas homogéneas: variabilidad de razón de calcina: pendiente	Mezcla de concentrado y calcina no homogénea (diferente a homogeneizado). Vaciado de tolva 54, con la consiguiente baja/parada de flujo de alimentación
1	3	1	Transportar concentrado, calcina y fundente a puntos de mezcla y "carga" hacia tolva 54	Transporte de concentrado, calcina y fundente desde tolvas respectivas a puntos de mezcla y de "carga" hacia tolva 54 en líneas de transporte neumático.	Capacidad de transporte según diseño (concentrado: 120 t/h, calcina: 100 t/h, sílice: 10 t/h y carga (co+ca+si): 220 t/h) mantener "carga" transportada en fase densa (densidad o relación entre sólido y gas).	Problemas en transporte neumático puede generar desde mezclas no homogéneas y vaciado de tolva 54, hasta disminución en la tasa de alimentación al horno o intermitencias en la operación
1	3	2	Realizar el mezclado y homogeneizado de los componentes	Se realiza el mezclado y homogeneizado en puntos de mezcla, un buen homogeneizado depende del flujo, densidad, velocidad, etc.	Mezclado: pendiente Homogeneizado: pendiente	Puede generar mezclas no homogéneas con la consiguiente oxidación deficiente de la mezcla.
1	4		Dosificar "carga" para mantener flujo constante de alimentación	Dosificación de carga en sistema de dosificación por pérdida de peso (LWF)	Variabilidad del flujo de carga mínima: pendiente	Dosificación variable genera coeficiente de oxígeno real diferente al de consigna y reacciones de oxidación deficientes
1	4	1	Dosificar "carga" proveniente de tolva 54 según consigna de alimentación en sistema LWF	"Carga" proveniente de tolva 54 y dosificada en sistema lwf para ser recibida en <i>air slide</i>	Dispersión en la dosificación: 80% para error de 2%, 85% para error de 3%	Ídem
1	5		Alimentar "carga" dosificada al quemador de concentrado en forma homogénea	"Carga" dosificada es fluidizada en sistema de cama deslizante (<i>air slide</i>) para alimentación homogénea a QC	Alimentación de carga equitativa en las 4 secciones de entrada en QC	Alimentación no homogénea puede generar combustión deficiente en llama no homogénea, problemas en balances de masa y energía
1	5	1	Fluidizar y alimentar homogéneamente carga seca al quemador de concentrado en sistema <i>air slide</i>	Fluidización de carga y alimentación a QC	Densidad por diseño para fluidización y alimentación equitativa.	Fluidización deficiente puede generar distribución de carga no equitativa a la entrada del QC
1	6		Dosificar polvos metalúrgicos para mezclar con "carga"	Alimentación de polvos provenientes de tolva 55 a <i>air slide</i>	Tasa de alimentación normal: 1 a 3 ton/h en operación normal Variabilidad de alim.: pendiente	Problemas con balances de masa y energía al ser altamente oxidantes
1	6	1	Dosificar polvos metalúrgicos provenientes de tolva 55	Dosificación en tornillos posteriores en tolva 55	Tasa de alimentación normal: 1 a 3 ton/h en operación normal	Ídem
1	6	2	Transportar polvos metalúrgicos dosificados para mezclar con "carga"	Transporte neumático de polvos dosificados	-	Ídem

Tabla 25. Estándar y relevancia de cada función en relación al objetivo de análisis. (Continuación)

Nivel			Función	Descripción	Estándar	Relevancia (cómo podría afectar)
2			Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash	Relacionado a Área 04	Estándar fundición: 60% – 65% ley de cobre en eje Estándar operacional: - Concentrados exotérmicos generan eje en torno a 60% de cobre, concentrados menos exotérmicos se sitúan en torno 65%. - Por turno/día máx. 2% dispersión	Deficiencias en el proceso de fusión de concentrado puede generar directamente desviaciones en las características del producto (eje).
2	1		Generar "mezcla" homogénea entre "carga" y suministros de alimentación: "carga" + oxígeno + aire de proceso	La "mezcla" entre "carga", oxígeno y aire de proceso debe ser una mezcla homogénea.	Error acumulado de coeficiente de oxígeno: pendiente	Mezclas no homogéneas generan problemas a nivel de la combustión, la eficiencia de reacciones puede disminuir.
2	1	1	Alimentar oxígeno, aire y combustible en las proporciones requeridas, según balances de masa y energía, al quemador de concentrado	La alimentación de oxígeno, aire y combustible se realiza en el QC y es aquí en donde se mezcla con la "carga"	Error acumulado de coeficiente de oxígeno: pendiente	Ídem
2	1	2	Mezclar y homogeneizar "carga", oxígeno y aire de proceso en quemador de concentrado ("mezcla")	La "mezcla" entre "carga", oxígeno y aire de proceso debe ser una mezcla homogénea.	Variabilidad de coeficiente de oxígeno: pendiente	Ídem
2	2		Inyectar "mezcla" homogénea a la torre de reacción en condiciones óptimas de alimentación (flujo, velocidad y ángulo)	La "mezcla" se inyecta en la torre de reacción por la boquilla del QC en forma homogénea y con geometría determinada	Homogeneidad en toda la periferia de inyección	No homogeneidad de inyección puede provocar combustión parcial y calentamiento desigual de torre de reacción
2	2	1	Dispersar "mezcla" en la torre de reacción de forma homogénea	Dispersar mezcla anularmente homogénea	Homogeneidad en toda la periferia de inyección (hay tres medidores de presión equidistantes)	Ídem
2	2	2	Dispersar "mezcla" en la Torre de Reacción con geometría óptima	Ángulo de inyección y flujo de "mezcla" se relacionan y determinan la forma de la llama en la torre de reacción	Curva de velocidad y ángulo de inyección del QC	Calentamiento desigual de torre de reacción y eficiencia deficiente de reacciones
2	3		Producir en una llama la fusión de la "mezcla" para la oxidación de los componentes presentes	Reacciones de oxidación se producen en la torre de reacción en una "llama flash"	Eficiencia del uso de oxígeno: pendiente	Combustión deficiente de la "mezcla" provoca baja eficiencia de las reacciones involucradas
2	3	1	Propiciar y generar reacciones de oxidación de la "mezcla" en la torre de reacción para generar componentes deseados	Las reacciones de oxidación dependen de variables en la cámara de reacción como: temperatura, presión, volumen, etc.	Eficiencia del uso de oxígeno: pendiente	Ídem
2	3	2	Asegurar temperatura en llama para satisfacer balance térmico	La torre de reacción se refrigera por dos sistemas de enfriamiento para preservar un rango de temp.	Temperatura de llama en rango operacional: pendiente	Baja combustión al no satisfacer el balance térmico (balance de energía)

Tabla 25. Estándar y relevancia de cada función en relación al objetivo de análisis. (Continuación)

Nivel			Función	Descripción	Estándar	Relevancia (cómo podría afectar)
2	4		Sedimentar en dos fases los componentes generados en la fusión de la "mezcla"	La sedimentación de fases se produce en el <i>settler</i> en donde se obtienen dos fases: eje y escoria	% de C. u en eje: % de ollas en estándar: pendiente % de Cu en escoria: % de ollas en estándar: pendiente	Baja separación entre fases, generando bajo contenido de cobre en eje y alto en escoria
2	4	1	Propiciar condiciones operacionales de temperatura, concentraciones y viscosidad de fases para la sedimentación de eje-escoria	Condiciones de temperatura, concentraciones y viscosidad por fases se requieren para una óptima sedimentación	Pendiente	Ídem
2	4	2	Sangrar eje y escoria respetando el tiempo de sedimentación y niveles del horno	Sangrado de eje y escoria se realiza a través de canaletas y de forma discontinua	Nivel de eje: rango operacional Nivel escoria: rango operacional	Ídem
2	5		Adecuar y evacuar gases hacia la caldera	Los gases generados en reacciones de oxidación y gases no reaccionados	Flujo volumétrico de gases en estándar: pendiente Presión interior de Horno Flash en estándar: pendiente	Fugas o infiltración del exterior y desviaciones de temperatura y concentración en gases, en caso que no sea controlable se detiene operación. Alto arrastre de polvos.
2	5	1	Extraer gases generados y no reaccionados	Los gases son succionados producto de una presión negativa interna	Presión interior de Horno Flash en estándar: pendiente	Flujo alto puede causar abrasión excesiva
2	5	2	Permitir libre tránsito de los gases a evacuar	Existe formación de acreciones y aumento de nivel de fluidos	Pendiente	Variaciones de presión interior, fugas y/o infiltraciones
2	5	3	Cambiar dirección y velocidad de los gases para sedimentación de polvos metalúrgicos en <i>up-take</i>	Sedimentación de "carga" arrastrada sin reaccionar en <i>up-take</i>	Flujo volumétrico de gases en estándar: pendiente	Alto arrastre de polvos
2	5	4	Oxidar polvos metalúrgicos en <i>up-take</i>	Adecuación de polvos metalúrgicos: reacción de "carga" no reaccionada y sulfatación de polvos	Flujo de gases vs flujo de oxígeno en estándar: pendiente	Baja sulfatación puede generar problemas en recuperación de polvos con la consiguiente parada del proceso
2	6		Mantener balance térmico en diferentes secciones del Horno Flash	Las unidades de calentamiento y de enfriamiento permiten mantener equilibrio térmico en horno	Temperaturas de secciones en estándar: pendiente	Altas o bajas temperaturas generan desviaciones del equilibrio buscado para una producción óptima
2	6	1	Mantener en rango operacional la temperatura en torre de reacción	Ídem	Temperatura en torre de reacción en estándar: pendiente	Afectar balance de energía y eficiencia de reacciones
2	6	2	Mantener en rango operacional la temperatura en <i>settler</i>	Ídem	Temperatura en <i>settler</i> en estándar: pendiente	Afectar equilibrio de fases y sedimentación, principalmente en fluidez de fases
2	6	3	Mantener en rango operacional la temperatura en <i>up-take</i>	Ídem	Temperatura en <i>up-take</i> en estándar: pendiente	Alta temperatura de gases Baja sulfatación de polvos

Tabla 25. Estándar y relevancia de cada función en relación al objetivo de análisis. (Continuación)

Nivel			Función	Descripción	Estándar	Relevancia (cómo podría afectar)
3			Enfriar gases provenientes del Horno Flash en caldera para adecuarlos a procesos y equipos siguientes	Relacionado a Área 05	Temperatura de salida de caldera menor a 400°C. Temperatura de entrada zona de convección menor a 580°C	Presión y temperatura de los gases son variables relacionadas a estados de equilibrio en el horno.
Nivel			Función	Descripción	Estándar	Relevancia (cómo podría afectar)
4			Disponer del suministro de servicios necesarios para la correcta operación con mínima variabilidad	Relacionado a Área 00	Estándar función: en cantidad y calidad del servicio requerido (en manual de operación Horno Flash)	Suministros como oxígeno y aire se relacionan directamente con coeficiente de oxígeno y enriquecimiento.
4	2		Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de oxígeno	Requerimientos de oxígeno para satisfacer enriquecimiento de oxígeno y coeficiente de oxígeno	Oxígeno requerido en 95% de pureza.	Relacionado con coeficiente de oxígeno y enriquecimiento.
4	3		Disponer en cantidad y calidad de los requerimientos de aire	Requerimientos de aire para satisfacer coeficiente de oxígeno	Presión de operación en aire de transporte 20psig e instrumentación 116 psig.	Relacionado con coeficiente de oxígeno y enriquecimiento y operacionalmente con el transporte y funcionamiento de equipos.
Nivel			Función	Descripción	Estándar	Relevancia (cómo podría afectar)
5			Limpiar gases metalúrgicos del polvo arrastrado para enviar a planta de tratamiento de gases	Relacionado a Área 06	Generación de polvos menor a 7%.	Problemas aguas abajo puede generar paradas o intermitencias de operación.
Nivel			Función	Descripción	Estándar	Relevancia (cómo podría afectar)
6			Manejar polvos metalúrgicos, provenientes de caldera y precipitadores electrostáticos, según stock necesario para alimentación	Relacionado a Área 07	Mantener stock en tolva 55 según estándar	Recirculación de polvos se relaciona con balance de energía principalmente.

8.6 Tablas de análisis de la priorización de funciones

FUNCIÓN PRINCIPAL

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
1 Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash	Falta total de la función	- Detención Horno Flash	- Falla de sistemas de mezcla y transporte de carga	2	5	1	10
	Menos de lo requerido	- Pérdida de capacidad de producción - Menor calidad eje	- Disponibilidad de sistemas deficiente	4	3	3	36
	Más de lo requerido	-	-	-	-	-	-
	Calidad deficiente	- Calidad de eje deficiente - Difícil control operacional	- Gestión de carga deficiente - Fallas de sistemas y equipos	5	3	3	45
Suma							91

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
2 Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash	Falta total de la función	- Nula producción de eje - Detención Horno Flash o anexos	- Falla Horno Flash y/o sistemas	2	5	1	10
	Menos de lo requerido	- Pérdida de capacidad - Menor calidad de eje	- Falla de sistemas - Alimentación deficiente	2	3	2	12
	Más de lo requerido	-	-	-	-	-	-
	Calidad deficiente	- Menor calidad de eje - Baja capacidad de control - Fallas de sistemas	- Falta de mantenimiento - Operación deficiente	3	3	2	18
Suma							40

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
3 Enfriar Gases provenientes del Horno Flash en Caldera para adecuarlos a procesos y equipos siguientes	Falta total de la función	- Detención Horno Flash	- Falla de equipos y/o sistemas en caldera	2	5	1	10
	Menos de lo requerido	- Disminución de la capacidad de fusión	- Falla en caldera, generación de vapor o tren de gases	2	3	2	12
	Más de lo requerido	-	-	-	-	-	-
	Calidad deficiente	- Disminución de capacidad de fusión - Falla de equipos	- Falla de sistemas en caldera o generación de vapor	2	3	2	12
Suma							34

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
4 Disponer del suministro de servicios necesarios para la correcta operación con mínima variabilidad	Falta total de la función	- Detención Horno Flash - Disminución de capacidad	- Falla de equipos asociados - Falla planta de oxígeno, termoeléctrica, electricidad	1	5	1	5
	Menos de lo requerido	- Pérdida de cap. de fusión - Pérdida en calidad productos según estándares	- Falla de equipos asociados - Sobreconsumo conjunto	2	2	1	4
	Más de lo requerido	- Falla de equipos por sobrecarga - Pérdida de material (eliminación excedente)	- Falla de equipos asociados o sistemas de control - Sobreconsumo conjunto	2	1	1	2
	Calidad deficiente	- Mal funcionamiento - Pérdida calidad de producto	- Falla de equipos - Sobreconsumo conjunto	2	2	1	4

Suma 15

		FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR	
5 Limpiar gases metalúrgicos del polvo arrastrado para enviar a planta de tratamiento de gases	Falta total de la función	- Detención Horno Flash	- Falta de sistemas	1	3	1	3	
	Menos de lo requerido	- Disminución de capacidad - Fallas en el proceso	- Calidad de los gases de proceso - Fallas en el proceso	2	2	1	4	
	Más de lo requerido	-	-	-	-	-	-	
	Calidad deficiente	- Pérdida de capacidad - Falta en sistemas de Horno Flash	- Calidad de gases de proceso - Fallas en sistemas y control	2	2	2	8	

Suma 15

		FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR	
6 Manejar polvos metalúrgicos, provenientes de caldera y precipitadores electrostáticos, según stock necesario para alimentación	Falta total de la función	- Disminución de capacidad de fusión	- Fallas sistemas	1	3	1	3	
	Menos de lo requerido	- Disminución de capacidad de fusión - Problemas en alimentación	- Fallas sistemas	1	2	2	4	
	Más de lo requerido	-	-	-	-	-	-	
	Calidad deficiente	- Disminución capacidad de fusión - Problemas en alimentación - Fallas de equipos	- Fallas sistemas	1	2	2	4	

Suma 11

Priorización Funciones Básicas:

- 1) Función principal: "Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash"

FUNCIÓN BÁSICA

		FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR	
1.1 Dosificar materias primas (concentrado, calcina y fundente) según consigna de proporción entre componentes de "carga"	Falta total de la función	- Dosificación nula de conc, calc o sílice - Detención del proceso	- Fallas de equipos o sistemas en sistema Clyde - Carac, de materias primas	1	5	1	5	
	Menos de lo requerido	- Desviación de razón de calcina real - Reacciones de oxidación deficientes	- Fallas de equipos o sistemas en sistema Clyde - Carac. de materias primas	4	3	2	24	
	Más de lo requerido	- Ídem a menos de lo requerido	- Ídem a Menos de lo requerido	4	3	2	24	
	Calidad deficiente	- Variabilidad en razón de calcina - Reacciones de oxidación deficientes	- Mal funcionamiento de equipos en sistema Clyde	4	3	3	36	

Suma 89

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFEKTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
1.2 Dosificar "carga" para mantener flujo constante de alimentación	Falta total de la función	- Detención del proceso	- Falta de equipos LWF, tornillos	1	5	1	5
	Menos de lo requerido	- Menor tasa de procesamiento - Sobrecarga de una línea LWF	- Funcionamiento deficiente LWF - Caída de una línea de LWF	2	3	2	12
	Más de lo requerido	- Baja eficiencia de reacciones de oxidación	- Deficiencia en control LWF - Calibración equipos	2	3	3	18
	Calidad deficiente	- Baja eficiencia reacciones de oxidación - Desgaste tornillo	- Inestabilidad sistema LWF - Características "carga"	3	3	3	27
Suma				62			

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFEKTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
1.3 Mantener stock en tolvas de materias primas y tolva de carga	Falta total de la función	- Baja o nula disponibilidad a procesos siguientes - Detención del proceso	- Fallas de equipos, tolvas o sistemas - Falta de secadores	1	5	2	10
	Menos de lo requerido	- Baja disponibilidad a procesos siguientes - Baja tasa de procesamiento	- Fallas de equipos - Gestión deficiente de suministros y carga	2	3	3	18
	Más de lo requerido	- Rebalse tolvas - Pérdida de material	- Gestión deficiente de suministros y carga - Supervisión deficiente de niveles	1	5	1	5
	Calidad deficiente	- Baja tasa de procesamiento - Detención del proceso	- Calibración de equipos - Gestión de carga	2	2	3	12
Suma				45			

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFEKTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
1.4 Dosificar polvos metalúrgicos para mezclar con carga	Falta total de la función	- Baja o nula disponibilidad a procesos siguientes - Disminución o detención del proceso	- Fallas de equipos, tolvas o sistemas - Stock nulo de polvos en tolva 55	1	3	1	3
	Menos de lo requerido	- Baja disponibilidad a procesos siguientes - Baja tasa de procesamiento	- Fallas de equipos - Gestión de carga	2	2	3	12
	Más de lo requerido	- Problemas en balance térmico	- Gestión de carga - Calibración de equipos	1	2	1	2
	Calidad deficiente	- Baja tasa de procesamiento - Eficiencia deficiente en reacciones de oxidación	- Calibración de equipos	2	3	3	18
Suma				35			

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFEKTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
1.5 Transportar y mezclar materias primas dosificadas para generar "carga" homogénea	Falta total de la función	- Detención del proceso	- Falta en equipos transporte neumático	1	5	1	5
	Menos de lo requerido	- Eventual vaciado de tolva 54 - Alta variabilidad en razón de calcina	- Falta en equipos transporte - Fugas en tuberías - Manipulación de equipos - Caract. materias primas	3	3	1	9
	Más de lo requerido	- Alta variabilidad en Razón de calcina	- Deficiencia en control del proceso - Manipulación de equipos	1	1	1	1

	Calidad deficiente	- Alta variabilidad en Razón de calcina	- Calibración deficiente de equipos - Fallas de equipos transporte - Caract. materias primas	3	2	3	18	
	Suma						33	
	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES				
	OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
1.6	Alimentar "carga" dosificada al quemador de concentrado en forma homogénea	Falta total de la función	- Detención del proceso	- Falla de equipos Air Slide	1	5	1	5
		Menos de lo requerido	- Baja tasa de procesamiento - Eficiencia deficiente en reacciones de oxidación - Parada del proceso	- Funcionamiento deficiente de <i>air slide</i> - Flujo de aire de fluidización bajo	1	2	2	4
		Más de lo requerido	- Eficiencia deficiente en reacciones de oxidación	- Calibración deficiente de equipos <i>air slide</i>	1	3	2	6
		Calidad deficiente	- Eficiencia deficiente en reacciones de oxidación	- Calibración de equipos - Fallas en equipos y sistemas	1	3	2	6
	Suma						21	

Función principal: "Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash"

	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES				
	OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
2.1	Sedimentar en dos fases los componentes generados en la fusión de la "Mezcla"	Falta total de la función	- No hay separación de fases - Detención del proceso	- Concentraciones inadecuadas en eje y/o escoria - Efectos físicos (pisos falsos)	1	5	1	5
		Menos de lo requerido	- Escoria con alta ley de cobre - Reproceso de escoria	- Condiciones de operación inadecuadas - Problemas en bahía de decantación	3	2	3	18
		Más de lo requerido	- Decantación de sólidos o presencia de cobre blíster	- Condiciones operacionales incorrectas (% sílice, magnetita, temperatura)	2	2	3	12
		Calidad deficiente	- Decantación y separación desigual	- Embanques - Diferencias de temperatura	3	2	3	18
	Suma						53	

