



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“REESTRUCTURACIÓN DEL PROCESO DE REFINACIÓN Y
ESTANDARIZACIÓN DE NOMENCLATURAS PARA LA
OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS EN JOHNSON MATTHEY
DE MÉXICO”**

MEMORIAS DE TRABAJO PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO EN MATERIALES**

**PRESENTA
PABLO LEMUS FUENTES**

**DIRIGIDA POR
Dr. ARTURO VELASCO HERNÁNDEZ**

**CODIRIGIDA POR
I. Q. JULIAN ALBERTO GONZÁLEZ BERMÚDEZ**

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO., 2026.

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

“REESTRUCTURACIÓN DEL PROCESO DE
REFINACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE
NOMENCLATURAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE
RECURSOS EN JOHNSON MATTHEY DE MÉXICO”

MEMORIAS DE TRABAJO PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN MATERIALES

PRESENTA

PABLO LEMUS FUENTES

DIRIGIDA POR

Dr. ARTURO VELASCO HERNÁNDEZ

CODIRIGIDA POR

I. Q. JULIAN ALBERTO GONZÁLEZ BERMÚDEZ

SINODALES

Dr. ARTURO VELASCO HERNÁNDEZ

DIRECTOR

I. Q. JULIAN ALBERTO GONZÁLEZ BERMÚDEZ

CODIRECTOR

Dr. RAFAEL MANUEL RÍOS VERA

SINODAL

Dr. JOSÉ SANTOS CRUZ

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE QUÍMICA

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
Declaración sobre el uso de inteligencia artificial generativa.....	v
RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	4
II.1 Importancia de los metales preciosos en la industria	4
II.2 Recuperación a través de la refinación de metales preciosos.....	5
II.3 Generación de scrap en Johnson Matthey de México	6
II.4 Retos específicos del scrap líquido.....	8
II.5 Proceso de mezclas de refinación en la empresa	9
II.6 Variabilidad en el análisis químico y necesidad de análisis externos	10
II.7 Necesidad de estandarización operativa e importancia de documentación técnica actualizada.....	12
II.8 Marco normativo para sustancias peligrosas y análisis CRIT.....	13
II.9 Problemas actuales por multiplicidad de nomenclaturas y unificación como estrategia de ahorro	16
III. OBJETIVOS	18
III.1 General	18
III.2 Específicos.....	18
IV. METODOLOGÍA.....	19
IV.1 Materiales	19
IV.1.1 Procedimientos operativos y documentación interna vigente de Johnson Matthey de México.....	19
IV.1.2 Registros operativos históricos	19
IV.1.3 Herramientas aplicables.....	19
IV.1.4 Herramientas de análisis documental	19
IV.2 Métodos	19

IV.2.1 Diagnóstico del proceso de refinación	19
IV.2.2 Identificación de la problemática de nomenclaturas.....	20
IV.2.3 Análisis de requerimientos para análisis CRIT y una nomenclatura unificada.....	20
IV.2.4 Actualización del procedimiento operativo	20
IV.2.5 Estimación del impacto económico	20
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
V.1 Proceso anterior de refinación de remanentes en Johnson Matthey de México.....	21
V.2 Definición de criterios del control de proceso	22
V.4 Comparación de desviaciones de onzas de PGM entre estimación interna y refinadora (año fiscal anterior vs actual).	24
V.5 Análisis de variabilidad del proceso en términos absolutos (onzas).	26
V.6 Impacto económico de la unificación de nomenclaturas	28
V.7 Impacto global de las acciones implementadas en el último año fiscal	30
V.8 Proyectos en desarrollo y oportunidades de mejora futura	31
VI. CONCLUSIONES	33
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	35

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	PÁGINA
1. Ejemplo de la variación de la fracción másica de bromuro en una solución de NaCl (Mejía y Passolo, 2023).....	11
2. Desviaciones en diversos órdenes de proceso entre las onzas de metal calculadas y el retorno por parte de la refinadora (onzas), año fiscal 2024.....	22
3. Desviaciones en diversos órdenes de proceso entre las onzas de metal calculadas y el retorno por parte de la refinadora (onzas), año fiscal 2025.....	23
4. Proyección del gasto acumulado por análisis CRIT bajo ambos esquemas operativos.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1. Aplicaciones comunes de metal precioso en la industria (Cheng y col., 2021).....	4
2. Esquema de la clasificación del scrap y su ciclo de vida (Suzuki y Daigo, 2024)	7
3. Demanda bruta de PGM para catalizadores automotrices (Umicore, 2010)	12
4. Pictogramas oficiales de peligrosidad del Sistema Globalmente Armonizado SGA (OSHA, 2015)	15
5. Proyección del gasto económico por análisis CRIT bajo ambos esquemas operativos.....	27

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial generativa

Se utilizó ChatGPT (OpenAI, GPT-5.5) como herramienta de apoyo exclusivamente para la revisión de redacción, gramática, coherencia y estilo del manuscrito. El contenido científico, la interpretación de los resultados, el análisis crítico y la versión final del documento fueron elaborados, revisados y validados por el autor.

RESUMEN

El presente manuscrito de memorias de trabajo profesional documenta la reestructuración del proceso logístico de refinación en Johnson Matthey de México para mejorar su confiabilidad operativa y optimizar el uso de recursos utilizados en la producción de catalizadores de emisiones. El diagnóstico inicial identificó áreas de oportunidad en los parámetros de operación, variabilidad en el manejo de mezclas y una multiplicidad de nomenclaturas que incrementaban costos analíticos y reducían la trazabilidad. Se revisaron y estandarizaron las etapas del proceso, definiendo límites operativos claros, y se unificaron las mezclas bajo una nomenclatura única. Estas acciones ayudaron a fortalecer el control del proceso, reducir gastos asociados a análisis CRIT y mejorar el retorno económico al disminuir la variabilidad y asegurar un manejo más eficiente del material.