	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES				
	OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
2.2	Producir en una llama la fusión de la "mezcla" para la oxidación de los componentes presentes	Falta total de la función	- No se produce reacción - Detención del proceso	- Problema de alimentación - Problema en arranque	1	5	1	5
		Menos de lo requerido	- Baja eficiencia de reacciones - Baja tasa de fusión	- Problema de alimentación - Condiciones de operación de torre de reacción deficientes	2	3	2	12
		Más de lo requerido	- Sobrecalentamiento - Impactos en producto y subproductos	- Temperatura alta - Coeficiente de oxígeno inadecuado	1	3	2	6
		Calidad deficiente	- Baja calidad eje	- Problema de alimentación - Problema en QC	3	3	3	27
	Suma						50	

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
2.3 Inyectar "mezcla" homogénea a la torre de reacción en condiciones óptimas de alimentación (flujo, velocidad y ángulo)	Falta total de la función	- Detención del proceso	- Falla de QC o sistemas	1	5	1	5
	Menos de lo requerido	- Baja tasa de procesamiento	- Mal funcionamiento QC (obstrucción)	1	3	3	9
	Más de lo requerido	- Embanques Horno Flash - Baja eficiencia de reacciones	- Mala calibración QC - Problema con sistema de control	1	3	3	9
	Calidad deficiente	- Producto deficiente en calidad - Menor tasa de producción	- Problemas con sist. control - Balance energía. deficiente - Problemas con alimentación	3	3	3	27
Suma							50

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
2.4 Adecuar y evacuar gases hacia la caldera	Falta total de la función	- Detención del proceso	- No hay succión interior - Nivel de horno alto - Acreciones	1	5	1	5
	Menos de lo requerido	- Ineficiencia en fusión - Menor tasa de procesamiento	- Problemas de succión - Acreciones	1	4	2	8
	Más de lo requerido	- Filtración aire exterior al Horno Flash - Gases fugitivos	- Succión excesiva - Filtraciones en Horno Flash	1	3	2	6
	Calidad deficiente	- Variaciones en presión - Variación flujo y composición de gases a tratamiento	- Mal funcionamiento ventiladores tiro forzado - Acreciones	2	3	2	12
Suma							31

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
2.5 Generar "mezcla" homogénea entre "carga" y suministros de alimentación: "carga" + oxígeno + aire de proceso	Falta total de la función	- Baja o nula eficiencia de reacciones - "Morros" en horno	- Acreciones en inyector - No homogeneidad de alimentación	1	4	1	4
	Menos de lo requerido	- Baja eficiencia de reacciones - Dismin. de temperatura	- Alimentación no homogénea deficiente - Perforaciones QC	2	3	2	12
	Más de lo requerido	-	-	0	0	0	0
	Calidad deficiente	- Eficiencia de reacciones dispersa	- Falla o descalibración sistema de control - Alta variabilidad suministros	2	2	3	12
Suma							28

OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLOS POTENCIALES			ÍNDICES			
	MODOS DE FALLO	EFFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
2.6 Mantener balance térmico en diferentes secciones del Horno Flash	Falta total de la función	- Baja o nula eficiencia de reacciones	- Falla sistema de combustible o refrigeración	1	3	2	6
	Menos de lo requerido	- Baja eficiencia de reacciones - Menor ley de eje	- Falla sistema de control - Problema con balance energético	2	2	2	8
	Más de lo requerido	- Sobrecalentamiento Horno Flash	- Falla sistema de control - Problema con balance energético	1	2	2	4
	Calidad deficiente	- Calidad de eje deficiente	- Falla sistema de control - Problema suministros	2	2	2	8
Suma							26

8.7 Diagramas de Incidencia

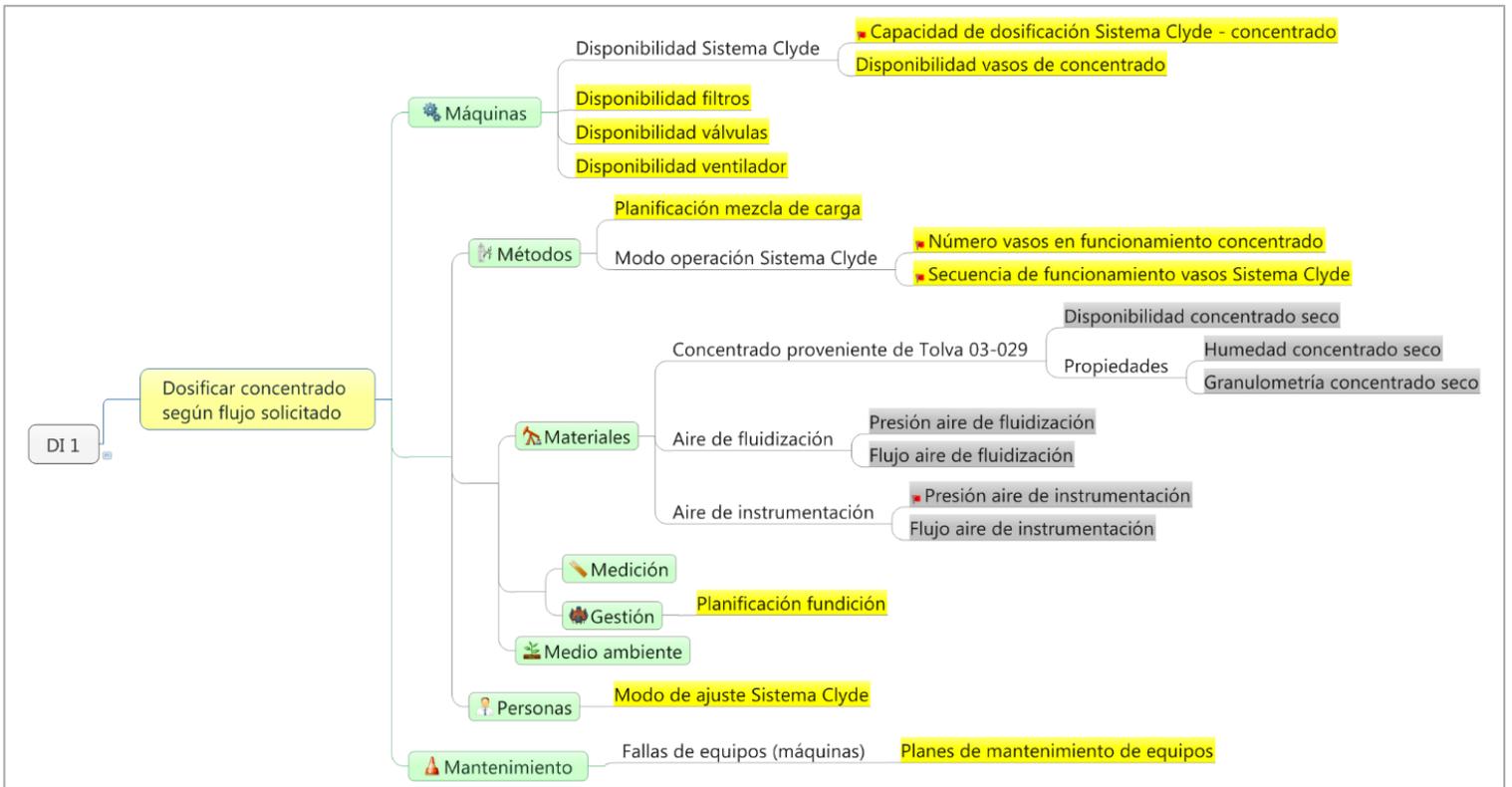


Figura 40. Diagrama de Incidencia 1.

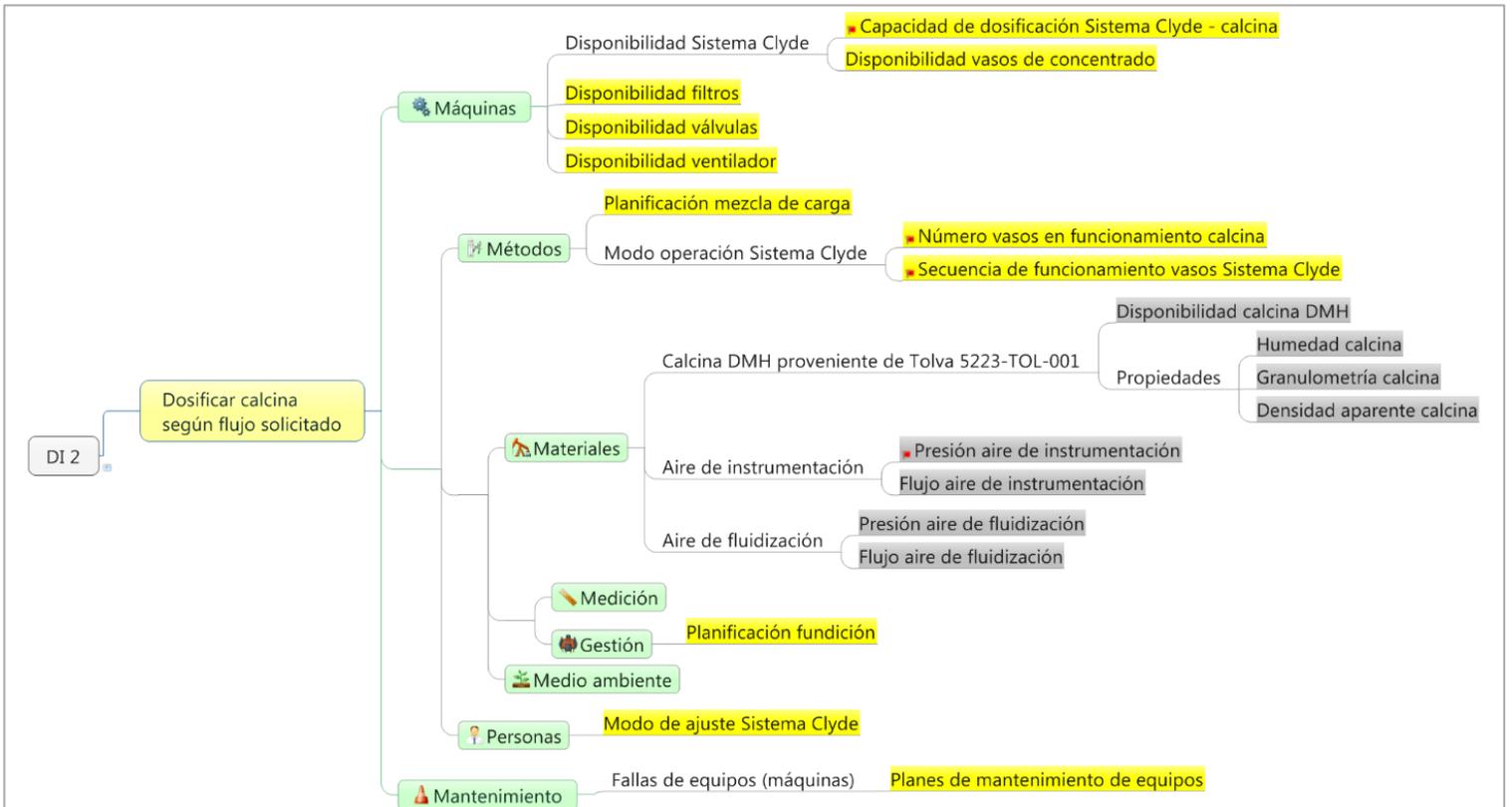


Figura 41. Diagrama de Incidencia 2.

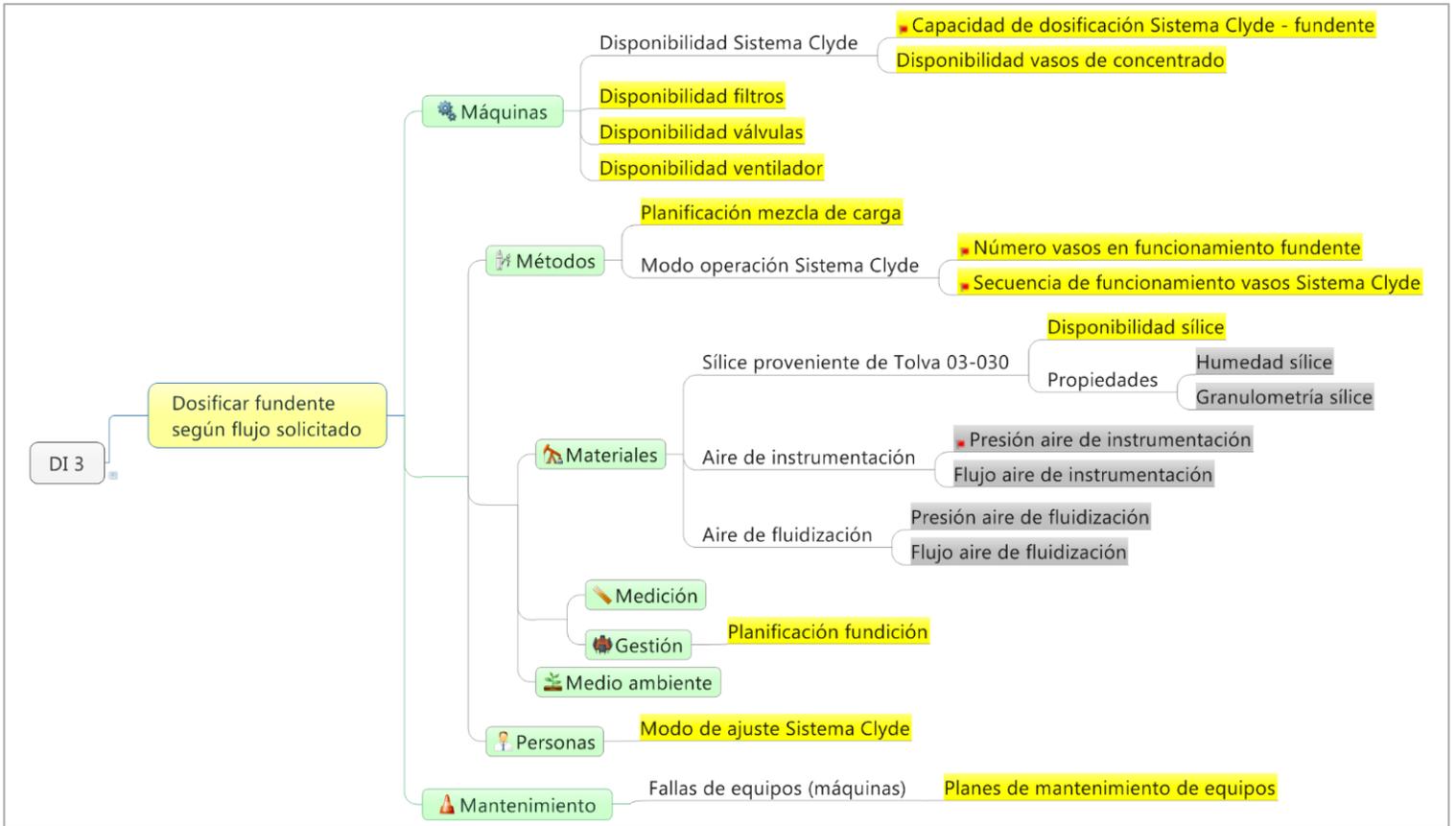


Figura 42. Diagrama de Incidencia 3.

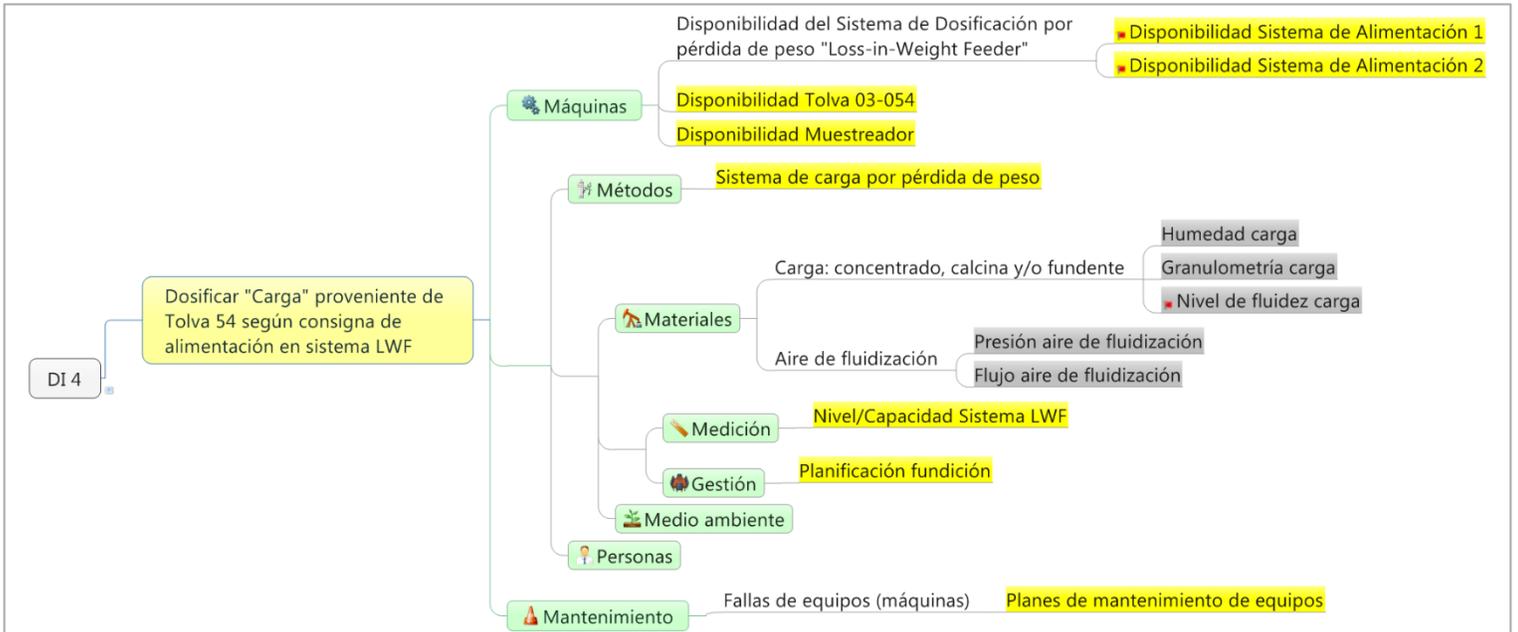


Figura 43. Diagrama de Incidencia 4.

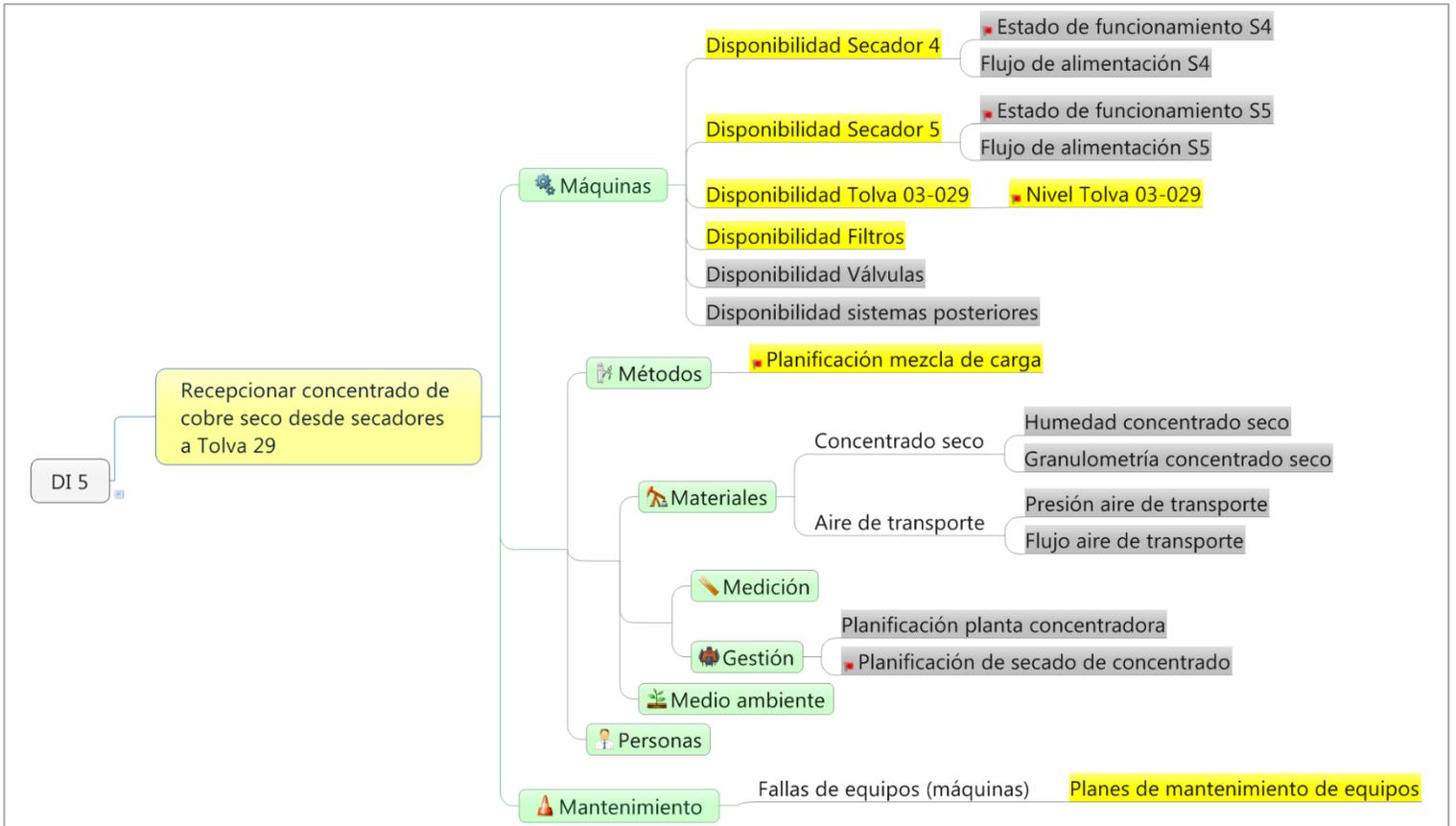


Figura 44. Diagrama de Incidencia 5.