Palabras clave: *catalizadores de emisiones, refinación, metales del grupo del platino (PGM).*

I. INTRODUCCIÓN

Johnson Matthey de México es una empresa dedicada a la producción y comercialización de sistemas catalizadores, tanto móviles como fijos, destinados al control de emisiones, con el objetivo de preservar y proteger el medio ambiente. Su operación se centra en la elaboración de mezclas con contenido de metales preciosos, mediante las cuales se lleva a cabo la reacción de catálisis. La catálisis es un proceso fundamental en química e ingeniería química que permite acelerar la velocidad de las reacciones al ofrecer una vía alternativa con menores requerimientos energéticos. Este fenómeno resulta clave en numerosos procesos industriales y tiene importantes implicaciones en la producción de energía, la sostenibilidad ambiental y la síntesis de compuestos químicos de valor.

Como en cualquier proceso industrial, la operación genera scrap como subproducto inevitable del proceso de producción. Si bien es difícil eliminar completamente esta pérdida, la generación de scrap puede afectar significativamente la rentabilidad de la empresa, al incrementar costos y reducir la eficiencia operativa. En Johnson Matthey, aunque la producción de scrap se ha reducido notablemente con el tiempo, todavía representa un desafío presente. Por ello, su gestión debe realizarse de manera precisa, eficiente y sistemática, para evitar la acumulación de material no reutilizable dentro de la planta y garantizar el uso óptimo de los recursos.

En las empresas internacionales, el scrap suele asociarse con pedacería física o metales, es decir, con productos más tangibles, contables y fáciles de manejar. Sin embargo, en esta operación, que genera remanentes en estado líquido, el personal se ha enfrentado al desafío de encontrar la manera más eficiente de obtener la máxima recuperación monetaria de los metales preciosos contenidos en ellos. Estos metales son materiales clave en industrias como la automotriz, electrónica, farmacéutica y joyería, debido a su resistencia a la corrosión, estabilidad a altas temperaturas y valor estético. Su baja disponibilidad en fuentes primarias ha impulsado un creciente interés en su recuperación a partir de fuentes secundarias, como catalizadores automotrices usados, joyería desechada y residuos electrónicos.

Considerando la relevancia global de la recuperación de estos materiales, la empresa no puede dejar este tema sin una gestión estratégica y eficiente.

Con el paso de los años, el proceso de preparación de mezclas para envío a refinación ha experimentado diversas modificaciones orientadas a mejorar la precisión y eficiencia en la recuperación de metales preciosos. Históricamente, la operación presentaba pérdidas significativas debido a la dificultad para cuantificar correctamente el contenido metálico en los remanentes líquidos posteriores a la evaporación, lo que generaba variaciones considerables entre los valores estimados y los resultados reales obtenidos durante la refinación. En la actualidad, dichas desviaciones se han reducido de manera sustancial gracias a mejoras implementadas en la ejecución del proceso. No obstante, aún persiste la necesidad de consolidar prácticas consistentes y reproducibles, de forma que se eviten variaciones operativas y se mantenga el aprovechamiento óptimo de los recursos involucrados.

Además de las mejoras implementadas en el proceso, cada mezcla destinada a refinación requiere de una logística específica que involucra transporte, envíos y trámites aduanales. Debido a que se trata de sustancias químicas potencialmente peligrosas, es obligatorio cumplir con requisitos normativos que garanticen un traslado seguro.

Para asegurar la integridad operativa, se realizan de manera periódica análisis CRIT (Corrosivo, Reactivo, Inflamable y Tóxico). Este procedimiento permite identificar si un residuo presenta alguna de estas características. En el área de refinación, la toxicidad es un riesgo frecuente debido al uso de compuestos químicos que, incluso en bajas concentraciones, pueden causar daños a la salud humana y al medio ambiente.

Considerando que la empresa maneja diversas mezclas con composiciones y nombres distintos, cada una requiere su propio análisis, ya que puede contener diferentes concentraciones de metales y sustancias. Desde la perspectiva logística, reducir la cantidad de análisis individuales contribuye a disminuir costos y tiempos, además de simplificar la gestión.

Por lo tanto, la unificación y estandarización de mezclas representa una estrategia viable para optimizar recursos y reducir riesgos, tema que se abordará en esta memoria de trabajo profesional.

II. ANTECEDENTES

II.1 Importancia de los metales preciosos en la industria

Los metales preciosos son considerados materiales estratégicos en diversos sectores industriales debido a sus propiedades fisicoquímicas únicas, que les confieren características muy valoradas como alta resistencia a la corrosión, estabilidad frente a temperaturas elevadas y destacada actividad catalítica. Entre estos, los metales del grupo del platino (PGMs, por sus siglas en inglés), que incluyen al platino, paladio, iridio, rutenio, rodio y el osmio, tienen especial importancia debido a su escasez en la naturaleza y su elevado valor económico en el mercado global.

En el ámbito de la catálisis industrial, los PGMs son ampliamente utilizados gracias a su estructura electrónica particular, que les permite interactuar de manera eficiente con las moléculas reactantes. Los orbitales *d* parcialmente llenos facilitan la adsorción de los reactivos y la formación de enlaces de coordinación, disminuyendo la energía de activación necesaria y promoviendo la conversión química de manera más rápida y eficiente. Estas propiedades hacen que los PGMs sean esenciales en procesos industriales críticos, como la producción de catalizadores automotrices, la síntesis de compuestos químicos de alto valor, ejemplos de la Figura 1, y aplicaciones electrónicas y farmacéuticas (Cheng y col., 2021).

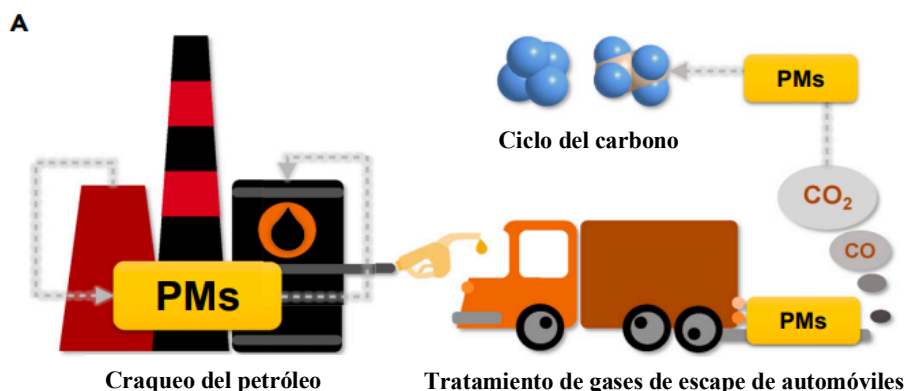


Figura 1. Aplicaciones comunes de metales preciosos en la industria (Cheng y col., 2021).