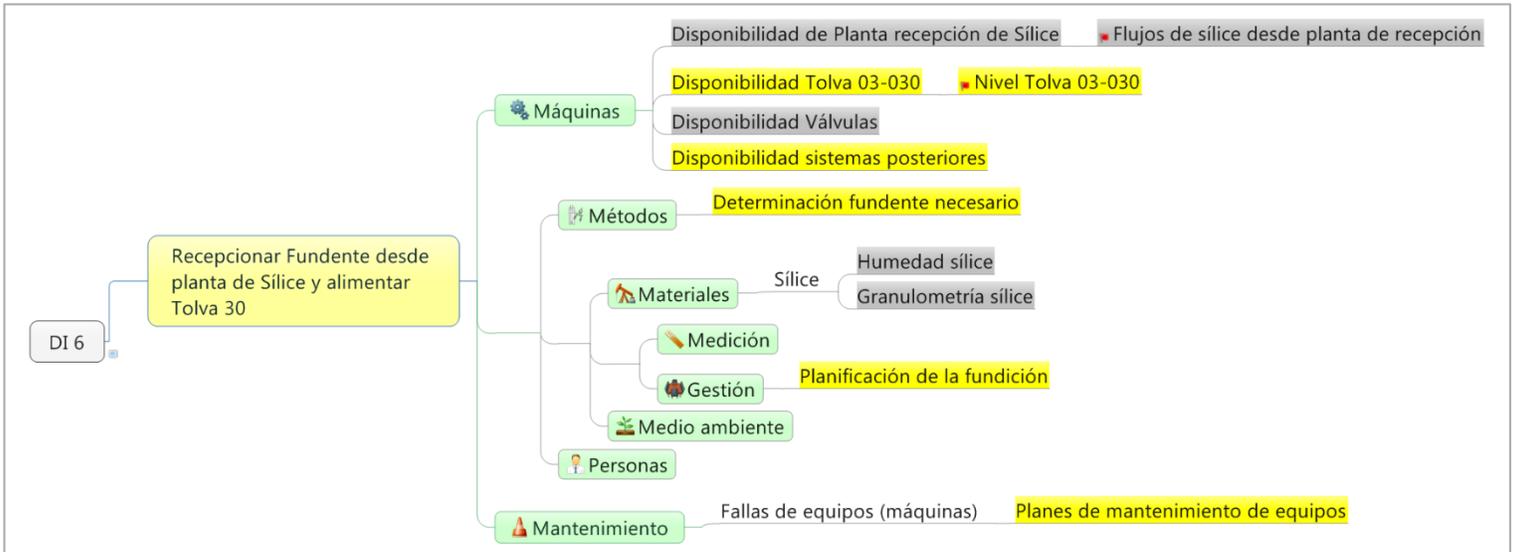


Figura 46. Diagrama de Incidencia 6.

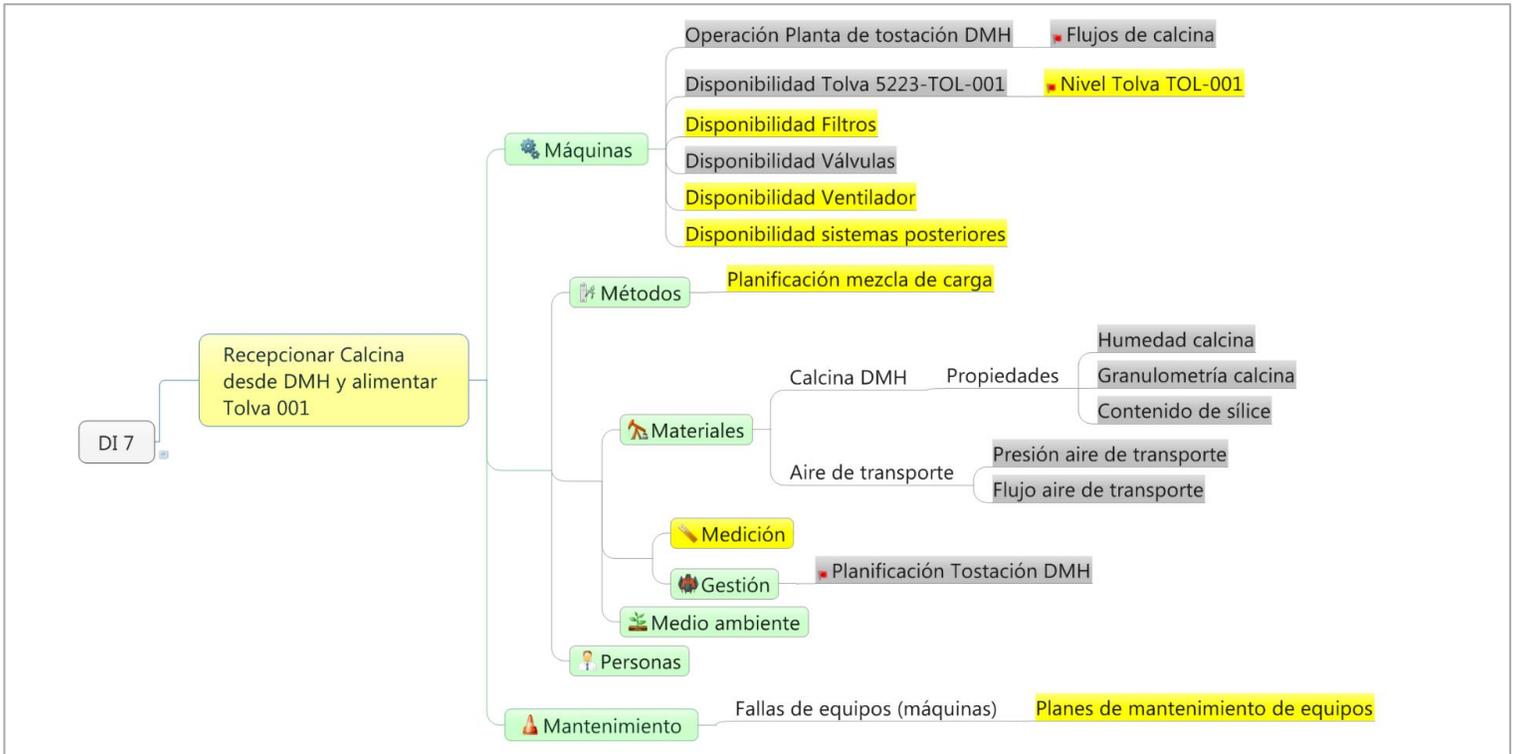


Figura 47. Diagrama de Incidencia 7.

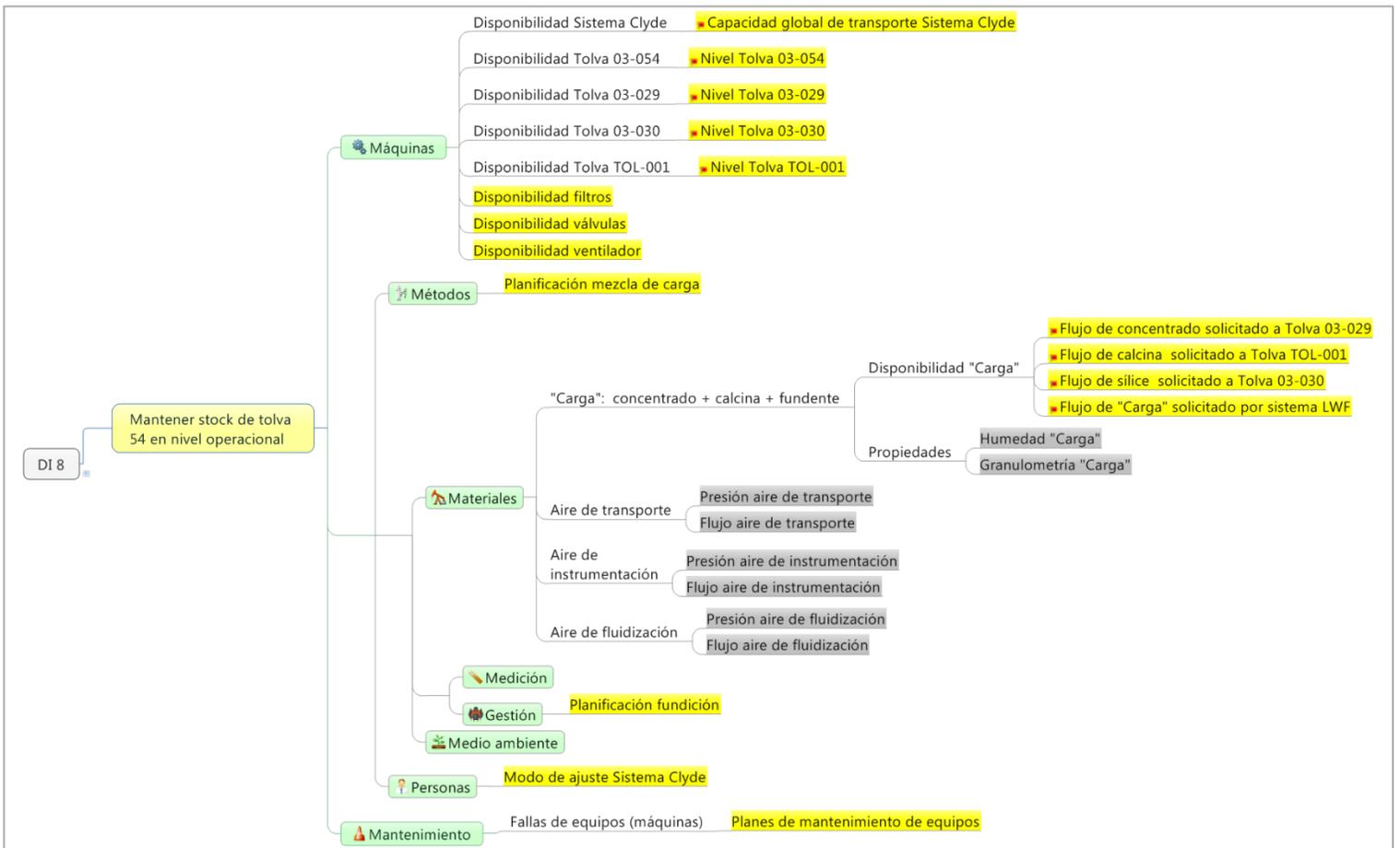


Figura 48. Diagrama de Incidencia 8.

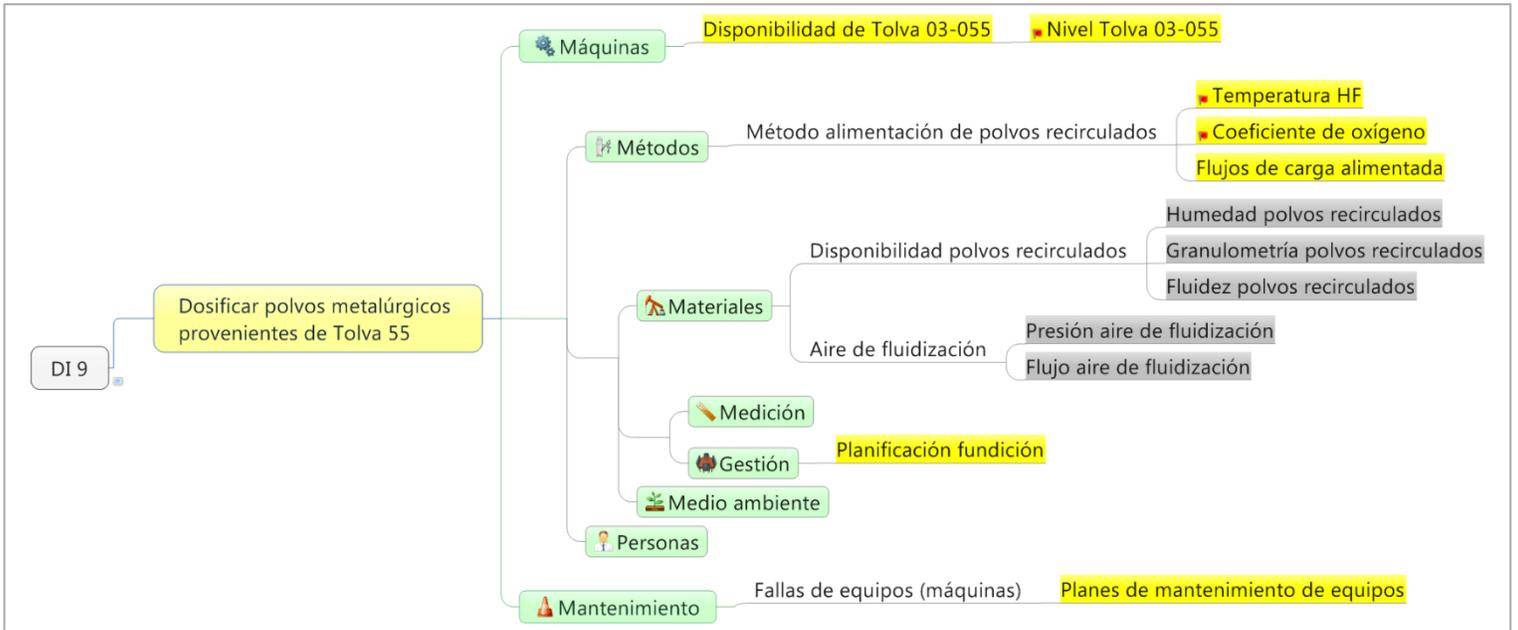


Figura 49. Diagrama de Incidencia 9.

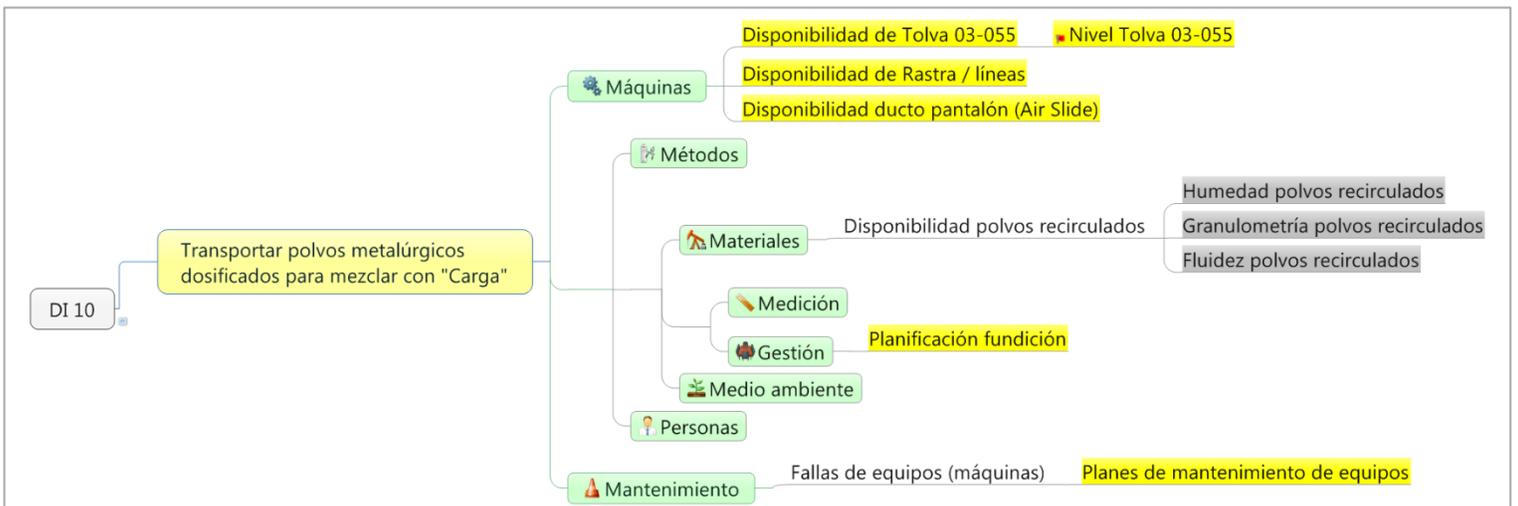


Figura 50. Diagrama de Incidencia 10.

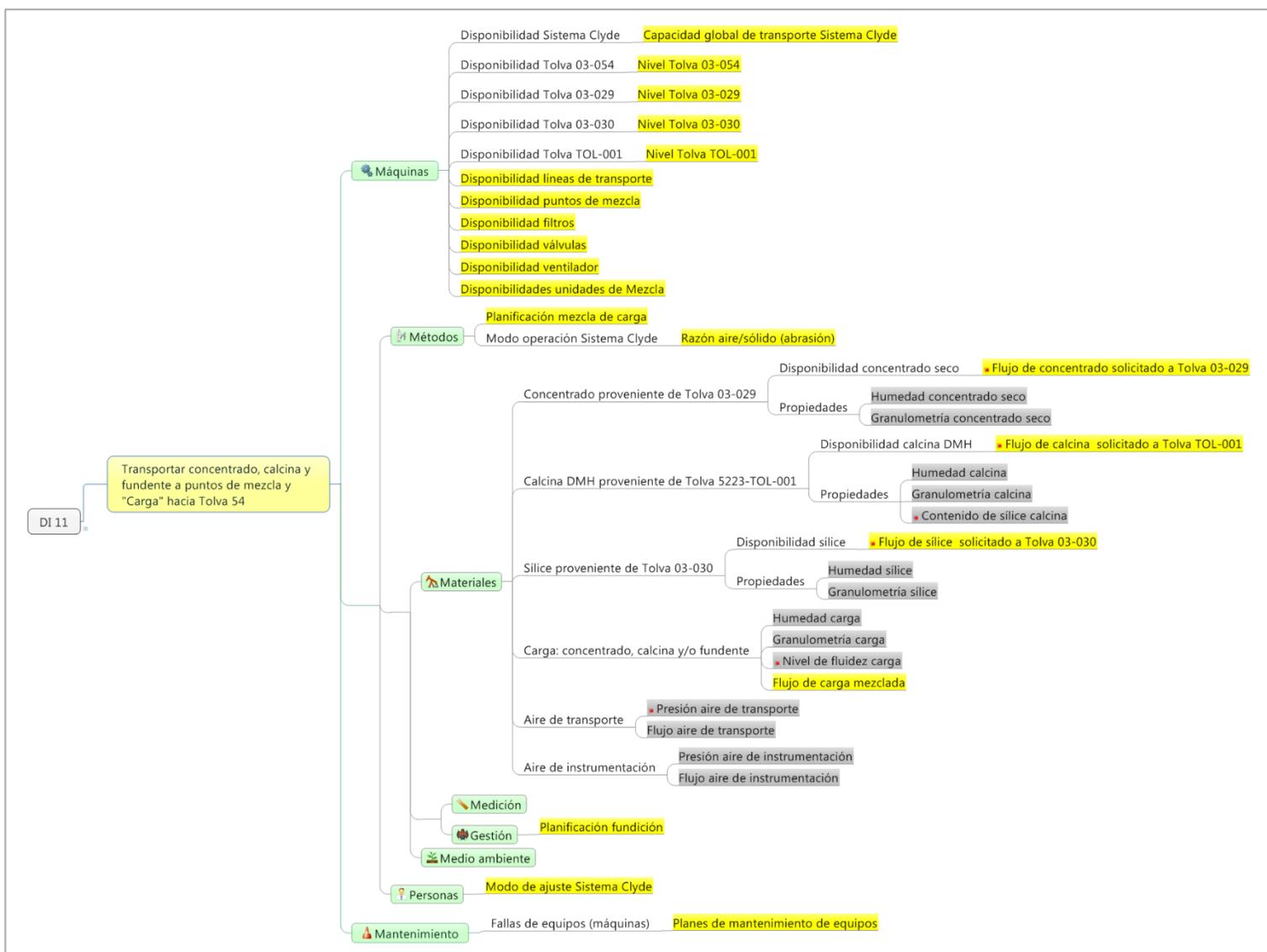


Figura 51. Diagrama de Incidencia 11.

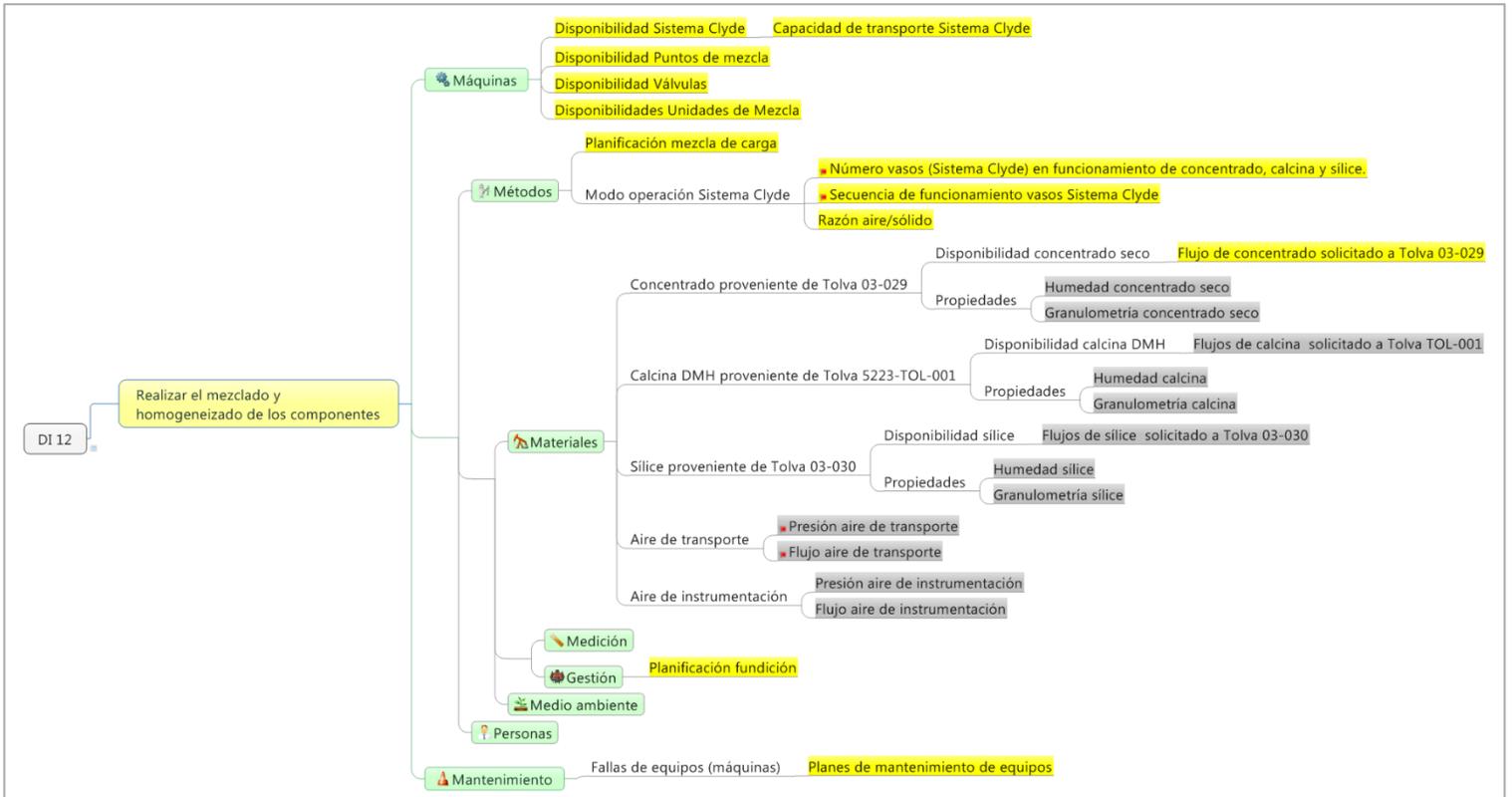


Figura 52. Diagrama de Incidencia 12.

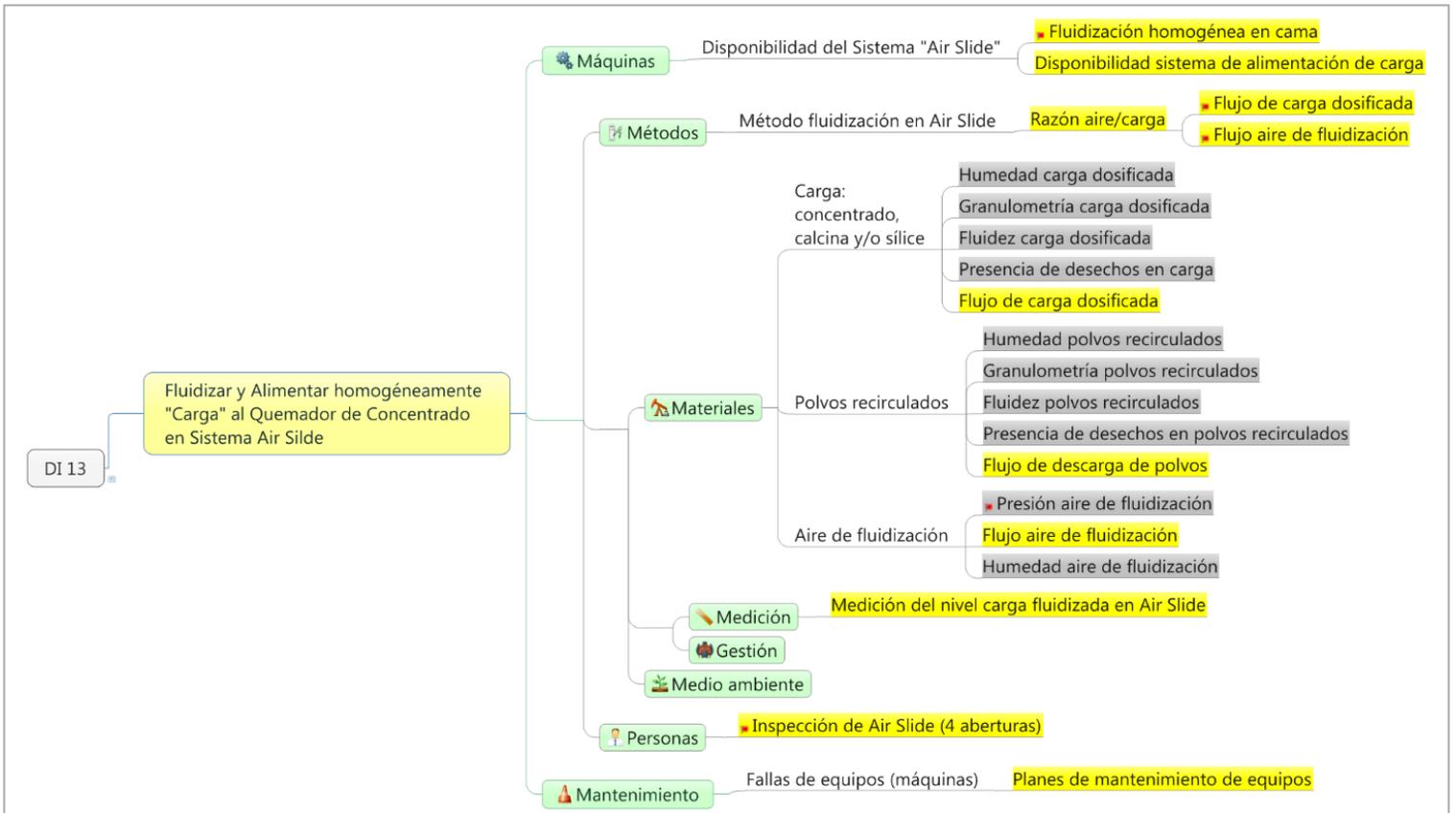


Figura 53. Diagrama de Incidencia 13.

8.8 Análisis de criticidad y tabla descriptiva de factores críticos

Análisis de criticidad: matriz de análisis y factores incidentales críticos

1		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Dosificar concentrado según flujo solicitado Sistema Clyde concentrado (2 sistemas, cada uno con 2 vasos)	Caída de un vaso en un sistema en funcionamiento	- Disminución de flujo de concentrado a T54 - Problema de mezcla y homogeneización con demás componentes (razón calcina) - Retardo (cambiar a otro sistema)	- Falla de algún componente del vaso (válvula, celda de carga, rotofeed) - Fluctuaciones en aire de instrumentación - Fluctuaciones en aire de fluidización	2	1	1	2
	Falla de un sistema completo	- Bajada de flujo o flujo cero de concentrado a T54 - Problema de mezcla y homogeneización con demás componentes (razón calcina real) - Retardo (cambiar a otro sistema)	- Falla de algún componente del vaso (válvula, celda de carga, rotofeed) - Caída de aire de instrumentación - Caída de aire de fluidización	2	4	1	8
	Capacidad de dosificación deficiente de concentrado	- Variaciones de la razón de calcina, impactando en operación del horno (mayor que la propuesta) - Posible vaciado de tolva 54	- Sistemas de control - Calidad del concentrado (densidad aparente)	2	2	2	8

Factores Incidentales Críticos:

- Presión aire de instrumentación
- Capacidad de dosificación Sistema Clyde - concentrado
- Número vasos en funcionamiento concentrado
- Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde

2		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Dosificar calcina según flujo solicitado Sistema Clyde concentrado (3 vasos conectados a ambas líneas)	Falla/Caída de un vaso en funcionamiento	- Bajada de flujo de calcina a T54 - Problema de mezcla y homogeneización con demás componentes (razón calcina) - Retardo (cambio a otro vaso)	- Falla de algún componente del vaso (válvula, celda de carga, rotofeed) - Fluctuaciones en aire de instrumentación - Fluctuaciones en aire de fluidización	3	1	1	2
	Falla/Caída de dos vasos	- Bajada de flujo de calcina a T54 - Problema de mezcla y homogeneización con demás componentes (razón calcina) - Retardo (cambio a otro vaso)	- Falla de algún componente del vaso (válvula, celda de carga, rotofeed) - Caída de aire de instrumentación - Caída de aire de fluidización	2	3	1	6
	Falla/Caída de tres vasos	- Flujo de calcina a T54 nulo - Problema de mezcla y homogeneización con demás componentes (razón calcina)	- Falla de algún componente del vaso (válvula, celda de carga, rotofeed) - Caída de aire de instrumentación - Caída de aire de fluidización	1	4	1	4
	Capacidad de dosificación deficiente de calcina	- Variaciones de la razón de calcina, impactando en operación del horno (menor que la propuesta)	- Sistemas de control - Calidad del concentrado (densidad aparente)	2	2	2	8

Factores Incidentales Críticos:

- Presión aire de instrumentación
- Capacidad de dosificación Sistema Clyde - calcina
- Número vasos en funcionamiento calcina
- Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde
- Densidad aparente calcina

3		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Dosificar fundente según flujo solicitado Sistema Clyde concentrado (2 sistemas, cada uno con 1 vaso)	Falla de un vaso (sistema) en funcionamiento	Corto Plazo: - Baja o flujo cero de sílice a T54 - Problema de mezcla y homogeneización con demás componentes (razón SiO_2 /conc)	- Falla de algún componente del vaso (válvula, celda de carga, rotoscrew) - Fluctuaciones en aire de instrumentación - Fluctuaciones en aire de fluidización	3	1	1	3
	Falla de dos vasos (2 sistemas)	- Flujo cero de sílice a T54 - No se alimenta sílice al horno	- Falla de algún componente del vaso (válvula, celda de carga, rotoscrew) - Caída en aire de instrumentación - Caída en aire de fluidización	2	3	1	6
	Capacidad de dosificación deficiente de sílice	- Variaciones de la razón de sílice, impactando en operación del horno (menor que la propuesta)	- Dificultades con sistema de control	2	2	2	8

Factores Incidentales Críticos:

- Presión aire de instrumentación
- Capacidad de dosificación Sistema Clyde - fundente
- Número vasos en funcionamiento calcina
- Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde

4		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Dosificar "carga" proveniente de tolva 54 según consigna de alimentación en sistema LWF	Alta variabilidad en la dosificación en sistema LWF	- Alta variabilidad en el flujo a HF (repercusión directa en ley de Cu)	- Desgaste de tornillo - Fluidización de concentrado - Calibración del sistema de control	3	3	3	27
	Caída de uno de los sistemas	- Baja inmediata de carga al horno - Compensación con el otro sistema (sobresfuerzo)	- Falla de equipos del sistema - Alto desgaste de partes	2	3	1	6
	Baja disponibilidad de un sistema	- Baja de carga - Variabilidad en el flujo - Compensación con otro sistema	- Fallas de equipos del sistema - Desgaste	1	1	1	1
	Fluidización de la mezcla en tornillo	- Variabilidad en flujo de alimentación - Problemas de control de los sistemas, control deficiente	- Variación en características del concentrado (densidad, humedad) - Sobrepresión en tolva 54	2	4	5	40

Factores Incidentales Críticos:

- Disponibilidad Sistema de Alimentación 1
- Disponibilidad Sistema de Alimentación 2
- Nivel de fluidez carga
- Flujo de carga dosificada

5		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Recepcionar concentrado de cobre seco desde secadores a tolva 29	Nivel tolva 29 bajo nivel operacional (menor a 600 ton)	Corto plazo: - Disminución flujo de concentrado a T54 - Disminución del nivel T54	- Problemas con Secador 4 y/o secador 5 o UPC (Unidad de preparación de carga) - Problemas con transporte desde S4 / S5	2	2	1	4
	Nivel tolva 29 en nivel crítico (menor a 300 ton)	Largo plazo: - Vaciado T54 - Disminución/cese flujo alimentación horno	- Problemas con Secador 4 y/o secador 5 o UPC (Unidad de preparación de carga) - Problemas con transporte desde S4 / S5	2	3	1	6

Factores Incidentales Críticos:

- Estado de funcionamiento S4
- Estado de funcionamiento S5
- Nivel tolva 03-029
- Planificación mezcla de carga
- Planificación de secado de concentrado

6		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Recepcionar Fundente desde planta de sílice y alimentar tolva 30	Nivel tolva 30 bajo nivel operacional (menor a XX ton)	Corto plazo: - Disminución flujo sílice a T54 - Disminución nivel T54	- Problema con recepción de fundente en planta de sílice	1	2	1	2
	Nivel tolva 30 en nivel crítico (menor a XX ton)	Largo plazo: - Disminución/cese de dosificado de concentrado a T54	- Problema con recepción de fundente en planta de sílice	1	2	1	2

Factores Incidentales Críticos:

- Flujos de sílice desde planta de recepción
- Nivel tolva 03-030

7		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Recepcionar Calcina desde DMH y alimentar tolva 001	Nivel tolva 001 bajo nivel operacional (menor a 100 ton)	Corto plazo: - Disminución flujo de calcina a T54	- No hay recepción de calcina desde DMH - Tasa de alimentación a HF mayor al de recepción	4	2	1	8
	Nivel tolva 001 en nivel crítico (menor a 50 ton)	Largo plazo: - Problema con balance térmico en horno	- No hay recepción de calcina desde DMH - Tasa de alimentación a HF mayor al de recepción	3	3	1	9

Factores Incidentales Críticos:

- Planificación tostación DMH
- Nivel tolva TOL-001
- Flujos de calcina

8		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Mantener stock de tolva 54 en nivel operacional	Nivel de tolva 54 bajo nivel operacional (menor a 450 ton)	- Pérdida de inventario en T54 - Reducción de capacidad de fusión de HF	- Flujo de entrada sostenidamente menor al de salida en el tiempo - Flujo de entrada a T54 nulo	1	3	1	3
	Nivel de tolva 54 en nivel crítico (menor a 300 ton)	- Pérdida de inventario en T54 - Reducción de capacidad de fusión de HF - Detención de alimentación a HF	- Flujo de entrada sostenidamente menor al de salida en el tiempo - Flujo de entrada a T54 nulo	1	4	1	4

Factores Incidentales Críticos:

- Nivel tolva 03-054
- Capacidad global de transporte Sistema Clyde
- Nivel tolva 03-029
- Nivel tolva 03-030
- Nivel tolva TOL-001
- Flujo de concentrado solicitado a tolva 03-029
- Flujo de calcina solicitado a tolva TOL-001
- Flujo de sílice solicitado a tolva 03-030
- Flujo de "carga" solicitado por sistema LWF

9		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Dosificar polvos metalúrgicos provenientes de tolva 55 Transportar polvos metalúrgicos dosificados para mezclar con "carga"	Baja de disponibilidad de polvos en tolva 55	- Posible aumento de temperatura en HF (balance térmico)	- Baja recuperación de polvos - Polvos transferidos a lugares diferentes	2	2	1	4
	Alimentación de polvos en concentración alta en As	- Envenenamiento sistema - Aumento de ley de As en eje (Envenenamiento sistema) - Variaciones en ley de Cu en eje	- Alto contenido de As en concentrado - Alta recirculación de polvos	1	2	3	6
	Variabilidad en alimentación de polvos metalúrgicos	- Variaciones en ley de Cu en eje - Variabilidad en la temperatura de operación (balance térmico)	- Bajo control de la alimentación de polvos - Baja previsión del impacto de polvos en proceso	3	2	1	6

Factores Incidentales Críticos:

- Nivel tolva 03-055
- Temperatura HF
- Coeficiente de oxígeno

10		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Transportar concentrado, calcina y fundente a puntos de mezcla y "carga" hacia tolva 54	Bloqueo de línea	- Problema de mezcla y homogeneización (razón calcina real) - Cambio de línea	- Partículas gruesas (principalmente sílice proveniente en calcina)	2	1	1	2
	Falla línea en funcionamiento	- Problema de mezcla y homogeneización (razón calcina real) - Cambio de línea	- Rotura por desgaste de tuberías - Fugas de material - Problemas con aire de transporte	3	1	1	3
	Falla de las dos líneas	- Se deja de alimentar T54 (corto plazo) - Bajada de carga al horno por nivel crítico de nivel T54 (mediano plazo) - Parada alimentación HF por vaciado de T54 (largo plazo)	- Rotura por desgaste de tuberías - Fugas de material - Problemas con aire de transporte	2	4	1	8

Factores Incidentales Críticos:

- Contenido de sílice calcina
- Nivel de fluidez carga
- Flujo de carga dosificada
- Flujo de calcina solicitado a tolva TOL-001
- Flujo de sílice solicitado a tolva 03-030
- Flujo de concentrado solicitado a tolva 03-029
- Presión aire de transporte
- Flujo aire de transporte

11 y 12		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Realizar el mezclado y homogeneizado de los componentes (Sistema Clyde, vasos presurizados y componentes + líneas)	Homogeneizado irregular de "carga"	- Variación en la razón de calcina	- Razón de aire/sólido fuera de rango operacional - Velocidad de mezcla fuera de rango operacional	3	1	3	9
	Mezclado irregular de "carga"	- "Bolsones" de concentrado o calcina en T54	- Razón de aire/sólido fuera de rango operacional - Velocidad de mezcla fuera de rango operacional	3	2	3	18

Factores Incidentales Críticos:

- Número vasos (Sistema Clyde) en funcionamiento de concentrado, calcina y sílice.
- Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde
- Presión aire de transporte
- Flujo aire de transporte

13		FALLOS POTENCIALES					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	MODOS DE FALLO	EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	F	G	D	IPR
Fluidizar y Alimentar homogéneamente "carga" al Quemador de Concentrado en Sistema Air Slide	Rotura de malla (interior Air Slide) cerca de la descarga al QC	- Canalización de carga en una o más de las 4 secciones - Segregación de carga	- Intervención de personal inadecuada	1	3	3	9
	Obstrucción de descarga de Air Slide	- Segregación de carga, diferencia de alimentación en uno de las cuatro secciones	- Desechos presentes en "carga" o polvos - Aglomeraciones por bajo nivel de aire o características del material	1	3	3	9
	Baja o alta presión de aire de fluidización	- Segregación de carga, diferencia de alimentación en uno de las cuatro secciones - Pérdidas de material por rebalse	- Fluctuaciones o deficiencias en aire de fluidización -	1	2	4	8

Factores Incidentales Críticos:

- Fluidización homogénea en cama
- Inspección de Air Slide (4 aberturas)
- Presión aire de fluidización
- Flujo de carga dosificada
- Flujo aire de fluidización

Tabla 25. Descripción de factores críticos.