II.2 Recuperación a través de la refinación de metales preciosos

Al tratarse de metales preciosos, su recuperación resulta fundamental desde perspectivas ambiental, económica y estratégica. En los últimos años, la industria ha intensificado los esfuerzos por recuperar estos recursos a partir de fuentes secundarias, ya que la extracción primaria se ha vuelto más compleja y costosa debido a su baja disponibilidad en yacimientos naturales. En este sentido, el reaprovechamiento de materiales residuales y subproductos industriales se ha convertido en una estrategia altamente valorada.

Los metales del grupo del platino (PGMs) constituyen recursos particularmente escasos, presentes de forma significativa en desechos metálicos, residuos electrónicos y catalizadores automotrices fuera de servicio. Su refinación permite reincorporarlos a la economía con gran eficiencia, reduciendo el costo asociado a procesos extractivos y mitigando impactos ambientales (Xolo, 2021).

En el área de Refinación de Johnson Matthey de México, esta actividad adquiere especial relevancia, ya que forma parte de un enfoque orientado a maximizar el aprovechamiento de los recursos disponibles en planta. Al optimizar el tratamiento de este tipo de residuos, la empresa no solo incrementa la eficiencia operativa, sino que también mejora su desempeño ambiental. La adecuada valorización de estos materiales disminuye la generación de desechos peligrosos, fomenta la economía circular y fortalece la imagen de responsabilidad corporativa, altamente demandada por el mercado actual.

El proceso de recuperación de dichos metales se puede llevar a cabo principalmente de dos maneras: procesos pirometalúrgicos y procesos hidrometalúrgicos. Ambos procesos conllevan cambios de energía intensivos, y se puede llegar a obtener una recuperación superior al 90% del metal contenido.

En términos generales, la recuperación de los metales del grupo del platino presentes en convertidores catalíticos usados se desarrolla mediante una serie de etapas definidas. Estas comprenden:

- a) el desmontaje del componente,
- b) un acondicionamiento o tratamiento previo del material,
- c) la extracción química de los metales mediante procesos de lixiviación,
- d) la separación selectiva de los elementos valiosos contenidos en la solución concentrada,
- e) purificación, y
- f) obtención final de PGM, (Xolo, 2021).

II.3 Generación de scrap en Johnson Matthey de México

En cualquier proceso industrial, la generación de scrap es un fenómeno inevitable. Este término abarca todos aquellos materiales residuales que, por diversas razones, no pueden reincorporarse directamente al proceso o al producto final. En la industria metalúrgica, el scrap se genera a lo largo de todo el ciclo de vida de un metal y puede clasificarse principalmente en dos tipos: scrap nuevo y scrap viejo.

El scrap viejo proviene de productos que han llegado al final de su vida útil y que son reciclados después de los procesos de gestión de residuos; también suele denominarse material postconsumo o chatarra obsoleta.

Por otro lado, el scrap nuevo se origina durante los propios procesos industriales, antes de que el producto final sea utilizado. Este tipo incluye materiales sobrantes de manufactura, recortes o excedentes generados en etapas de producción, y a menudo puede reincorporarse al mismo proceso o reutilizarse en otros metales.

Esta clasificación permite diferenciar entre los residuos derivados del consumo final y aquellos que surgen internamente durante la fabricación, lo que es esencial para establecer estrategias de recuperación y reciclaje más precisas. La Figura 2 resume en un esquema la clasificación del scrap y su ciclo de vida (Suzuki y Daigo, 2024).

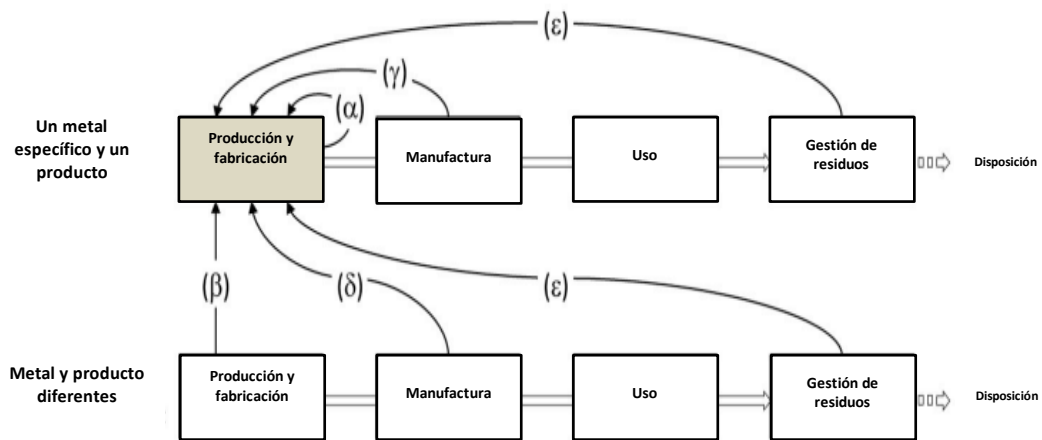


Figura 2. Esquema de la clasificación del scrap y su ciclo de vida (Suzuki y Daigo, 2024).

Las causas para la generación de scrap pueden ser variadas; en el caso de Johnson Matthey de México, la generación de residuos líquidos está relacionada con factores como falta de producción, reglas de reúso del material, lotes demasiado pequeños, contaminaciones de línea, entre otros motivos menos frecuentes.

A diferencia del scrap convencional en estado sólido, la empresa presenta una particularidad: los residuos son líquidos y contienen metales preciosos integrados en mezclas complejas con otros componentes. Esto hace que la generación de scrap pueda ocupar un volumen considerable. Para optimizar el manejo de estos residuos, la evaporación de las mezclas se ha convertido en una estrategia clave. Este procedimiento permite una reducción importante en el volumen que se requiere para su almacenamiento y manejo, además de resultados más confiables relacionados a la cantidad de sólidos contenidos en las muestras que se toman para los análisis que determinan la cantidad de metal contenido, y, por ende, las ganancias económicas.