Sub-Función	Factores Incidentales Críticos	Objetivo	Rango o Set Point	Impacto en proceso		TAGs asociado		Notas	
				Desviación sobre set point o rango	Desviación bajo set point o rango	Nombre	TAG		
Dosificar concentrado según flujo solicitado	Presión aire de instrumentación	Mantener presión estable en rangos operacionales	Sin información	- Sobrepresión en equipos - Fallas - Desgaste	- Mal funcionamiento de equipos que requieren aire de instrumentación	T2:pit_300		presion de aire instrumentacion	
	Capacidad de dosificación Sistema Clyde - concentrado	Mantener capacidad de transporte de concentrado según diseño	Concentrado: 120 t/h	- Mezcla de concentrado y calcina variable (<i>razón de calcina</i> menor a propuesta) - Eventual rebalse de T54 - Eventual vaciado de T29	- Mezcla de concentrado y calcina variable (<i>razón de calcina</i> mayor a propuesta) - Vaciado de T54 - Disminución de carga o detención de carga en alimentación a HF (largo plazo)	suma flujos concentrado suma flujos concentrado SP	hf:suma_flujo_concentrado hf:suma_flujo_concentrado_SP	* ref de rango: Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata	
	Número vasos en funcionamiento (Sistema Clyde) de concentrado	Permitir buena mezcla (razón de calcina según consigna mezclada y homogeneizada)	2 vasos concentrado 2 vasos mín. de calcina 1 vaso min sílice	No aplica	- Mezclado (expresado en <i>razón de calcina</i>) y homogeneizado de carga deficientes	-	-	-	Mezcla homogénea se refiere a Concentrado + calcina
	Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde	Permitir buena mezcla (razón de calcina según consigna mezclada y homogeneizada)	-	No aplica	- Mezclado (expresado en <i>razón de calcina</i>) y homogeneizado de carga deficientes	-	-	-	Mezcla homogénea se refiere a Concentrado + calcina
Dosificar calcina según flujo solicitado	Presión aire de instrumentación	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido		Repetido	
	Capacidad de dosificación Sistema Clyde - calcina	Mantener capacidad de transporte de calcina según diseño	Calcina: 100 t/h	- Mezcla de concentrado y calcina variable (<i>razón de calcina</i> mayor a propuesta) - Eventual vaciado de T001	- Mezcla de concentrado y calcina variable (<i>razón de calcina</i> menor a propuesta) - Disminución de carga	suma flujos calcina suma flujos calcina SP	hf:suma_flujo_calcina hf:suma_flujo_calcina_SP	* ref de rango: Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata	
	Número vasos en funcionamiento calcina	Permitir buena mezcla (razón de calcina según consigna mezclada y homogeneizada)	3 vasos concentrado 2 vasos mín. de calcina 1 vaso min sílice	No aplica	- Mezclado (expresado en <i>razón de calcina</i>) y homogeneizado de carga deficientes	-	-	-	Mezcla homogénea se refiere a Concentrado + calcina
	Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde	Permitir buena mezcla (razón de calcina según consigna mezclada y homogeneizada)	-	No aplica	- Mezclado (expresado en <i>razón de calcina</i>) y homogeneizado de carga deficientes	-	-	-	Mezcla homogénea se refiere a Concentrado + calcina
	Densidad aparente calcina	Conocer densidad para determinar capacidad de dosificación	1800 to 2200 kg/m3 (diseño) 1185 to 1315 kg/m3 (actual)	-	- Capacidad de dosificación menor a la de diseño	-	-	-	* ref de rango: Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata
Dosificar fundente según flujo solicitado	Presión aire de instrumentación	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido		Repetido	
	Capacidad de dosificación Sistema Clyde - fundente	Mantener capacidad de transporte de sílice según diseño	Sílice: 10 t/h	- Mezcla de concentrado y sílice variable (alta en sílice)	- Mezcla de concentrado y sílice variable (baja en sílice)	-	-	-	* ref de rango: Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata
	Número vasos en funcionamiento calcina	Permitir buena mezcla (razón de calcina según consigna mezclada y homogeneizada)	2 vasos concentrado 2 vasos mín. de calcina 1 vaso min sílice	No aplica	- Mezclado (expresado en <i>razón de calcina</i>) y homogeneizado de carga deficientes	-	-	-	Mezcla homogénea se refiere a Concentrado + calcina
	Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde	Permitir buena mezcla (razón de calcina según consigna mezclada y homogeneizada)	-	No aplica	- Mezclado (expresado en <i>razón de calcina</i>) y homogeneizado de carga deficientes	-	-	-	Mezcla homogénea se refiere a Concentrado + calcina

Tabla 26. Descripción de factores críticos. (Continuación)

Sub-Función	Factores Incidentales Críticos	Objetivo	Rango o Set Point	Impacto en proceso		TAGs asociado		Notas
Dosificar "carga" proveniente de tolva 54 según consigna de alimentación en sistema LWF	Disponibilidad Sistema de Alimentación 1	Dosificar carga según flujo solicitado en línea 1 (forma actual de medición)	Dispersión en la dosificación: 80% para error de 2%, 85% para error de 3%	- Flujo de carga mayor al solicitado en línea 1	- Flujo de carga menor al solicitado en línea 1 - Caída de tornillo 1	FLUJO CARGA HORNO L1 FLUJO CARGA HORNO L1_SP	FL-WI_XXA FL-WI_XXASP	Rangos predefinidos, pero actualmente no se tienen en consideración
	Disponibilidad Sistema de Alimentación 2	Dosificar carga según flujo solicitado en línea 2 (forma actual de medición)	Dispersión en la dosificación: 80% para error de 2%, 85% para error de 3%	- Flujo de carga mayor al solicitado en línea 2	- Flujo de carga menor al solicitado en línea 2 - Caída de tornillo 2	FLUJO CARGA HORNO L2 FLUJO CARGA HORNO L2_SP	FL-WI_XXB FL-WI_XXBSP	Rangos predefinidos, pero actualmente no se tienen en consideración
	Nivel de fluidez carga	Nivel de fluidez constante para evitar "fluidización" en tornillos de dosificación	-	-	-	-	-	
Recepcionar concentrado de cobre seco desde secadores a tolva 29	Estado de funcionamiento S4	Conocer estado S4 y mantener nivel mínimo en T29	En funcionamiento	- No aplica	- Posible vaciado de T29 si estado es que no opera S4	ESTADO SECADOR 4	S4:FD_SEC4	1 operando 0 no operando
	Estado de funcionamiento S5	Conocer estado S5 y mantener nivel mínimo en T29 en caso que S4 no funcione	En funcionamiento cuando S4 no opera	- No aplica	- Posible vaciado de T29 en caso que S4 y S5 no operen	ESTADO SECADOR 5	S5:FD_SEC5	1 operando 0 no operando
	Nivel tolva 03-029	Recepcionar concentrado y mantener stock de concentrado	300-900 ton	- Rebalse de tolva - Mal funcionamiento de filtros de manga	- poco tiempo de reacción frente a eventualidad (corto plazo) - disminución o detención de carga (largo plazo)	CONCENTR. SECO TOLVA 029	FL:WR3437	(ver archivo Tolvas)
	Planificación mezcla de carga	Mezclas de concentrado homogéneas en concentración de cobre.	Variación de ley de cobre en T29 con desviación en %	- Desviación en coeficiente de oxígeno real	- Vaciado de T29 - Desviación en coeficiente de oxígeno real	COBRE CONCENTRADO	HF:FUNCC009CU	Que no se produzcan variaciones bruscas en ley de Cu en concentrado de T29
	Planificación de secado de concentrado	Mantener nivel mínimo en T29 (desde el punto de vista de HF)	T29 en 300-900 ton	No aplica	- Vaciado de T29	CONCENTR. SECO TOLVA 029	FL:WR3437	
Recepcionar fundente desde planta de sílice y alimentar tolva 30	Fujos de sílice desde planta de recepción	Mantener nivel mínimo en T30 (desde el punto de vista de HF)	T30 en 50-150 ton	No aplica	- Vaciado de T30	PENDIENTE	PENDIENTE	
	Nivel tolva 03-030	Recepcionar sílice y mantener stock de concentrado	50-100 ton	- Rebalse de tolva - Mal funcionamiento de filtros de manga	- poco tiempo de reacción frente a eventualidad	-	-	(ver archivo Tolvas)
Recepcionar calcina desde DMH y alimentar tolva 001	Planificación tostación DMH	Mantener nivel mínimo en T001 (desde el punto de vista de HF)	T001 en 100-500 ton	- Rebalse T001	- Vaciado de T001	tonelaje calcina tolva1 horno flash	FL:Tonelaje_Tolva1_Calcina	
	Nivel tolva TOL-001	Recepcionar calcina y mantener stock de concentrado	100-500 ton	- Rebalse de tolva - Mal funcionamiento de filtros de manga	- poco tiempo de reacción frente a eventualidad (corto plazo) - disminución razón de calcina para mantener alimentación a HF constante	tonelaje calcina tolva1 horno flash	FL:Tonelaje_Tolva1_Calcina	(ver archivo Tolvas)
	Fujos de calcina	Mantener nivel mínimo en T001	T001 en 100-500 ton	- Rebalse T001	- Vaciado de T001	tonelaje calcina tolva1 horno flash	FL:Tonelaje_Tolva1_Calcina	
Mantener stock de tolva 54 en nivel operacional	Nivel tolva 03-054	Mantener stock de carga (mezcla de concentrado, calcina y sílice)	450-600 ton	- Rebalse de tolva - Mal funcionamiento de filtros de manga	- poco tiempo de reacción frente a eventualidad (corto plazo) - disminución o parada de carga (largo plazo)	CONCENTR. SECO TOLVA 054	FL:WIC368.1	(ver archivo Tolvas)
	Capacidad global de transporte Sistema Clyde	Mantener capacidad de transporte de concentrado, calcina y sílice según diseño	Concentrado: 120 t/h Calcina: 100 t/h Sílice: 10 t/h Carga (conc + calc): 220 t/h	- Mezcla de concentrado y calcina variable (razón de calcina fuera de set point) - Eventual rebalse de T54 - Eventual vaciado de T29 y T001	- Mezcla de concentrado y calcina variable (razón de calcina fuera de set point) - Vaciado de T54 - Disminución de carga o parada de carga en alimentación a HF (largo plazo)	suma flujos calcina suma flujos concentrado suma flujos concentrado SP suma flujos calcina SP	hf:suma_flujo_calcina hf:suma_flujo_concentrado hf:suma_flujo_concentrado_SP hf:suma_flujo_concnetrado_SP	* ref de rango: Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata
	Nivel tolva 03-029	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido
	Nivel tolva 03-030	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido
	Nivel tolva TOL-001	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido
	Flujo de concentrado solicitado a tolva 03-029	Mantener flujo de concentrado según consigna (Sistema Clyde)	Error de Flujo de concentrado menor a 90%	- Vaciado T29 - Mezcla de concentrado y calcina con mayor razón de calcina	- Vaciado T54 - Mezcla de concentrado y calcina con menor razón de calcina	suma flujos concentrado suma flujos concentrado SP	hf:suma_flujo_concentrado hf:suma_flujo_concentrado_SP	

Tabla 26. Descripción de factores críticos. (Continuación)

Sub-Función	Factores Incidentales Críticos	Objetivo	Rango o Set Point	Impacto en proceso		TAGs asociado		Notas
Mantener stock de tolva 54 en nivel operacional	Flujos de calcina solicitado a tolva TOL-001	Mantener flujo de calcina según consigna (Sistema Clyde)	Error de Flujo de calcina menor a 90%	- Vaciado T001 - Mezcla de concentrado y calcina con mayor razón de calcina	- Eventual vaciado T54 - Mezcla de concentrado y calcina con menor razón de calcina	suma flujos calcina suma flujos calcina SP	hfsuma_flujo_calcina hfsuma_flujo_calcina_SP	Revisar SP vaso 1 calcina (fuera de rango)
	Flujos de sílice solicitado a tolva 03-030	Flujos de sílice solicitado a tolva 03-030	Mantener flujo de sílice según consigna (Sistema Clyde)	Error de Flujo de calcina menor a 90%	- Vaciado T30 - Mezcla con mayor razón de sílice	- Mezcla con menor razón de sílice	COMPLETAR	Indicador: Tiempo: Indicación: Nota:
	Flujo de "Carga" solicitado por sistema LWF	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido
Dosificar polvos metalúrgicos provenientes de Tolva 55 Transportar polvos metalúrgicos dosificados para mezclar con "carga"	Nivel tolva 03-055	Mantener nivel mínimo en T55	3-17 ton	- Rebalse T55	- Vaciado de T55	TOLVA POLVORECU 03-055	FL-WR3682	
	Temperatura HF	Mantener en estándar operacional	Pendiente					
	Coefficiente de oxígeno	Mantener ley de eje en rango operacional	Pendiente					
Transportar concentrado, calcina y fundente a puntos de mezcla y "carga" hacia tolva 54	Contenido de sílice calcina	Contenido de sílice en calcina	Tener en cuenta el contenido de sílice gruesa en calcina, afecta el sistema de transporte	Nivel de sílice en calcina alto para las primeras 24 hrs de funcionamiento de planta de tostación	Alto nivel de sílice y flujo de aire normal produce taponamiento de tuberías	Nivel normal o bajo de sílice no genera inconveniente en transporte	-	Alta concentración (primeras 24 hrs de funcionamiento planta de tostación) flujo alto de aire de transporte
	Nivel de fluidez carga	Permitir dosificación según consigna	Sin Información	- Sobrecarga tornillos de alimentación	- Dosificación dispersa de carga por bolsones de aire (fluidización)	SIN TAG	SIN TAG	Relacionado a aire de fluidización, estado mecánico tornillo, propiedades carga (densidad)
	Flujo de concentrado solicitado a tolva 03-029	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido
	Flujos de sílice solicitado a tolva 03-030	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido
	Flujos de calcina solicitado a tolva TOL-001	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido
	Presión aire de transporte	Mantener condiciones de transporte neumático óptimas	Confirmar (Hasta 550 kPa presión de operación para vasos)	- Transporte neumático deficiente - Obstrucción de tuberías	- Sobrepresión en líneas	PRESION AIRE TRANSPORTE	T2:PIT_041	
Realizar el mezclado y homogeneización de los componentes	Número vasos (Sistema Clyde) en funcionamiento de concentrado, calcina y sílice.	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido
	Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido
	Presión aire de transporte	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido	Repetido

Tabla 26. Descripción de factores críticos. (Continuación)

Sub-Función	Factores Incidentales Críticos	Objetivo	Rango o Set Point	Impacto en proceso		TAGs asociado		Notas
Fluidizar y alimentar homogéneamente "carga" al quemador de concentrado en sistema air slide	Fluidización homogénea en cama	Mantener condiciones de transporte por fluidización óptimas	Temperaturas de entrada QC con dispersión menor a X% (pendiente)	-Desborde o pérdida de material	- Flujo desigual en estrada al QC lo que deriva en no homogeneidad de llama	Temperatura 1 Alimentación al Quemador de Concentrado Temperatura 2 Alimentación al Quemador de Concentrado Temperatura 3 Alimentación al Quemador de Concentrado Temperatura 4 Alimentación al Quemador de Concentrad	FL:04-TI-111 FL:04-TI-112 FL:04-TI-113 FL:04-TI-114	
	Inspección de Air Slide (4 aberturas)	Mantener entradas al QC despejadas	Temperaturas de aberturas en entrada de QC con dispersión menor a X% (pendiente)	No aplica	- Tapado de alguna abertura al QC - Fluidización no homogénea	Ver más arriba	Ver más arriba	
	Presión aire de fluidización	Mantener presión en rango operacional para transporte por fluidización óptimo	-	- Flujo menor de aire de fluidización - Resistencia a la fluidización	- Mayor flujo de aire de fluidización -	Contrapresión Aire de Fluidización de Air Slide	FL:04-PI-101	
EXTRA								
Dispersar mezcla en la torre de reacción homogéneamente y en geometría óptima	Dispersión de mezcla	Mantener dispersión homogénea de mezcla en inyector del QC	Flujo homogéneo en toda la periferia del QC	No aplica	- Reacciones de oxidación deficientes o incompletas		FL:04-PI-115 FL:04-PI-116 FL:04-PI-117	Análisis a petición del consultor por tenerse mayores antecedentes (ver archivo adjunto)
	Coefficiente de Oxígeno	Producir reacciones de oxidación completas u óptima oxidación de compuestos sulfurados	Pendiente	- Coef. ox. mayor al real induce en sobre-alimentación de oxígeno - Aumento de temperatura en torre de reacción	- Coef. ox. menor al real induce en sub-alimentación de oxígeno - Reacciones de oxidación deficientes	SP COEFICIENTE OXIGENO - VALOR EFEC SP COEFICIENTE OXIGENO - VALOR PROP	FL:04-XI-004-PV FL:04-XI-004-SPA	
	Enriquecimiento	Minimizar volumen de gases y preservar temperatura	Pendiente	- Enriq. mayor al real induce en sobrealimentación de oxígeno - Aumento de temperatura en torre de reacción	- Enriq. menor al real induce en subalimentación de oxígeno - Reacciones de oxidación deficientes	SP ENRIQUECIMIENTO OXIGENO - VALOR EFEC SP ENRIQUECIMIENTO OXIGENO - VALOR PROP Análisis de Oxígeno de Aire Enriquecido	FL:04-XI-005-PV FL:04-XI-005-SPA FL:04-AI-700	

8.9 Bases del Panel de Información

8.9.1 Indicadores candidatos

Se sugiere una lista de indicadores estándar, que permiten obtener información relacionada a variabilidad de un proceso. La base de cálculo es una ventana móvil de tiempo a determinar según el indicador, contexto de aplicación e información disponible.

- Capacidad del proceso (C_{pk}):

$$C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\sigma}$$

$$C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}$$

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl})$$

- Promedio ponderado: Variable de ponderación: tiempo.

$$p = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i + x_{i-1}}{2} \right) \cdot \left(\frac{t_i}{t_{total}} \right)$$

- Desviación estándar: Variable de ponderación: tiempo

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{x_i + x_{i-1}}{2} \right) - p \right]^2 \cdot \left(\frac{t_i}{t_{total}} \right)$$

- N° de cambios en promedio local: Cantidad en cambios de SP o en promedio local de datos en variable de interés

$$\text{si } (p_i - p_{i-1}) < tol \rightarrow \text{cambio de escalón}$$

$$n_{esc,i} = n_{esc,i-1} + 1_{(p_i - p_{i-1}) < tol}$$

- Magnitud acumulada de cambios en promedio local: Magnitud acumulada del cambio de escalón

$$m_{esc} = \sum_{i=1}^n |p_i - p_{i-1}|$$

- Error: Diferencia entre valor real y valor de consigna.

$$e_i = \frac{|PV_i - SP_i|}{SP_i}$$

$$e_{ac} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_i + e_{i-1}}{2} \right) \cdot \left(\frac{t_i}{t_{total}} \right)$$

8.9.2 Creación de TAGs

Se adjuntan los TAGs creados y los límites calculados para los tres estados de indicadores.

Tabla 26. TAGs creados y límites de rangos.

Tag	Descriptor	límite inferior	límite 1 (80%)	límite 1 (95%)	límite superior	Nota
MV:STD_FLUJO_ALIM_AUX	DESV EST FLUJO ALIMENTACION					
MV:STD_FLUJO_ALIM	DESV EST FLUJO ALIMENTACION	0	2,48	10,60	inf	ok
MV:STD_RAZON_CALCINA	DESV RAZON CALCINA	0	8,95	20,85	inf	ok
MV:PORC_OLLAS_ESTANDAR_AUX	OLLAS EN ESTANDAR 60-65%	-	-	-	-	-
MV:PORC_OLLAS_ESTANDAR	PORC DE OLLAS EN ESTANDAR	100%	22%	13%	0%	Se opta por dejar límites: 100%-50% ; 50%-25% y 25%-0%
MV:PORC_T_CALDERA	PORC DE TIEMPO TEMP CALDERA BAJO 370	100%	19%	0%	0%	Se opta por dejar límites de variable nativa, 0-370 ; 370-390 y >390
MV:STD_P_AIRE_INST	DESV EST PRESION AIRE INST	0	2,31	3,37	inf	ok
MV:STD_FLUJO_POLVOS	DESV EST FLUJO POLVOS	0	0,04	0,51	inf	ok
MV:ERROR_RAZON_CALCINA	ERROR RAZON CALCINA	-	-	-	-	-
MV:ERROR_RAZON_CALCINA_PROM	ERROR RAZON CALCINA PROM HORA	0%	100%	104%	inf	Se opta por límites: 0-50% ; 50%-75% y >75%
MV:ERROR_FLUJO_CONC_CLYDE	ERROR FLUJO CONC CLYDE	-	-	-	-	-
MV:ERROR_FLUJO_CONC_CLYDE_PROM	ERROR FLUJO CONC CLYDE PROM HORA	0%	52%	7456%	inf	Se opta por límites: 0-50% ; 50%-75% y >75%
MV:ERROR_FLUJO_CALC_CLYDE	ERROR FLUJO CALC CLYDE	-	-	-	-	-
MV:ERROR_FLUJO_CALC_CLYDE_PROM	ERROR FLUJO CALC CLYDE PROM HORA	0%	40%	52%	inf	ok
MV:STD_FLUJO_LWF1	DESV EST FLUJO LWF1	0	1,87	5,39	inf	ok
MV:STD_FLUJO_LWF2	DESV EST FLUJO LWF2	0	1,35	5,33	inf	ok
MV:PORC_T_T29	PORC TIEMPO T29 ESTANDAR	100%	0%	0%	0%	Se opta por dejar variable nativa, 900-600 ; 600-300 y <300
MV:PORC_T_T001	PORC TIEMPO T001 ESTANDAR	100%	0%	0%	0%	Se opta por dejar variable nativa, 500-100 ; 100-50 y <50
MV:PORC_T_T54	PORC TIEMPO T54 ESTANDAR	100%	90%	12%	0%	Se opta por dejar variable nativa, 600-450 ; 450-300 y <300

Tabla 27. TAGs creados y límites de rangos. (Continuación)