Como resultado, la evaporación contribuye a mejorar la linealidad en el proceso de refinación y a reducir pérdidas en los órdenes de proceso, asegurando un aprovechamiento más eficiente de los recursos y una mayor confiabilidad en la operación.

II.4 Retos específicos del scrap líquido

El manejo del scrap líquido representa uno de los mayores desafíos dentro de los procesos industriales de recuperación y refinación de metales. A diferencia del scrap sólido, su naturaleza fluida y heterogénea implica dificultades tanto en su almacenamiento como en su caracterización analítica. En la industria metalúrgica y química, estos residuos suelen contener mezclas complejas de metales disueltos, compuestos orgánicos, sales y subproductos de reacción, lo que complica su tratamiento y recuperación (Hu y col., 2020).

Uno de los principales retos es la variabilidad en la composición química. Incluso dentro de un mismo proceso, las corrientes líquidas pueden presentar fluctuaciones considerables en la concentración de metales preciosos, el pH y la presencia de impurezas. Esta falta de homogeneidad dificulta la aplicación de métodos estandarizados de refinación y aumenta la incertidumbre en los análisis cuantitativos. Para minimizar estos efectos, una estrategia efectiva es implementar, desde las primeras etapas del proceso, la evaporación de remanentes, que permite reducir significativamente el volumen, aumentar la concentración metálica y mejorar tanto la precisión analítica como la eficiencia de recuperación (Binnemans y col., 2020).

Por otro lado, al tratarse de mezclas líquidas homogéneas de gran volumen, la imposibilidad de estimar visualmente su contenido metálico exige la realización de análisis de calidad que permitan determinar con precisión las concentraciones de metales preciosos y otros componentes potencialmente peligrosos. Estos análisis son esenciales no solo para definir el valor económico del material, sino también para garantizar la seguridad del personal operativo durante el manejo y transporte de las muestras.

La concentración previa de las mezclas mediante evaporación facilita, además, una detección metálica más eficiente. A pesar de los controles internos implementados, que incluyen el análisis cuantitativo de las muestras, suele ser necesario enviar parte del material a un laboratorio secundario para corroborar los resultados obtenidos. La confiabilidad en la determinación de concentraciones metálicas depende en gran

medida de la calidad del análisis cuantitativo. Según la definición establecida por la IUPAC, este tipo de análisis comprende los procedimientos mediante los cuales se determina o estima la cantidad o concentración de un analito, expresándola numéricamente en unidades apropiadas. Obtener resultados exactos y reproducibles no solo depende del instrumento o del método utilizado, sino también de la comprensión y control de todos los procesos involucrados en la detección y cuantificación de la señal analítica. Por ello, cuando se trata de materiales con alto contenido de metales valiosos, la verificación mediante un laboratorio independiente constituye una práctica indispensable para asegurar la exactitud de los resultados (Bulska y Wagner, 2016).

II.5 Proceso de mezclas de refinación en la empresa

Al tratarse de una operación que requiere un alto consumo de agua para los lavados de tanques, la generación de remanentes líquidos es un fenómeno inevitable. En particular, los residuos provenientes del lavado de mezclas elaboradas con washcoat tienden a acumularse de forma exponencial, ya que no todos pueden reincorporarse al proceso productivo. Si bien el objetivo de la empresa es siempre maximizar el aprovechamiento de materiales y recursos —buscando obtener la mayor ganancia posible—, las condiciones del proceso y la naturaleza del scrap líquido limitan la posibilidad de su reúso.

Con el fin de mantener la continuidad operativa y evitar la saturación de espacios de almacenamiento, resulta indispensable contar con un área específica dedicada al manejo y control de los remanentes líquidos. Esta gestión permite no solo optimizar el flujo del proceso, sino también asegurar un tratamiento adecuado de los residuos que, por sus características químicas o composición, no pueden reincorporarse directamente a la producción.

Dado que los remanentes líquidos presentan un alto contenido de agua, una estrategia efectiva consiste en reducir su volumen y concentrar las mezclas mediante procesos de evaporación. Durante este tratamiento, el mecanismo termodinámico

favorece la volatilización exclusiva del agua, ya que los complejos metálicos formados por los metales del grupo del platino (PGM) poseen una elevada estabilidad térmica y no alcanzan presiones de vapor significativas a las temperaturas típicas de evaporación ($\approx 100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

De acuerdo con estudios de análisis térmico diferencial, diversos complejos de platino comienzan su descomposición a temperaturas superiores a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ y no muestran volatilización apreciable en condiciones húmedas de baja temperatura. En consecuencia, una evaporación controlada cercana a los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ permite eliminar gradualmente el agua, concentrando así los componentes sólidos y, en particular, los metales preciosos presentes en la mezcla (Hernández y col., 1983).

Al eliminar el exceso de agua mediante evaporación, la fracción sólida de la mezcla aumenta significativamente, mientras que el volumen total disminuye. Este proceso permite obtener mezclas más concentradas en contenido metálico, facilitando posteriormente la integración de “mezclas de mezclas” con una proporción elevada de metales preciosos gracias a la concentración previa alcanzada.

II.6 Variabilidad en el análisis químico y necesidad de análisis externos

En procesos que involucran la recuperación de metales preciosos, la exactitud en las mediciones resulta fundamental. A pesar de trabajar internamente bajo condiciones controladas y con resultados cuantitativos muy confiables, estos siempre pueden presentar una variación que puede darse por diversos motivos, tales como la diferencia en la preparación de muestras, condiciones ambientales diferentes, calibración de los equipos, métodos empleados e incluso la intervención de varios analistas (Barwick y Ellison, 1999).

Aunque los resultados obtenidos en un mismo laboratorio muestren similitud, esto no garantiza su exactitud. El consenso entre distintos análisis puede llegar a ser engañoso cuando los laboratorios usan metodologías similares. El error sistemático puede aparecer. Como claro ejemplo, en un estudio de comparación internacional,

la mayoría de los laboratorios sobreestimó la pureza del aldrín al no detectar una impureza relevante, mientras que solo unos pocos lograron el valor correcto (Mejía y Passolo, 2023).