Tag	Descriptor	límite inferior	límite 1 (80%)	límite 1 (95%)	límite superior	Nota
MV:PORC_T_TOLVAS_PROM	PORC TIEMPO PROM TOLVAS	100%	33%	25%	0%	ok
MV:STD_P_AIRE_TRANS	DESV EST PRESION AIRE TRANS	0	5,26	7,66	inf	ok
MV:DIF_TEMP1_QC	DIF TEMP 1 ENTRADA QC	0	5,00	6,00	inf	Se consideran incidentes plásticos en Air-Slide
MV:DIF_TEMP2_QC	DIF TEMP 2 ENTRADA QC	0	5,00	6,00	inf	
MV:DIF_TEMP3_QC	DIF TEMP 3 ENTRADA QC	0	5,00	6,00	inf	
MV:DIF_TEMP4_QC	DIF TEMP 4 ENTRADA QC	0	5,00	6,00	inf	
MV:CAP_DOSIF_CONC	PORC CAP DE DOSIF CLYDE CONC	100%	75%	65%	0%	ok
MV:CAP_DOSIF_CALC	PORC CAP DE DOSIF CLYDE CALC	100%	41%	33%	0%	ok
MV:NUM_VASOS_CONC_1	NUM VASOS CONC CLYDE SIST 1	-	-	-	-	-
MV:NUM_VASOS_CONC_2	NUM VASOS CONC CLYDE SIST 2	-	-	-	-	-
MV:NUM_VASOS_CALC	NUM VASOS CLYDE CALC	-	-	-	-	-
MV:ERROR_FLUJO_LWF1	ERROR FLUJO LWF1	-	-	-	-	-
MV:ERROR_FLUJO_LWF1_PROM	ERROR FLUJO LWF1 PROM HORA	0%	2,1%	35%	inf	ok
MV:PORC_T_ERROR_2%_LWF1	PORC T ERROR BAJO 2% LWF1	100%	66%	31%	0%	ok
MV:PORC_T_ERROR_3%_LWF1	PORC T ERROR BAJO 3% LWF1	100%	81%	47%	0%	ok
MV:ERROR_FLUJO_LWF2	ERROR FLUJO LWF2	-	-	-	-	-
MV:ERROR_FLUJO_LWF2_PROM	ERROR FLUJO LWF2 PROM HORA	0%	1,4%	35%	inf	ok
MV:PORC_T_ERROR_2%_LWF2	PORC T ERROR BAJO 2% LWF2	100%	75%	41%	0%	ok
MV:PORC_T_ERROR_3%_LWF2	PORC T ERROR BAJO 3% LWF2	100%	87%	51%	0%	ok
MV:STD_ENRIQUECIMIENTO	DESV ENRIQUECIMIENTO	0	0,29	0,93	inf	ok
MV:ERROR_ENRIQUECIMIENTO	ERROR ENRIQUECIMIENTO	-	-	-	-	-
MV:ERROR_ENRIQUECIMIENTO_PROM	ERROR ENRIQUEC. PROM HORA	0%	6%	16%	inf	ok
MV:STD_COEF_OX	DESV COEF OXIGENO	0	2,61	3,85	inf	ok
MV:ERROR_COEF_OX	ERROR COEF OXIGENO	-	-	-	-	-
MV:ERROR_COEF_OX_PROM	ERROR COEF OXIGENO PROM HORA	0%	1%	35%	inf	ok
MV:DIF_PRESION_1_QC	DIF PRESION ANULAR 1 QC	-	-	-	-	-
MV:DIF_PRESION_2_QC	DIF PRESION ANULAR 2 QC	-	-	-	-	-
MV:DIF_PRESION_3_QC	DIF PRESION ANULAR 3 QC	-	-	-	-	-
MV:DIF_PRESION_1_QC_PROM	DIF PRESION ANULAR 1 QC prom 5m	0%	700%	1000%	inf	Se considera incidente, combustiona QC internamente
MV:DIF_PRESION_2_QC_PROM	DIF PRESION ANULAR 2 QC prom 5m	0%	700%	1000%	inf	
MV:DIF_PRESION_3_QC_PROM	DIF PRESION ANULAR 3 QC prom 5m	0%	700%	1000%	inf	

Tabla 27. Indicadores de estado por Función.

Nivel	Función	Indicador propuesto
0	Garantizar el abastecimiento de eje de cobre con "mínima variabilidad en la ley de cobre"	Capacidad del Proceso (C_{pk})
1	Preparar carga para generar mezcla homogénea y flujo de alimentación constante al Horno Flash	Desviación estándar de flujo de alimentación al HF Desviación estándar de razón de calcina
1.1	Dosificar materias primas (concentrado, calcina y fundente) según consigna de proporción entre componentes de "carga"	Error de razón de calcina
1.1.1	Dosificar concentrado según flujo solicitado	Error del flujo de dosificación de concentrado
1.1.2	Dosificar calcina según flujo solicitado	Error del flujo de dosificación de calcina
1.1.3	Dosificar fundente según flujo solicitado	Error del flujo de dosificación de fundente
1.2	Dosificar "carga" para mantener flujo constante de alimentación	Desviación estándar del flujo de LWF1 o LWF 2
1.2.1	Dosificar "carga" proveniente de tolva 54 según consigna de alimentación en sistema LWF	Desviación estándar del flujo de LWF1 o LWF 2
1.3	Mantener stock en tolvas de materias primas y tolva de carga	Porcentaje promedio de tolvas en estándar
1.3.1	Recepcionar concentrado de cobre seco desde secadores a tolva 29	Nivel de tolva T29
1.3.2	Recepcionar fundente desde planta de sílice y alimentar tolva 30	Nivel de tolva T30
1.3.3	Recepcionar calcinas desde DMH y alimentar tolva 001	Nivel de tolva T001
1.3.4	Mantener stock de tolva 54 en nivel operacional	Nivel de tolva T54
1.4	Dosificar polvos metalúrgicos para mezclar con "carga"	Desviación estándar del flujo de polvos al Horno Flash
1.4.1	Dosificar polvos metalúrgicos provenientes de tolva 55	Desviación estándar del flujo de polvos al Horno Flash
1.4.2	Transportar polvos metalúrgicos dosificados para mezclar con "carga"	Desviación estándar del flujo de polvos al Horno Flash
1.51	Transportar y mezclar materias primas dosificadas para generar "carga" homogénea	Desviación estándar de la presión del aire de instrumentación
1.5.1	Transportar concentrado, calcina y fundente a puntos de mezcla y "carga" hacia tolva 54	Desviación estándar de la presión del aire de instrumentación
1.5.2	Realizar el mezclado y homogeneizado de los componentes	Desviación estándar de la presión del aire de instrumentación
1.6	Alimentar "carga" dosificada al quemador de concentrado en forma homogénea	Diferencia de temperatura (entrada QC) con respecto al promedio
1.6.1	Fluidizar y alimentar homogéneamente carga seca al quemador de concentrado en sistema <i>air slide</i>	Diferencia de temperatura (entrada QC) con respecto al promedio
2	Asegurar continuidad operacional de la producción de eje en Horno Flash	Porcentaje de ollas en estándar
3	Enfriar gases provenientes del Horno Flash en caldera para adecuarlos a procesos y equipos siguientes	Temperatura a la salida de caldera
4	Disponer del suministro de servicios necesarios para la correcta operación con mínima variabilidad	Desviación estándar de la presión del aire de instrumentación
5	Limpiar gases metalúrgicos del polvo arrastrado para enviar a planta de tratamiento de gases	Porcentaje de recuperación de polvos
6	Manejar polvos metalúrgicos, provenientes de caldera y precipitadores electrostáticos, según stock necesario para alimentación	Desviación estándar del flujo de polvos al Horno Flash

1) Indicadores para factores críticos

El análisis de factores críticos se realizó en base a la información histórica disponible en los servidores PI, si esta no existía o no estaba disponible se dejó propuesto el indicador o simplemente planteado el Factor Incidenta para completar en futuras actualizaciones.

Se identificaron dos grupos de factores críticos: el primero de ellos es fácilmente caracterizable a través de indicadores estándares, como los incluidos en el Anexo 2.1, y/o son independientes unos de otros. El segundo grupo se caracterizó por la interrelación entre ellos y supone un análisis más detallado.

Los Factores Críticos del primer grupo se caracterizaron a través de fichas de análisis incluidas en Anexos, y el segundo, a través de escenarios para su monitorización y un modelo simple de predicción, incluidos también en Anexos. En la Tabla 2 se incluyen los factores identificados con la descripción de su medición y los límites de cada rango (verde, amarillo y rojo), se indica cuáles de ellos pertenecen al segundo grupo de análisis.

Además, al final de la Tabla 28 se incluye el análisis para cuatro variables operacionales de interés en relación al objetivo en estudio, para ser expuestas en el panel de supervisión.

Tabla 28. Factores incidentales y análisis de medición y/o indicador.

Sub-Función	Factores incidentales críticos	Descripción medición
Dosificar concentrado según flujo solicitado	Presión aire de instrumentación	Indicador: Desviación estándar Tiempo: 1 hora Indicación:
	Capacidad de dosificación Sistema Clyde - concentrado	Indicador: Porcentaje con respecto a capacidad nominal Tiempo: 1 hora Indicación: Revisar sistema de dosificación de concentrado Sistema Clyde, capacidad en nivel bajo
	Número vasos en funcionamiento (Sistema Clyde) de concentrado	Indicador: N° de vasos en operación Tiempo: 1 hora Indicación: Se recomienda operar con el número de vasos que asegura una mezcla homogénea
	Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde	Se recomienda encontrar el número de vasos y secuencia de funcionamiento que asegura una mezcla homogénea
Dosificar calcina según flujo solicitado	Presión aire de instrumentación	Repetido
	Capacidad de dosificación Sistema Clyde - calcina	Indicador: Porcentaje con respecto a capacidad nominal Tiempo: 1 día Indicación: Revisar sistema de dosificación de calcina Sistema Clyde, capacidad en nivel bajo
	Número vasos en funcionamiento calcina	Se recomienda encontrar el número de vasos que asegura una mezcla homogénea
	Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde	Se recomienda encontrar el número de vasos que asegura una mezcla homogénea
	Densidad aparente calcina	Se recomienda monitorear periódicamente para relacionar con dosificación de calcina
Dosificar fundente según flujo solicitado	Presión aire de instrumentación	Repetido
	Capacidad de dosificación Sistema Clyde - fundente	Pendiente para análisis futuro
	Número vasos en funcionamiento calcina	Se recomienda encontrar el número de vasos que asegura una mezcla homogénea
	Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde	Se recomienda encontrar el número de vasos que asegura una mezcla homogénea

Tabla 29. Factores incidentales y análisis de medición y/o indicador. (Continuación)

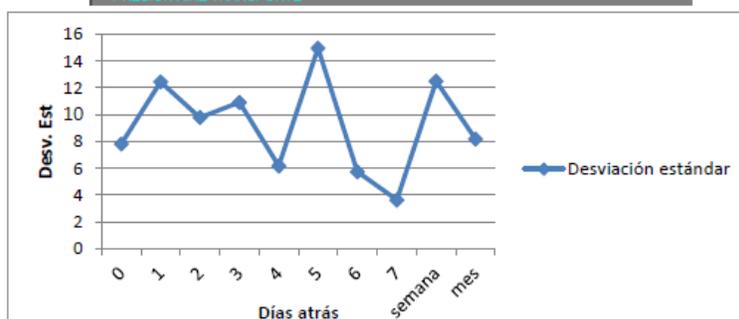
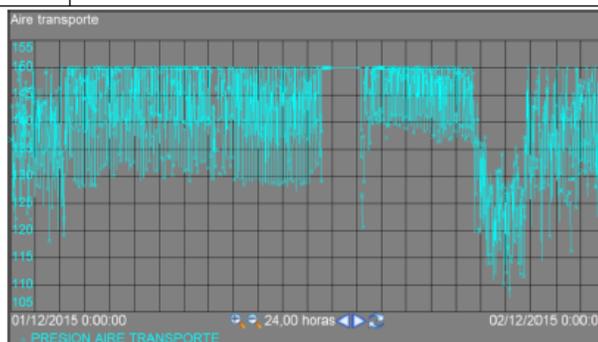
Sub-Función	Factores incidentales críticos	Descripción medición
Dosificar "Carga" proveniente de tolva 54 según consigna de alimentación en sistema LWF	Disponibilidad Sistema de Alimentación 1	Indicador: Error dosificación línea 1 de 2% Tiempo: 1 hora Indicación: Error fuera de rango permisible Nota: Revisar condición de tornillo 1
		Indicador: Error dosificación línea 1 de 3% Tiempo: 1 hora Indicación: Error fuera de rango permisible Nota: Revisar condición de tornillo 1
	Disponibilidad Sistema de Alimentación 2	Indicador: Error dosificación línea 2 de 2% Tiempo: 1 hora Indicación: Error fuera de rango permisible Nota: Revisar condición de tornillo 2
		Indicador: Error dosificación línea 2 de 3% Tiempo: 1 hora Indicación: Error fuera de rango permisible Nota: Revisar condición de tornillo 2
	Nivel de fluidez carga	-
Recepcionar concentrado de cobre seco desde secadores a tolva 29	Estado de funcionamiento S4	Se incluye en propuesta de escenario de monitorización de tolvas
	Estado de funcionamiento S5	Se incluye en propuesta de escenario de monitorización de tolvas
	Nivel tolva 03-029	Se incluye en propuesta de escenario de monitorización de tolvas
	Planificación mezcla de carga	Se incluye en propuesta de escenario de monitorización de tolvas
	Planificación de secado de concentrado	Se incluye en propuesta de escenario de monitorización de tolvas
Recepcionar Fundente desde planta de Sílice y alimentar tolva 30	Flujos de sílice desde planta de recepción	Pendiente para análisis futuro
	Nivel tolva 03-030	Pendiente para análisis futuro
Recepcionar Calcina desde DMH y alimentar	Planificación tostación DMH	Pendiente para análisis futuro
	Nivel tolva TOL-001	Se incluye en propuesta de escenario de monitorización de tolvas
	Flujos de calcina	Repetido
Mantener stock de tolva 54 en nivel operacional	Nivel tolva 03-054	Se incluye en propuesta de escenario de monitorización de tolvas
	Capacidad global de transporte Sistema Clyde	Representado a través de la capacidad de concentrado y de calcina
	Nivel tolva 03-029	Repetido
	Nivel tolva 03-030	Repetido
	Nivel tolva TOL-001	Repetido
	Flujo de concentrado solicitado a tolva 03-029	Indicador: Error flujo de concentrado Sistema Clyde Tiempo: 1 hora Indicación: Error alto en el flujo de concentrado Nota: Revisar secuencia y número de vasos de concentrado operando
	Flujos de calcina solicitado a tolva TOL-001	Indicador: Error flujo de calcina Sistema Clyde Tiempo: 1 hora Indicación: Error alto en el flujo de concentrado Nota: Revisar secuencia y número de vasos de calcina operando
	Flujos de sílice solicitado a tolva 03-030	Pendiente para análisis futuro
	Flujo de "carga" solicitado por sistema LWF	Repetido

Tabla 29. Factores incidentales y análisis de medición y/o indicador. (Continuación)

Sub-Función	Factores incidentales críticos	Descripción medición
Dosificar polvos metalúrgicos provenientes de tolva 55	Nivel tolva 03-055	Pendiente para análisis futuro
	Temperatura HF	Pendiente para análisis futuro
	Coeficiente de oxígeno	Pendiente para análisis futuro
Transportar concentrado, calcina y fundente a puntos de mezcla y "carga" hacia tolva 54	Contenido de sílice calcina	Pendiente para análisis futuro
	Nivel de fluidez carga	Se recomienda monitorear la razón entre el flujo de "carga" y flujo de aire. Pendiente para análisis futuro
	Flujo de concentrado solicitado a tolva 03-029	Repetido
	Flujos de sílice solicitado a tolva 03-030	Repetido
	Flujos de calcina solicitado a tolva TOL-001	Repetido
	Presión aire de transporte	Indicador: Desviación estándar Tiempo: 1 hora Indicación: Revisar distribución de aire de transporte
Realizar el mezclado y homogeneización de los componentes	Número vasos (Sistema Clyde) en funcionamiento de concentrado, calcina y sílice.	Repetido
	Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde	Repetido
	Presión aire de transporte	Repetido
Fluidizar y Alimentar homogéneamente "carga" al Quemador de Concentrado en	Fluidización homogénea en cama	Indicador: Variación de cada temperatura con respecto al promedio Tiempo: instantáneo Indicación: Alta desviación de temperatura N° X en entrada QC. Revisar Air Slide por posible obstrucción de abertura
	Inspección de Air Slide (4 aberturas)	IDEM
	Presión aire de fluidización	Pendiente para análisis futuro
VARIABLES OPERACIONALES		
	Flujo de Alimentación Carga	Indicador: Desviación estándar Tiempo: 1 hora
	Razón de Calcina	Indicador: Desviación estándar Tiempo: 1 hora
		Indicador: Error promedio Tiempo: 1 hora
	Enriquecimiento	Indicador: Desviación estándar Tiempo: 1 hora
		Indicador: Error promedio Tiempo: 1 hora
	Coeficiente de Oxígeno	Indicador: Desviación estándar Tiempo: 1 hora
		Indicador: Error promedio Tiempo: 1 hora

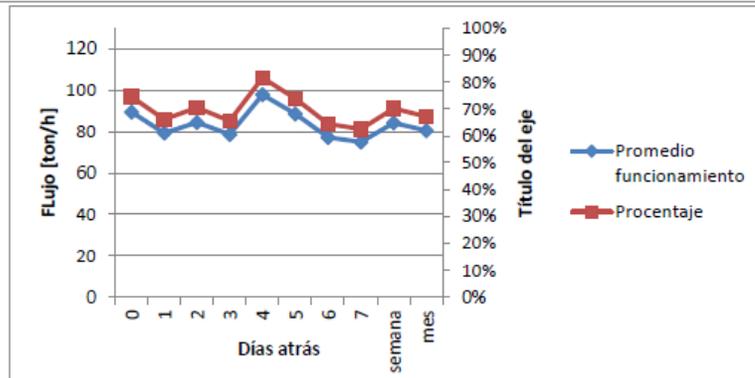
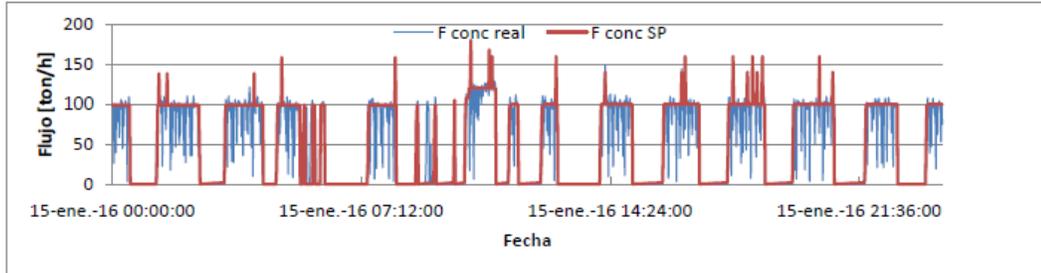
Sub-Función		Dosificar concentrado según flujo solicitado	
Factor Incidental Crítico:		Presión aire de transporte	
Objetivo		Presión de transporte en nivel operacional y con mínima variabilidad	
Rango o Set Point		Sin información	
Impacto en proceso	Desviación sobre	- Rotura de sellos y válvulas - Fugas por sobrepresión - Influencia en flujo de aire de transporte	
	Desviación bajo	- Transporte de material deficiente - Flujo de aire de transporte menor al requerido	
Notas			
TAGs asociado	T2:PIT_041	PRESION AIRE TRANSPORTE	

Indicador:	Variabilidad - Desviación estándar
Tiempo:	1 día
Valor de referencia alerta:	
Notificación:	Revisar sistema de aire de transporte, variabilidad de presión alta
Nota:	



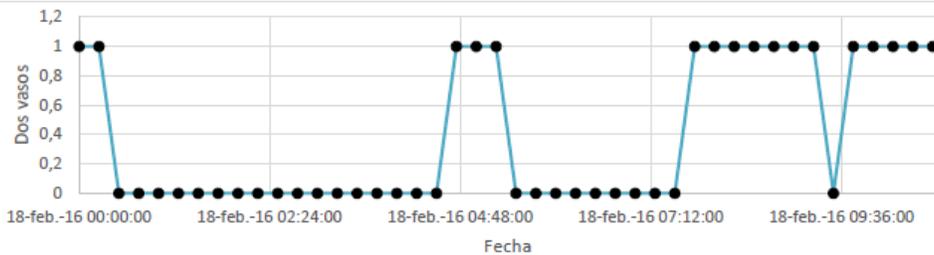
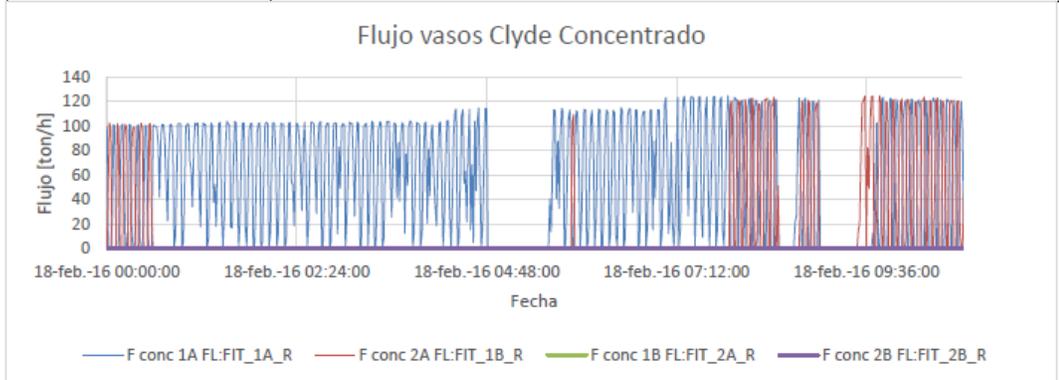
Sub-Función		Dosificar concentrado según flujo solicitado
Factor Incidental Crítico:		Capacidad de dosificación Sistema Clyde - concentrado
Objetivo		Mantener capacidad de dosificación de concentrado, calcina y sílice según diseño
Rango o Set Point		Concentrado: 120 t/h, Calcina: 100 t/h, Sílice: 10 t/h, Carga (co+ca+si): 220 t/h
Impacto en proceso	Desviación sobre	- Mezcla de concentrado y calcina variable (razón de calcina fuera de set point) - Eventual rebalse de T54 - Eventual vaciado de T29 y T001
	Desviación bajo	- Mezcla de conc y calcina variable (razón de calcina fuera de set point) - Vaciado de T54 - Disminución de carga o parada de carga en alimentación a HF (largo plazo)
Notas		* ref de rango: Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata
TAGs asociado	hf:suma_flujo_concentrado	suma flujos concentrado
	hf:suma_flujo_concentrado_SP	suma flujos concentrado SP