Cuadro 1. Ejemplo de la variación de la fracción másica de bromuro en una solución de NaCl (Mejía y Passolo, 2023).

LABORATORY	$w/(mg/kg)$	$u(w)/(mg/kg)$
KRISS	2.120	0.160
INTI	2.140	0.090
UME	2.820	0.120
SMU	2.940	0.360
NIMT	2.942	0.049
PTB	3.150	0.080
NIM	3.186	0.065
NRC	3.297	0.024
GUM	3.299	0.098
NMIJ	3.350	0.110
CENAM	4.000	0.700

En el caso particular del análisis de los metales preciosos, donde las concentraciones suelen ser bajas y un alto valor económico, pequeñas desviaciones podrían significar pérdidas/ganancias considerables. Es por esto por lo que, actualmente se ha tomado una acción específica para reducir exponencialmente la pérdida que pueda llegar a generar el análisis erróneo de las mezclas. Antes de enviar una mezcla a refinación, cada lote pasa por un análisis interno y otro externo, realizado por un laboratorio que actúa como nexo entre la empresa y la refinadora. De este modo, ambas instancias utilizan los resultados de dicho laboratorio como referencia adicional a sus propios procedimientos de análisis.

Según los datos recopilados, previo a la estandarización del proceso de mezclas de refinación y a la inclusión del análisis externo, la desviación entre el metal esperado y el determinado por la refinadora oscilaba entre un 15% y un 25% por metal. Sin

embargo, tras la implementación de estas medidas y la colaboración con el laboratorio externo, las desviaciones se han reducido considerablemente, situándose en la mayoría de los casos entre el 3% y 8%.

II.7 Necesidad de estandarización operativa e importancia de documentación técnica actualizada.

Con el paso de los años, el consumo de los metales del grupo del platino (PGM's) ha mostrado un crecimiento sostenido. Buena parte de este aumento está ligado a la demanda creciente de auto catalizadores en la industria automotriz, como se demuestra en la Figura 3. Este comportamiento no solo ha elevado la presión sobre las cadenas de suministro, sino que también ha hecho que cada gramo procesado tenga un valor económico considerable. Bajo este escenario, cualquier desviación operativa que no esté bien controlada adquiere un impacto mucho mayor del que podría tener en otras industrias o materiales de menor valor.

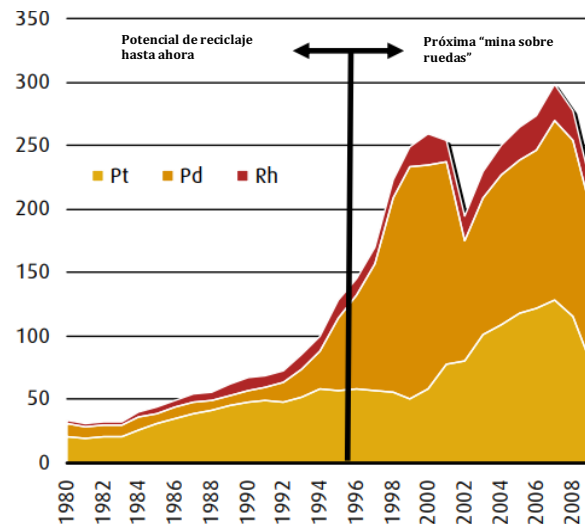


Figura 3. Demanda bruta de PGM para catalizadores automotrices (Umicore, 2010).

Este contexto refuerza la necesidad de contar con una estandarización operativa real y actualizada. Documentar los procedimientos no es solo una formalidad: es una herramienta que permite asegurar la trazabilidad, mejorar la reproducibilidad y tener

mayor certeza en los resultados. Cuando el material tiene un valor tan alto, la precisión deja de ser un objetivo deseable para convertirse en una obligación. La falta de procedimientos claros abre la puerta a pérdidas pequeñas pero constantes, que con el tiempo pueden representar cantidades significativas de metal no recuperado. Además, dificulta la cuantificación del metal contenido y genera huecos en la trazabilidad. Estudios recientes muestran que, en refinerías de oro y metales del grupo del platino, la falta de controles consistentes de proceso es una de las causas más comunes de pérdidas “no explicadas”, especialmente cuando los operadores ejecutan tareas basándose en prácticas heredadas o conocimiento empírico, sin un marco documental formal. Muchos desbalances en el proceso tienen como origen discrepancias en operaciones aparentemente rutinarias, las cuales de una en una pueden acumular pérdidas de muchos gramos al mes (Mooiman, 2021). En este sentido, contar con procedimientos operativos bien definidos y permanentemente actualizados permite reducir la variabilidad asociada a la intervención humana. Al establecer límites claros de tolerancia de parámetros como temperaturas, concentraciones, volúmenes, tasas de adición, etc., ayuda a detectar en etapas tempranas posibles errores, antes de que se agudice un posible impacto económico.

II.8 Marco normativo para sustancias peligrosas y análisis CRIT

En una operación de refinación de metales preciosos, el manejo de sustancias peligrosas resulta una actividad frecuente, que requiere de un marco normativo sólido. Los reactivos principales, además de los residuos y subproductos que conforman las mezclas pueden presentar características peligrosas que, si no se manejan correctamente, pueden representar un riesgo para el personal. Debido a esto, la parte normativa en el procedimiento no puede en ninguna circunstancia verse como un requisito aislado, sino como un componente que influye directamente en la seguridad general del proceso.

En México, uno de los pilares regulatorios para este tipo de actividades, es la NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece los criterios para determinar si un residuo debe considerarse peligroso. Para ello, obliga a evaluar mediante el análisis CRIT, que es el acrónimo de clasificación de las características a identificar y que significa: corrosivo, reactivo, inflamable y tóxico ambiental.

Los residuos corrosivos suelen ser sustancias altamente ácidas o básicas. Su pH es menor a 2 unidades o mayor a 12.5. Si se clasifica como tal, este puede causar daños a piel y ojos, así como estructuras por donde se transporte dicho material.

Los reactivos están relacionados a si son inflamables al tener contacto con el aire en un lapso de 5 minutos. Pueden presentarse en estado sólido, líquido y gaseoso, y al ponerse en contacto con el agua de igual manera pueden generar gases inflamables. Los residuos pueden explotar, incendiarse, emitir gases tóxicos si se manejan de manera incorrecta.