Indicador:	Promedio suma flujos
Tiempo:	1 día
Valor de referencia alerta:	Si flujo es menor a 90% de capacidad de diseño
Notificación:	Revisar sistema de transporte de concentrado Sistema Clyde, capacidad en nivel bajo.
Nota:	



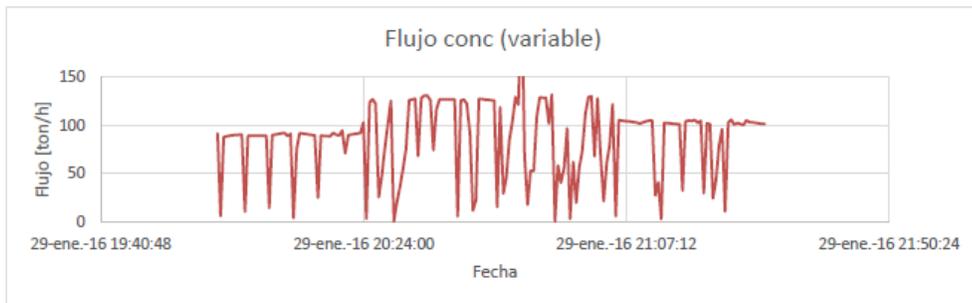
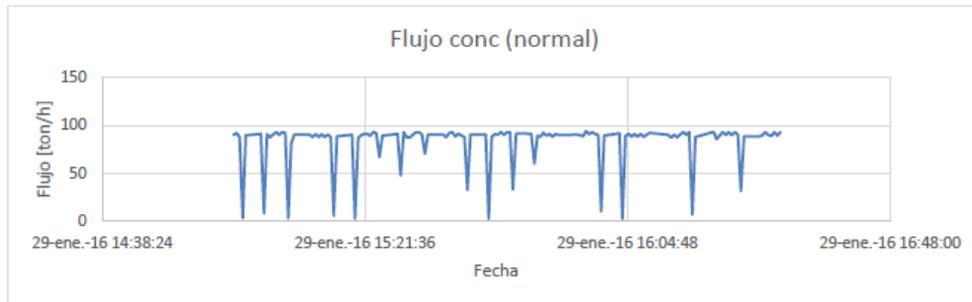
Sub-Función		Dosificar concentrado según flujo solicitado
Factor Incidental Crítico:		Número vasos en funcionamiento (Sistema Clyde) de concentrado
Objetivo		Permitir buena mezcla (razón de calcina según consigna mezclada y homogeneizada)
Rango o Set Point		2 vasos concentrado, 2 vasos mín. de calcina, 1 vaso min sílice
Impacto en proceso	<i>Desviación sobre</i>	No aplica
	<i>Desviación bajo</i>	- Mezclado (expresado en razón de calcina) y homogeneizado de carga deficientes
Notas		* ref de rango: Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata
TAGs asociado	FL:FIT_1A_R	Flujo Concentrado Vaso 1A
	FL:FIT_2A_R	Flujo Concentrado Vaso 2A
	FL:FIT_1B_R	Flujo Concentrado Vaso 1B
	FL:FIT_2B_R	Flujo Concentrado Vaso 2B

Indicador:	N° de vasos en operación
Tiempo:	30 min
Valor de referencia alerta:	Si en media hora el número de vasos no es el óptimo (dos veces de 15 min en cero)
Notificación:	Se recomienda operar con el número de vasos que asegura una mezcla homogénea
Nota:	



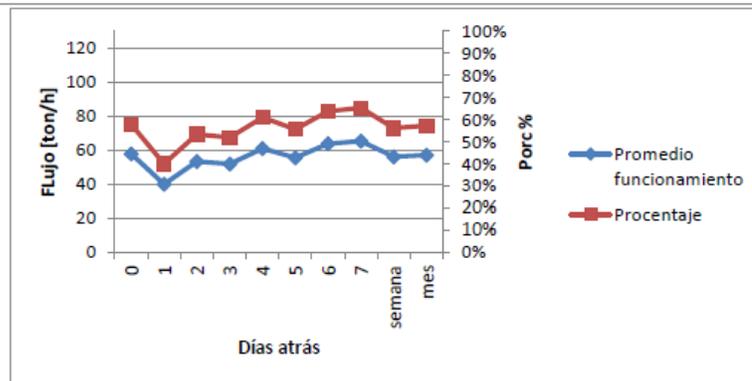
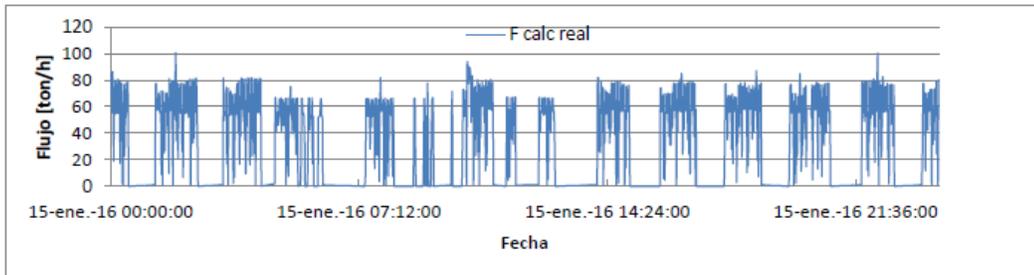
Sub-Función		Dosificar concentrado según flujo solicitado
Factor Incidental Crítico:		Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde
Objetivo		Permitir buena mezcla (razón de calcina según consigna mezclada y homogeneizada)
Rango o Set Point		-
Impacto en proceso	<i>Desviación sobre</i>	No aplica
	<i>Desviación bajo</i>	- Mezclado (expresado en razón de calcina) y homogeneizado de carga deficientes
Notas		* ref de rango: Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata
TAGs asociado	hf.suma_flujo_concentrado	suma flujos concentrado

Indicador:	Revisión regular de curvas de descarga de vasos de concentrado
Tiempo:	Diario/Semanal
Valor de referencia alerta:	Si hay desfase entre dos vasos de un sistema, ajustar funcionamiento
Notificación:	-
Nota:	Recomendación basada en forma de las curvas: normal y variable



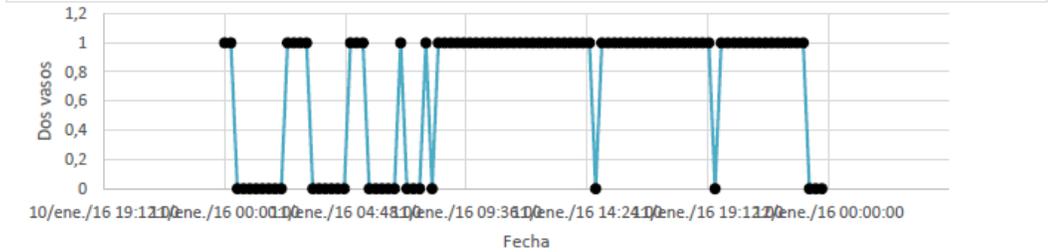
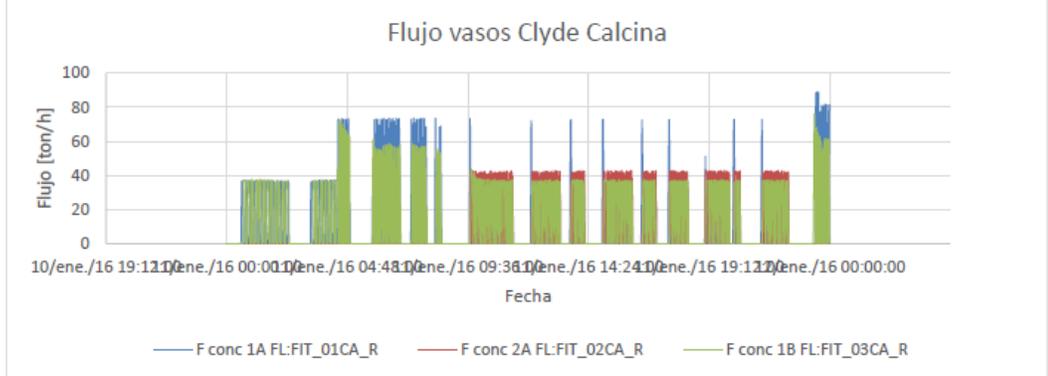
Sub-Función		Capacidad de dosificación Sistema Clyde - calcina
Factor Incidental Crítico:		Capacidad de dosificación Sistema Clyde - concentrado
Objetivo		Mantener capacidad de transporte de calcina según diseño
Rango o Set Point		Concentrado: 120 t/h, Calcina: 100 t/h, Sílice: 10 t/h, Carga (co+ca+si): 220 t/h
Impacto en proceso	Desviación sobre	- Mezcla de concentrado y calcina variable (razón de calcina mayor a propuesta) - Eventual vaciado de T001
	Desviación bajo	- Mezcla de concentrado y calcina variable (razón de calcina menor a propuesta) - Disminución de carga
Notas		* ref de rango: Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata
TAGs asociado	hf:suma_flujo_calcina	suma flujos calcina
	hf:suma_flujo_calcina_SP	suma flujos calcina SP

Indicador:	Promedio suma flujos
Tiempo:	1 día
Valor de referencia alerta:	Si flujo es menor a 90% de capacidad de diseño
Notificación:	Revisar sistema de transporte de calcina Sistema Clyde, capacidad en nivel bajo.
Nota:	Actualizar TAG FL:FIT_01CA_SP (Flujo Calcina SP Vaso 1) (AUMENTADO)



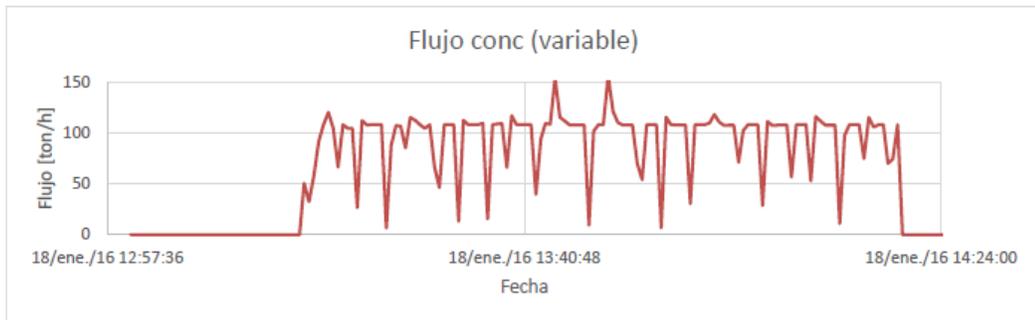
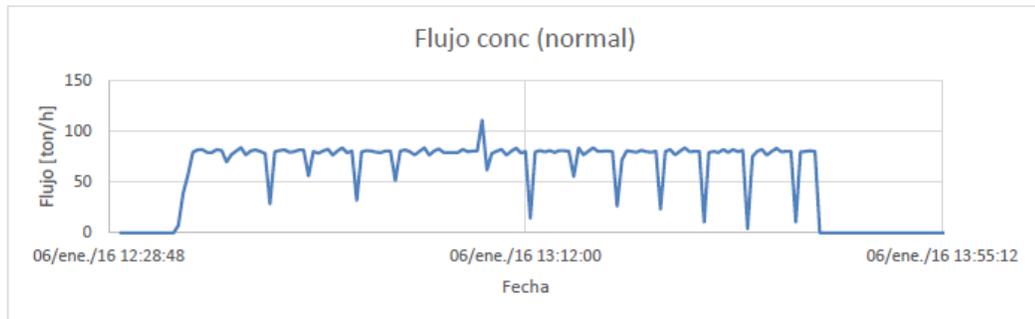
Sub-Función		Dosificar concentrado según flujo solicitado
Factor Incidental Crítico:		Número vasos en funcionamiento (Sistema Clyde) de calcina
Objetivo		Permitir buena mezcla (razón de calcina según consigna mezclada y homogeneizada)
Rango o Set Point		2 vasos concentrado, 2 vasos mín. de calcina, 1 vaso min sílice
Impacto en proceso	<i>Desviación sobre</i>	No aplica
	<i>Desviación bajo</i>	- Mezclado (expresado en razón de calcina) y homogeneizado de carga deficientes
Notas		* ref de rango: Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata
TAGs asociado	FL:FIT_01CA_R	Flujo Calcina Vaso 1
	FL:FIT_02CA_R	Flujo Calcina Vaso 2
	FL:FIT_03CA_R	Flujo Calcina Vaso 3

Indicador:	N° de vasos en operación
Tiempo:	30 min
Valor de referencia alerta:	Si en media hora el número de vasos no es el óptimo (dos veces de 15 min en cero)
Notificación:	Se recomienda operar con el número de vasos que asegura una mezcla homogénea
Nota:	



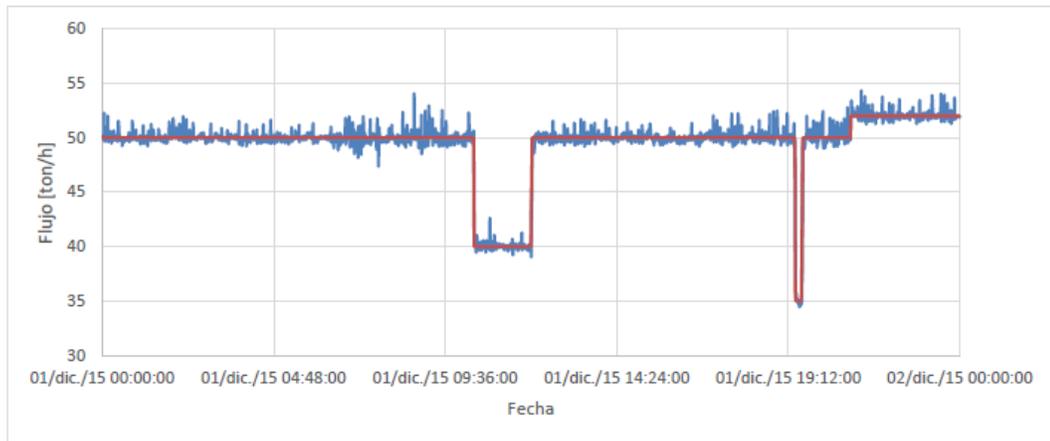
Sub-Función		Dosificar calcina según flujo solicitado
Factor Incidental Crítico:		Secuencia de funcionamiento vasos Sistema Clyde - calcina
Objetivo		Permitir buena mezcla (razón de calcina según consigna mezclada y homogeneizada)
Rango o Set Point		-
Impacto en proceso	<i>Desviación sobre</i>	No aplica
	<i>Desviación bajo</i>	- Mezclado (expresado en razón de calcina) y homogeneizado de carga deficientes
Notas		* ref de rango: Engineering Study to Identify Possible Improvements to the Calcine Conveying Systems at Codelco Chuquicamata
TAGs asociado	hf:suma_flujo_calcina	suma flujos calcina

Indicador:	Revisión regular de curvas de descarga de vasos de concentrado
Tiempo:	Diario/Semanal
Valor de referencia alerta:	Si hay desfase entre dos vasos de un sistema, ajustar funcionamiento
Notificación:	-
Nota:	Recomendación basada en forma de las curvas: normal y variable

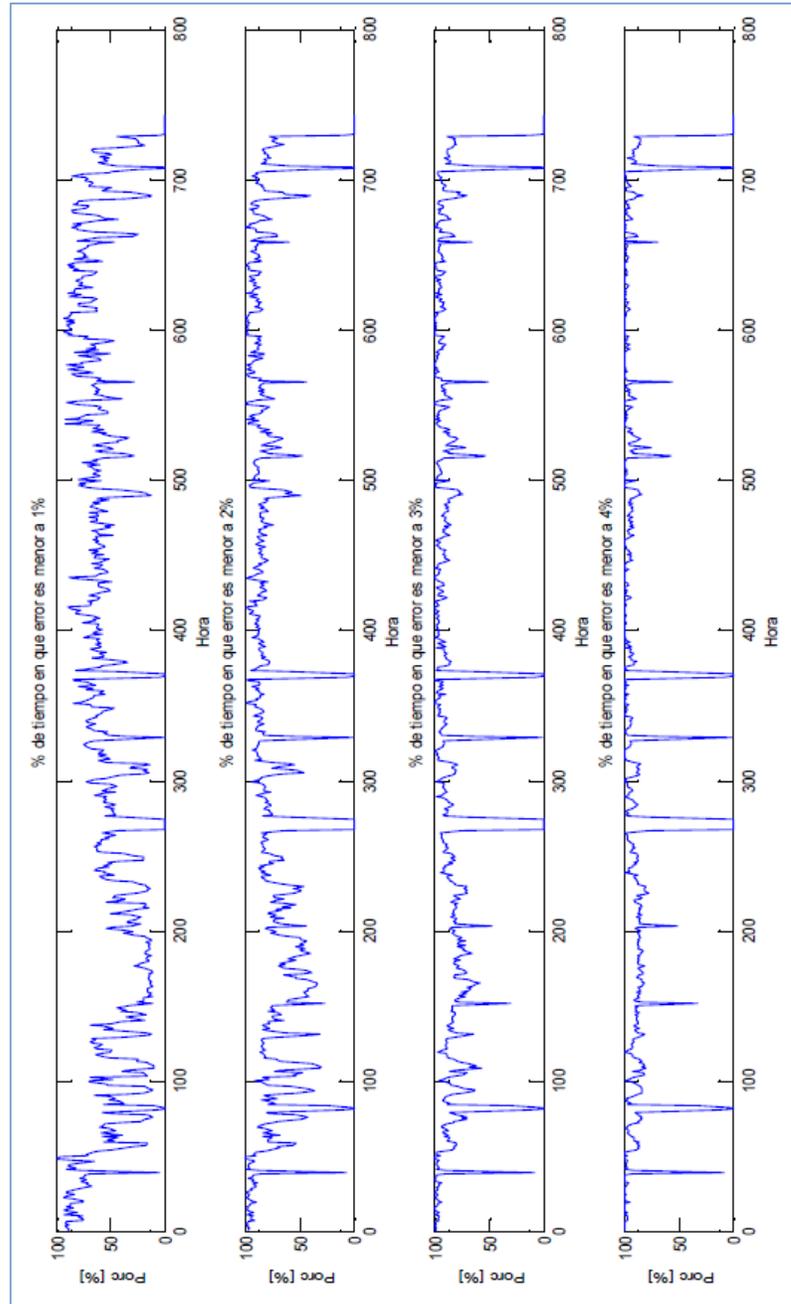


Sub-Función		Dosificar "Carga" proveniente de Tolva 54 según consigna de alimentación en sistema
Factor Incidental Crítico:		Disponibilidad Sistema de Alimentación 1
Objetivo		Dosificar carga según flujo solicitado en línea 1 (forma actual de medición)
Rango o Set Point		- Dispersión en la dosificación: 80% para error de 2%, 85% para error de 3%
Impacto en proceso	Desviación sobre	- Flujo de carga mayor al solicitado en línea 1
	Desviación bajo	- Flujo de carga menor al solicitado en línea 1 - Caída de tornillo 1
Notas		
TAGs asociado	FL:WI_XXA	FLUJO CARGA HORNO L1
	FL:WI_XXASP	FLUJO CARGA HORNO L1 _SP

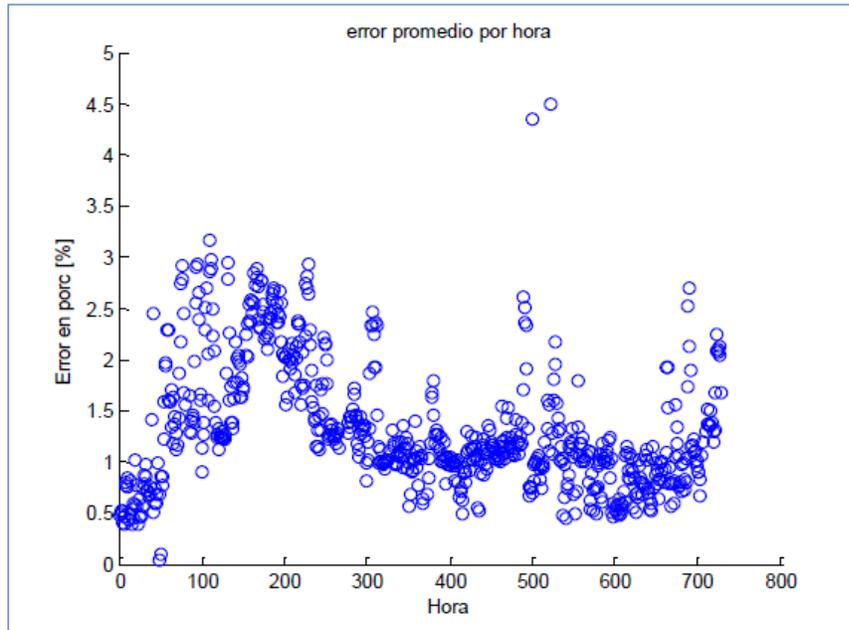
Indicador:	Error dosificación línea 1 2% y 3% y error promedio por hora
Tiempo:	1 hora
Valor de referencia alerta:	Error fuera de rango permisible
Notificación:	Revisar condición de tornillo 1
Nota:	



Porcentaje de tiempo bajo 1%, 2%, 3% y 4% por hora para mes de diciembre 2015



Error promedio por hora para mes de diciembre 2015



8.9.3 Escenarios de monitorización de tolvas

Se adjunta en la Figura 54 un esquema simple de las tolvas de materias primas: concentrado, sílice y calcina, y de carga.