Los reactivos inflamables son líquidos o una mezcla de líquidos que tienen un punto de inflamación inferior a los 60.5 °C, un sólido que puede generar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos a 25 °C. Su combustión puede generar llamas y humo tóxico, así como provocar explosiones. Algunas de estas características están bien descritas y señalizadas en el Sistema Globalmente Armonizado, como los tres ejemplos de pictogramas mostrados en la Figura 4 (OSHA, 2015).

Este análisis es particularmente importante porque muchas de las soluciones en cuestión cuentan con materia prima que pueden definir el residuo como peligroso. El residuo se clasifica de dicha manera si presenta al menos una de las siguientes características: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad ambiental, inflamabilidad, biológico-infecciosa. (SEMARNAT, 2005).



Figura 4. Pictogramas oficiales de peligrosidad del Sistema Globalmente Armonizado SGA (OSHA, 2015).

Además de ser una medida de seguridad para el manejo de las sustancias, el análisis CRIT resulta de suma importancia como un instrumento de mejora operativa. Cuando un residuo clasifica como peligroso por una o más características, esto puede evidenciar fallas en el proceso. En casos como estos, su aplicación correcta permite rediseñar procedimientos para reducir la peligrosidad, optimizar al máximo el consumo de reactivos y recuperar fracciones valiosas de metal, lo que beneficia seguridad y costos operativos.

II.9 Problemas actuales por multiplicidad de nomenclaturas y unificación como estrategia de ahorro

Derivado del marco regulatorio descrito previamente, particularmente de los requisitos establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005 para la caracterización de materiales mediante el análisis CRIT, surge un reto operativo relevante dentro de la refinación de metales preciosos: la multiplicidad de nomenclaturas asignadas a las distintas mezclas procesadas. Durante años, la designación del nombre se ha basado en los metales presentes, lo que ha generado un esquema amplio y fragmentado de denominaciones internas.

Esta multiplicidad no solo genera posibles confusiones y pérdida en la trazabilidad, sino también un impacto económico directo debido a los requisitos regulatorios. Cada nombre distinto asignado a una mezcla obliga a realizar un análisis CRIT independiente. Dado que cada uno de estos análisis tiene costos altos, de aproximadamente \$12,000 cada uno, la existencia de múltiples denominaciones implica una repetición de gastos analíticos que podrían evitarse o, cuando menos, disminuir exponencialmente mediante una nomenclatura unificada. A mayor número de nombres, mayor número de análisis.

Actualmente, un análisis CRIT brinda validez regulatoria por un periodo de seis meses; por lo tanto, cada nomenclatura requiere dos análisis al año. Si se considera que actualmente existen seis nombres distintos, la carga económica se multiplica año tras año de forma innecesaria. En este contexto, la unificación de todas las mezclas bajo un solo nombre no solo simplifica la estructura operativa, sino que representa una estrategia directa de ahorro.

La estandarización permitiría documentar todas las mezclas bajo una denominación única, independiente de los metales específicos involucrados, eliminando la necesidad de realizar análisis CRIT repetitivos para mezclas cuyo perfil de peligrosidad es, en esencia, equivalente. Con un nombre unificado, un solo análisis sería suficiente para cubrir el conjunto completo de materiales procesados, siempre que sus características de peligrosidad se mantengan dentro del mismo rango.

En una operación donde los análisis especializados son costosos y donde cada gasto debe justificarse con precisión, la simplificación de la nomenclatura se posiciona como una herramienta eficiente para disminuir el gasto operativo. Además de la reducción económica, la unificación fortalece la trazabilidad, mejora la comunicación entre áreas y disminuye la probabilidad de errores administrativos o documentales, ofreciendo un beneficio integral para toda la operación.

III. OBJETIVOS

III.1 General

Optimizar el proceso de refinación de scrap líquido en Johnson Matthey de México mediante la reestructuración operativa y documental del procedimiento, así como la estandarización de las mezclas de refinación y reducir costos asociados al análisis CRIT.

III.2 Específicos

- Documentar detalladamente el proceso actual de refinación.
- Evaluar las variaciones y problemáticas derivadas de la multiplicidad de nomenclaturas.
- Diseñar una nomenclatura unificada para las mezclas de refinación.
- Analizar el impacto económico de la unificación de nomenclaturas.

IV. METODOLOGÍA

IV.1 Materiales

IV.1.1 Procedimientos operativos y documentación interna vigente de Johnson Matthey de México

Se utilizará documentación clasificada de recepción/envío de mezclas, procedimientos de preparación de mezclas de refinación, pesajes y registros, procesamiento químico para evitar transporte de material peligroso y manejo de residuos químicos.

IV.1.2 Registros operativos históricos

Resultados históricos de análisis CRIT previos, bitácoras de adiciones de materia prima, reportes de mezclas, hojas de verificación y de operación.

IV.1.3 Herramientas aplicables

- NOM-052-SEMARNAT-2005 (clasificación de residuos peligrosos)
- NOM-005-STPS-1998 (manejo de sustancias químicas peligrosas)
- Políticas internas de seguridad, medio ambiente y calidad (SHEQ) de la planta.

IV.1.4 Herramientas de análisis documental

Uso de inventarios, sistema de gestión de recetas único de la empresa y el sistema SAP, un sistema integrado de planificación de recursos empresariales (ERP, Enterprise Resource Planning).

IV.2 Métodos

IV.2.1 Diagnóstico del proceso de refinación

Se efectuará un análisis detallado del proceso de refinación analizando los siguientes puntos:

- Observación directa en planta del proceso completo de refinación
- Revisión de procedimientos vigentes

- Análisis histórico de desviaciones en el proceso
- Interacción con el personal encargado para compartir experiencias pasadas

IV.2.2 Identificación de la problemática de nomenclaturas

Se realizará un análisis exhaustivo de todas las mezclas que se han generado históricamente, identificando puntos clave como:

- Frecuencia de mezclado y envío
- Resultados de análisis CRIT realizados para dichas mezclas
- Frecuencia de análisis CRIT
- Costo asociado de cada análisis

IV.2.3 Análisis de requerimientos para análisis CRIT y una nomenclatura unificada

Con base en la normativa vigente, se revisarán:

- Criterios de clasificación de residuos peligrosos
- Vigencia de los análisis
- Compatibilidad entre metales presentes para análisis cuantitativos representativos
- Perfil de peligrosidad
- Requerimientos adicionales de seguridad

IV.2.4 Actualización del procedimiento operativo

Se integrarán cambios estructurales en el proceso de refinación de manera física y documental. Se incorporarán nuevas nomenclaturas, criterios de clasificación, mejoras operativas para garantizar un proceso más uniforme, documentación del proceso actualizada, parámetros reforzados para una mejor trazabilidad en el sistema ERP, con el objetivo de asegurar un control más eficiente y confiable.

IV.2.5 Estimación del impacto económico

Se realizará un análisis comparativo entre los costos actuales de análisis CRIT con todas las nomenclaturas analizadas vs el costo con la unificación de dichas nomenclaturas. Adicionalmente, un análisis de la fluctuación entre ganancias y pérdidas del proceso de refinación previo a la implementación de la reestructuración.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V.1 Proceso anterior de refinación de remanentes en Johnson Matthey de México.

El proceso de refinación previo en la empresa Johnson Matthey se basaba en la gestión y concentración de remanentes líquidos provenientes de distintas operaciones. Inicialmente, se realizaba una selección de materiales en función de su acumulación u obsolescencia, los cuales posteriormente eran enviados a una etapa de mezcla.

En esta etapa, diferentes corrientes de scrap líquido eran combinadas sin una segregación estricta por tecnología o contenido metálico, generando mezclas altamente heterogéneas. Posteriormente, dichas mezclas eran sometidas a un proceso de evaporación para remover agua, incrementar el contenido de sólidos y reducir el volumen total, facilitando su almacenamiento en contenedores de mayor capacidad.

Este enfoque presentaba limitaciones importantes, ya que la mezcla indiscriminada de materiales generaba alta variabilidad en la composición y sesgos en la determinación del contenido de metales del grupo del platino (PGM). Además, la existencia de múltiples denominaciones de mezclas incrementaba la complejidad operativa, requiriendo diversos análisis CRIT para cada envío a refinación.

En términos analíticos, la caracterización del material se basaba únicamente en resultados internos de control de calidad mediante ICP, sin validación externa, lo que podía impactar la trazabilidad y confiabilidad de los resultados.

Consideraciones de confidencialidad:

Por motivos de confidencialidad industrial y de propiedad intelectual, no es posible describir en este documento, de manera detallada, el proceso completo de refinación ni especificar condiciones operativas, tales como: composición de corrientes, metales involucrados, reactivos utilizados, temperaturas, presiones, tiempos de operación o configuraciones de equipo. No obstante, la descripción general presentada permite comprender la lógica del proceso y sus principales implicaciones desde el punto de vista de la ingeniería.

V.2 Definición de criterios del control de proceso

Con el objetivo de evaluar de manera objetiva el desempeño del proceso de refinación y su evolución en el tiempo, fue necesario establecer criterios y controles de calidad claros, consistentes y sostenibles. Estos se definieron considerando factores clave como el valor económico del material, la seguridad operativa y la variabilidad histórica del proceso.

Una de las principales modificaciones consistió en la incorporación de mezclas intermedias, elaboradas a partir de remanentes de la misma tecnología. Esta estrategia permitió homogenizar el material antes de las etapas críticas, reduciendo la variabilidad desde fases tempranas del proceso. Asimismo, facilitó la alineación con el departamento de calidad, ya que el uso de sus curvas de calibración existentes contribuyó a mejorar la precisión de los resultados analíticos.

Adicionalmente, se implementó la verificación final de los resultados mediante un laboratorio externo, con el propósito de corroborar los valores obtenidos internamente y fortalecer la confiabilidad del proceso.

Por otra parte, se estableció una reducción en la cantidad total de material procesado por orden. Anteriormente, se evaporaban múltiples mezclas con nomenclaturas diversas hasta acumular volúmenes elevados, del orden de 5 a 8 toneladas. En contraste, el esquema actual (modificado) mantiene el uso de mezclas intermedias de remanentes de la misma tecnología, pero limita la acumulación de la mezcla final a un rango de 2 a 3 toneladas. Este ajuste ha permitido disminuir la desviación en los resultados y mejorar la trazabilidad de los PGM dentro del sistema.

Dado que los metales involucrados poseen un alto valor de mercado —donde una sola onza puede representar pérdidas económicas de miles de dólares—, se determinó que incluso variaciones aparentemente pequeñas resultan críticas para el desempeño global del proceso. En este contexto, se estableció como criterio de control interno una desviación máxima admisible de ± 2 onzas por orden de proceso; a partir de este umbral, el proceso se considera fuera de control en términos absolutos y con un impacto económico significativo.

En paralelo, se implementaron criterios estequiométricos para el cálculo y ajuste de los reactivos empleados en la neutralización de componentes presentes en el material. Este control permitió mitigar riesgos asociados al manejo y transporte, además de facilitar el cumplimiento de los requisitos normativos para la clasificación de materiales peligrosos, en concordancia con el análisis CRIT.

V.3 Proceso modificado de refinación de remanentes en Johnson Matthey de México

A partir del análisis del proceso original, se implementaron modificaciones orientadas a mejorar la trazabilidad, reducir la variabilidad en las mezclas y aumentar la confiabilidad de los resultados analíticos.

El proceso modificado introduce una etapa de clasificación y segregación previa, en la cual los remanentes líquidos se organizan de acuerdo con su tecnología de origen y tipo de metales contenidos. A diferencia del proceso anterior, donde se realizaba una mezcla indiscriminada de tecnologías, esta estrategia permite generar materiales más homogéneos y representativos.

Posteriormente, las mezclas se llevan a cabo bajo criterios de compatibilidad definidos y se someten a evaporación para concentrar sólidos y reducir volumen, manteniendo un mayor control sobre la composición final. En contraste con el esquema previo, se redujo la cantidad de denominaciones de mezclas, lo que simplifica su manejo y disminuye la necesidad de múltiples análisis CRIT.