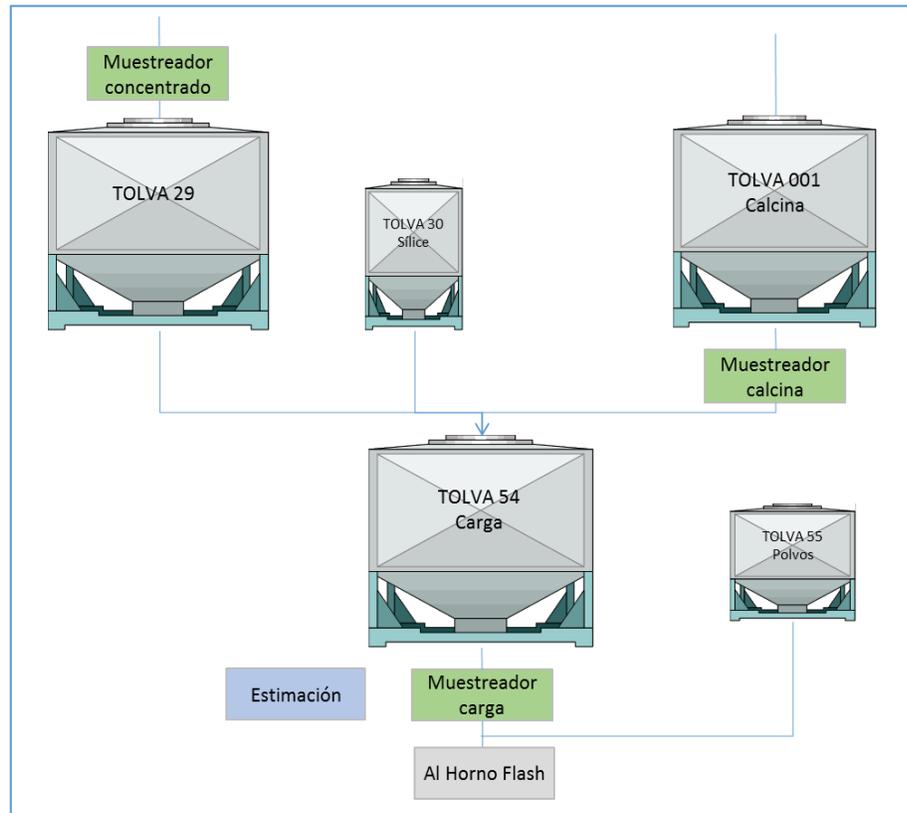


Figura 54. Esquema de tolvas de concentrado, sílice, calcina y carga.

Se propone el siguiente modelo de escenarios para la monitorización de tolvas y asociados:

Escenarios (T29, T001, T54)

Objetivos de análisis: Minimizar variabilidad de ley de cobre en eje

Objetivos operacionales:

- No detener alimentación al Horno Flash
- No producir grandes variaciones de carga (máx. 10 ton/h por cada 30 min)

Tolva 29: La capacidad es de 900 ton; el Estándar de operación de 600 a 900 ton; el Nivel crítico: 300 ton. Los equipos y sistemas relacionados son: Secador 4 y Sistema Clyde de transporte y dosificación.

Los escenarios propuestos son:

- Ok: mayor a 600 ton
- Alerta amarilla: Entre 300 a 600 ton
- Alerta roja: bajo 300 ton

El escenario de monitorización y alerta propuesto se incluye en la Figura 55.

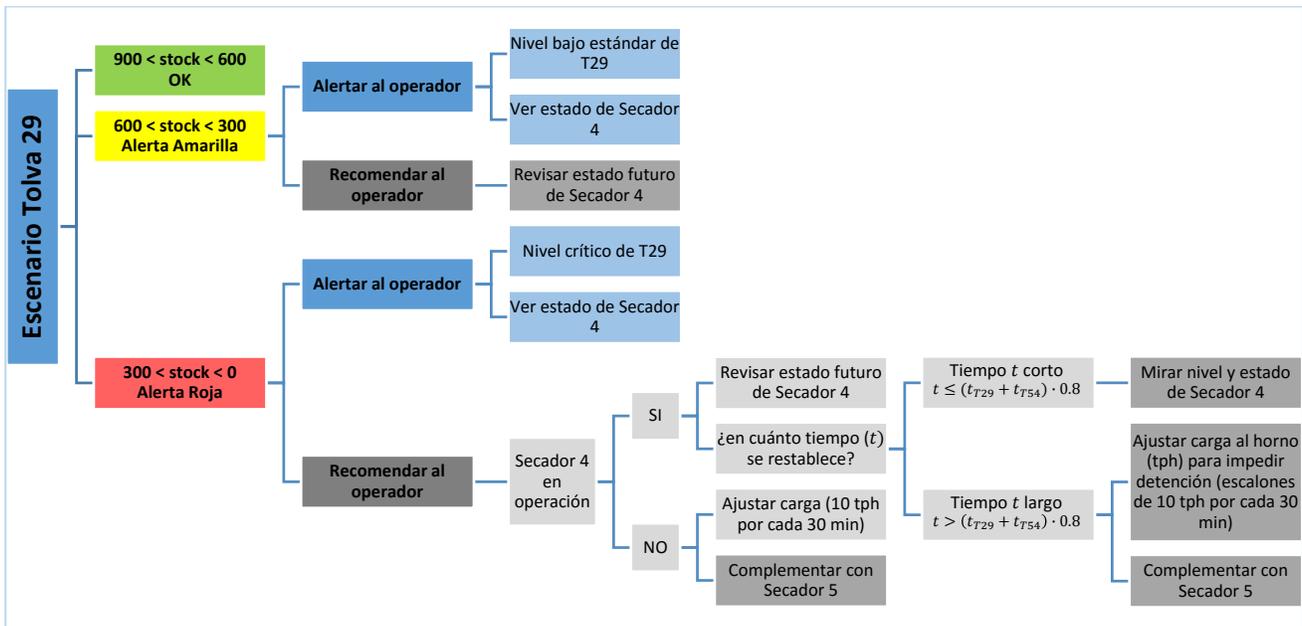


Figura 55. Escenarios de stock tolva 29 de concentrado.

Nota: t_{T29} (tiempo de vaciado de tolva 29) y t_{T54} (tiempo de vaciado tolva 54) se calculan en base al nivel, flujo de carga y razón de calcina en el momento de información a modo de estimación.

$$t_{T29} = \frac{\text{nivel T29}}{\text{flujo} * \text{razón calcina}}: \quad \text{ejemplo} = \frac{300 \text{ ton}}{120 \text{ tph} * 50\%} = 5 \text{ h}$$

$$t_{T54} = \frac{\text{nivel T54}}{\text{flujo}}: \quad \text{ejemplo} = \frac{500 \text{ ton}}{120 \text{ tph}} = 5 \text{ h}$$

Tolva 001: La capacidad es de 500 ton; el Estándar de operación de 100 a 500 ton; el Nivel crítico: 50 ton (No es claro cuando un nivel es crítico dada la intermitencia del proceso de tostación en división DMH, pero se determina que 50 ton permitiría tomar acciones previas). Los equipos y sistemas relacionados son: tostación DMH y Sistema Clyde de transporte y dosificación.

Los escenarios propuestos son:

- Ok: mayor a 100 ton
- Alerta amarilla: Entre 50 a 100 ton
- Alerta roja: bajo 50 ton

El escenario de monitorización y alerta propuesto se incluye en la Figura 56.

Nota: es recomendable mantener un stock de calcina, la alimentación de concentrado solo puede generar una baja tasa de alimentación si este es muy exotérmico al no poder compensar el Balance Térmico.

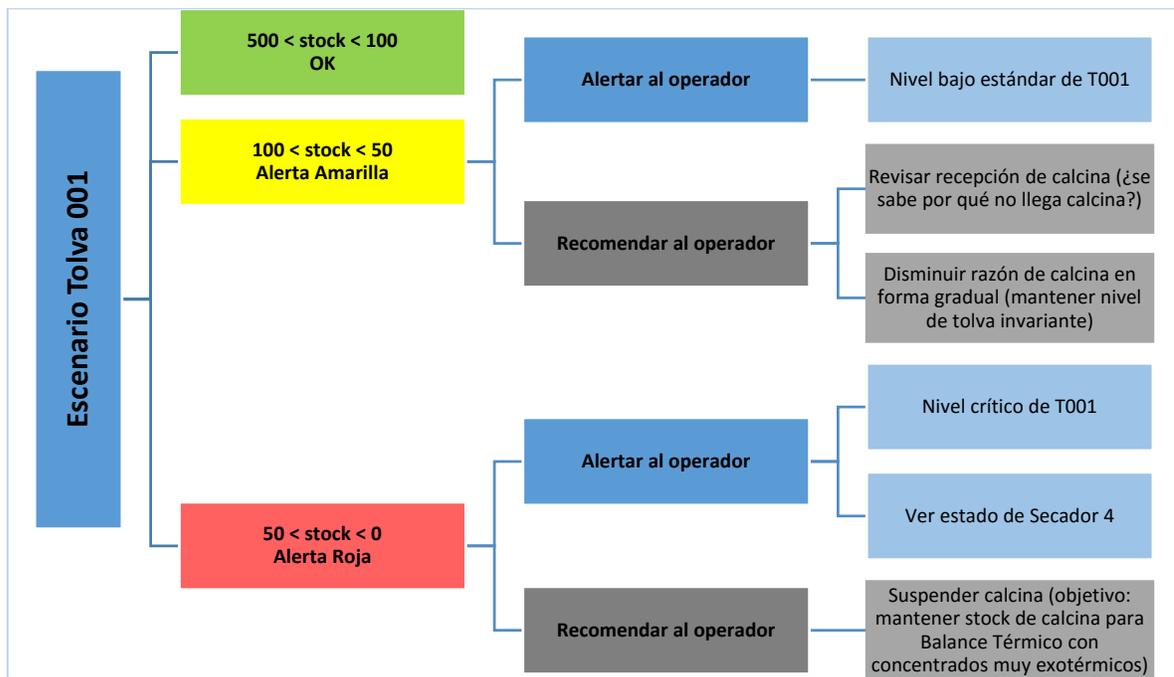


Figura 56. Escenarios de stock tolva 001 de calcina.

Tolva 54: La capacidad es de 600 ton; el Estándar de operación de 450 a 600 ton; el Nivel crítico: 300 ton. Los equipos y sistemas relacionados son: tolva 29, tolva 001, Sistema Clyde de transporte y dosificación y Sistema de dosificación por pérdida de peso (LWF). El escenario de monitorización y alerta propuesto se incluye en la Figura 57.

Los escenarios propuestos son:

- Ok: mayor a 450 ton
- Alerta amarilla: Entre 300 a 450 ton
- Alerta roja: bajo 300 ton

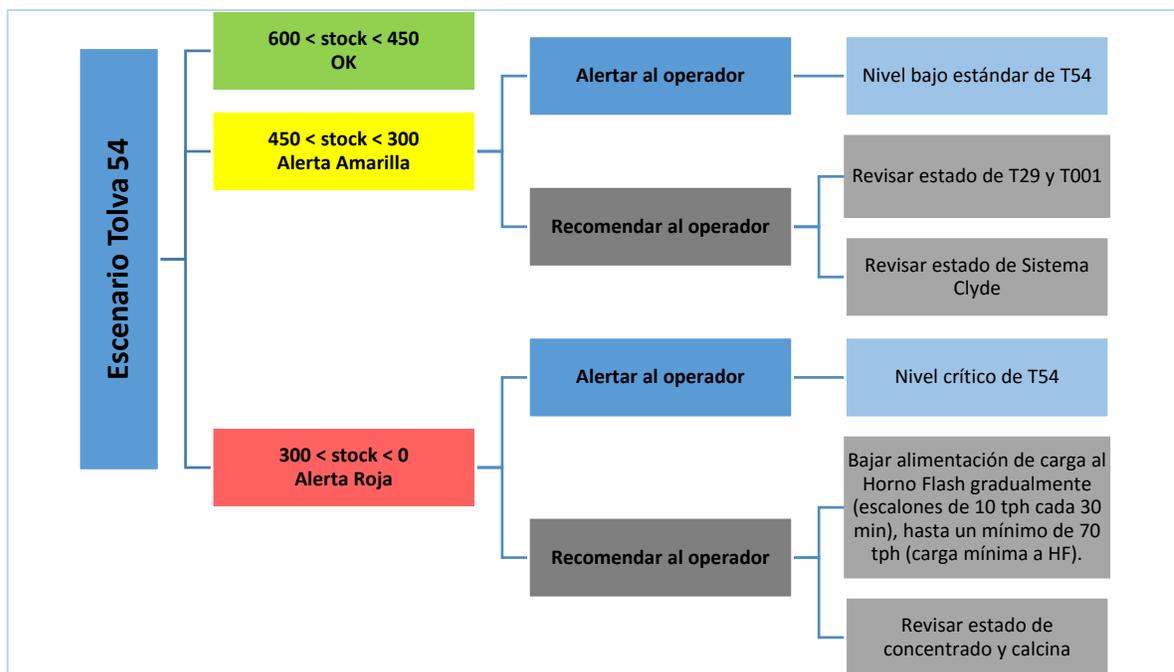


Figura 57. Escenarios de stock tolva 54 de carga.

8.9.4 Modelo de estimación de ley de Cu, Fe, S, SiO₂ y As

Se propone un modelo de estimación de leyes de cobre (Cu), Hierro (Fe), Azufre (S), Sílice (SiO₂) y Arsénico (As) en la tolva de concentrado y en la tolva de carga. Esta herramienta permitiría mejorar el nivel de planificación de mezcla reflejado en los parámetros operacionales: Razón de Calcina y Coeficiente de Oxígeno. Actualmente la planificación de mezcla se realiza al inicio del día, con esta herramienta se puede obtener información actualizada para la planificación en otros períodos del día.

Antecedentes

- Muestreador concentrado: se realiza en horas pares (cada dos horas), el resultado toma alrededor de 1 hora y recién ahí se registra en el sistema.
- Muestreador calcina: se realiza en horas impares (cada dos horas), el resultado toma alrededor de 1 hora y recién ahí se registra en el sistema.
- Muestreador carga: se realiza cada una hora (cada una hora), el resultado toma alrededor de 1 hora y recién ahí se registra en el sistema.

TAGs relevantes

Tabla 29. TAGs relevantes para análisis de estimación de leyes.

Ítem	Nombre	TAG	
		Nombre TAG	TAG
Muestreador concentrado	Ley de Cu concentrado	COBRE CONCENTRADO	HF:FUNCC009CU
Muestreador calcina	Ley de Cu calcina	COBRE Calcina DMH c/2 hrs a HF	CT:FUNCC074Cu
Muestreador carga	Ley de Cu carga	COBRE CARGA	HF:MEZCOCU
Tolva 29 concentrado	Peso tolva 29	CONCENTR. SECO TOLVA 029	FL:WR3437
	Flujo salida tolva 29	suma flujos concentrado	hf:suma_flujo_concentrado
Tolva 30 sílice	Peso tolva 30	-	-
	Flujo salida tolva 30	-	-
Tolva 001 calcina	Peso tolva 001	tonelaje calcina tolva1 horno flash	FL:Tonelaje_Tolva1_Calcina
	Flujo salida tolva 001	suma flujos calcina	hf:suma_flujo_calcina
Tolva 54 carga	Peso tolva 54	CONCENTR. SECO TOLVA 054	FL:WIC368.1
	Flujo salida tolva 54 (L1 LWF)	FLUJO CARGA HORNO L1	FL:WI_XXA
	Flujo salida tolva 54 (L2 LWF)	FLUJO CARGA HORNO L2	FL:WI_XXB

Análisis

En general, para cada tolva se tiene que:

$$\text{acumulación} = \text{entrada} - \text{salida}$$

$$\frac{dM}{dt} = F_E - F_S$$

Donde M representa la masa de la tolva [ton], F_E el Flujo de entrada a la tolva [ton/h] y F_S el Flujo salida de la tolva [ton/h].

Aproximando $\frac{dM}{dt}$ por $\frac{\Delta M}{\Delta t}$, F_E y F_S como el promedio ponderado por intervalo de tiempo.

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} \approx \bar{F}_E - \bar{F}_S$$

Se tiene los datos de M y F_S , por lo que se calcula F_E :

$$\bar{F}_E \approx \frac{\Delta M}{\Delta t} + \bar{F}_S$$

El único parámetro a determinar es Δt y va a depender del nivel de detalle que se requiera y la minimización del error de medición de M . En general, el muestreo se realiza con una frecuencia mínima de 1 hora, valor tope que debería tener el intervalo. De conversaciones preliminares con consultor se decide que un buen intervalo es de 15 min.

$$\Delta t = 15 \text{ min}$$

El algoritmo de resolución contempla un modelo de tipo pistón de las tolvas en que un elemento de masa que entra primero, es el primero en salir. Si bien, esto no es cierto en tolvas de este tipo es una primera aproximación para plantear un modelo de resolución y predicción de ley en una tolva.

Se realizó una simulación para los días 27 y 28 de febrero y se obtuvo los resultados de la Figura 58, que se comparan con los resultados del muestreador de carga. Se puede observar que el orden de magnitud es el mismo entre ambas curvas y que hay cierta correlación en la tendencia de las curvas (máximos y mínimos), pero la precisión podría ser mejor. Para mejorarla se recomienda: mejorar el modelo de carga-descarga de una tolva, y aumentar la frecuencia de muestreo.

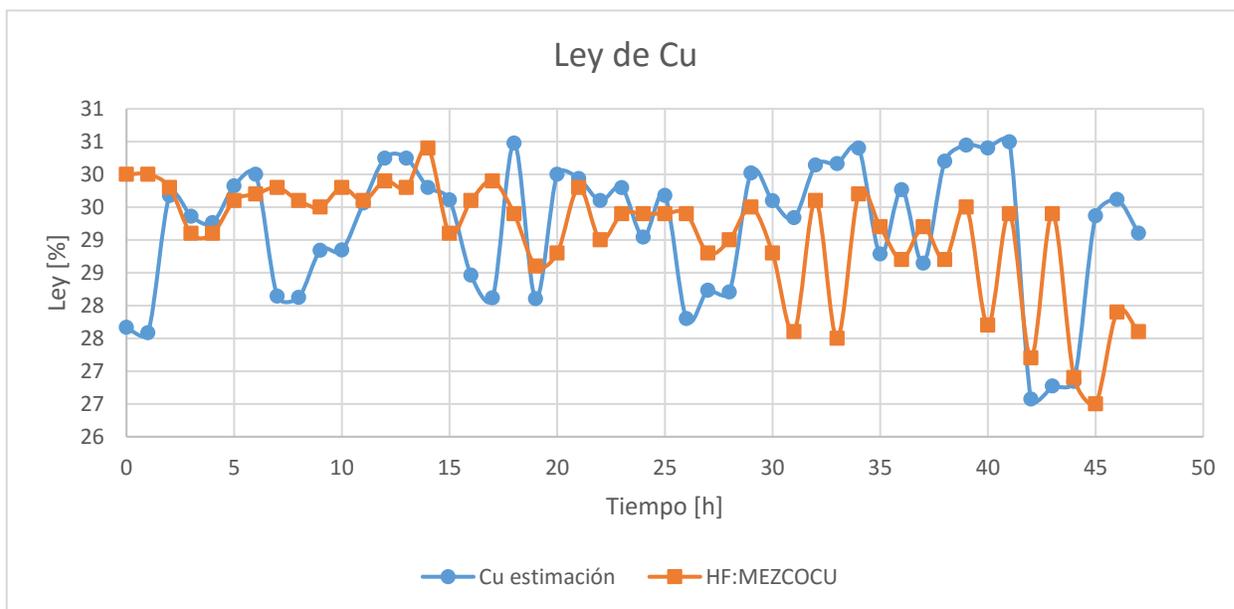


Figura 58. Simulación de ley a la salida de tolva 54.