Desde el punto de vista analítico, mientras que el proceso anterior dependía exclusivamente de resultados internos de control de calidad mediante ICP, el proceso modificado se orienta a una mayor robustez en la validación de datos, contribuyendo a mejorar la trazabilidad y reducir el sesgo en la determinación de metales del grupo del platino (PGM). Además, existe un mayor control al haber implementado de manera consistente una sección en el proceso donde se evita rotundamente el riesgo de que las mezclas transportadas sean peligrosas; a través de estequiometría se calcula la cantidad exacta de un reactivo para neutralizar el contenido de un elemento muy reactivo que contienen la mayoría de las mezclas.

En conjunto, el proceso optimizado presenta una menor variabilidad, mayor control operativo y mejor confiabilidad analítica en comparación con el proceso original.

V.4 Comparación de desviaciones de onzas de PGM entre estimación interna y refinadora (año fiscal anterior vs actual).

En este apartado se presentan las desviaciones, expresadas en onzas troy (TOZ), entre los valores estimados internamente y los resultados reportados por la refinadora externa para los metales considerados en el proceso.

El análisis abarca dos periodos: el año fiscal anterior, correspondiente a la operación previa a la reestructuración del proceso, y el año fiscal actual, en el que se han implementado de manera progresiva diversas modificaciones al proceso interno.

Las desviaciones permiten evaluar directamente la diferencia entre el metal estimado y el metal efectivamente recuperado. Para cada orden de proceso, se calculó la diferencia entre ambos valores, y los resultados se agruparon de acuerdo con el periodo fiscal correspondiente, facilitando su comparación y análisis.

En el Cuadro 2 se presentan las desviaciones en TOZ (Troy Ounce, equivalente a 31.1035 gramos) de los metales contenidos en las mezclas enviadas a refinación durante el año fiscal 2024. De manera análoga, en el Cuadro 3 se muestran las desviaciones correspondientes al año fiscal 2025.

Una desviación positiva indica una ganancia de material, es decir, que la cantidad de metal recuperado fue mayor a la estimada; mientras que una desviación negativa representa una pérdida, donde la cantidad recuperada fue inferior a la esperada.

Cuadro 2. Desviaciones en diversas órdenes de proceso entre las onzas de metal calculadas y el retorno por parte de la refinadora (onzas), año fiscal 2024.

ORDEN DE PROCESO	DESVIACIÓN (TOZ) METAL "A"	DESVIACIÓN (TOZ) METAL "B"	DESVIACIÓN (TOZ) METAL "C"
1	3.049	26.398	0
2	-1.878	-27.888	0.186
3	2.094	3.038	0
4	1.048	2.211	0.32
5	-0.784	1.561	0.2
6	0.475	7.333	0.561
7	1.521	-1.512	-2.871
8	0.506	6.735	0
9	-0.753	4.942	0
10	0	8.854	0
11	1.86	-2.848	0.133
12	0.676	2.765	0.122
13	0.403	-0.715	0
14	3.74	-2.201	0.292
15	3.978	-11.264	0.402
16	1.745	-0.939	-2.148

Cuadro 3. Desviaciones en diversas órdenes de proceso entre las onzas de metal calculadas y el retorno por parte de la refinadora (onzas), año fiscal 2025.

ORDEN DE PROCESO	DESVIACIÓN (TOZ) METAL "A"	DESVIACIÓN (TOZ) METAL "B"	DESVIACIÓN (TOZ) METAL "C"
1	0	1.018	-2.381
2	1.448	-1.067	-3.524
3	1.226	-1.823	-1.311
4	1	1.384	1.582
5	0.749	-5.613	-0.52

6	0.758	-2.051	-0.14
7	-1.5	-0.4	-0.3
8	-2.9	-1.4	0.6

V.5 Análisis de variabilidad del proceso en términos absolutos (onzas).

Con el fin de analizar el comportamiento real del proceso de refinación, se utilizó un análisis comparativo entre las desviaciones en términos absolutos (onzas) por orden de proceso en el año fiscal anterior y el actual.

Para efecto de este análisis, se estableció como criterio de control una desviación máxima admisible de ± 2 onzas por orden de proceso. Este umbral se determinó considerando el alto valor económico del material, donde variaciones de dicha magnitud representan una pérdida o ganancia significativa.

Durante el año fiscal anterior, en 19 de un total de 48 evaluaciones, las desviaciones excedieron el límite establecido, lo que corresponde a un 39.58% de los casos. Este resultado evidencia una elevada variabilidad en el proceso de estimación y refinación. La desviación más significativa se presentó en la orden de proceso correspondiente a la mezcla 2 para el metal B, con una variación de -27.888 onzas.

En contraste, tras la implementación de las mejoras en el proceso de refinación, durante el año fiscal actual únicamente 5 de 24 evaluaciones presentaron desviaciones fuera del rango admisible, lo que representa una reducción al 20.8%. Aunque se observaron desviaciones fuera del criterio establecido, la mayor de ellas correspondió a la mezcla 5 para el metal B, con una variación de -5.613 onzas, considerablemente menor en magnitud respecto al periodo anterior.

Estos resultados indican una disminución sustancial en la variación y en la frecuencia con las que se presenta, reflejando ya una mayor estabilidad en el proceso tras los cambios implementados.

Dado que cada orden de proceso se costea internamente a partir de la estimación de metal declarada previo a su envío a refinación, cualquier desviación entre dicha

estimación y el retorno real de la refinadora se traduce directamente en una ganancia o pérdida económica. En este sentido, la variabilidad del proceso no solo representa una desviación técnica, sino un riesgo financiero real.

Para dimensionar el impacto real de las desviaciones observadas en ambos periodos, las variaciones en onzas fueron convertidas a su equivalente económico. Para ello, se utilizaron los precios promedio por onza registrado entre abril 2024 y marzo 2025 (año fiscal anterior). Considerando valores de:

- \$ 975.57 USD/oz para el metal A
- \$ 987.88 USD/oz para el metal B
- \$ 4,746.92 USD/oz para el metal C

Durante el año fiscal anterior, el valor económico absoluto de todas las desviaciones, las pérdidas y ganancias no presupuestadas ascendieron a 168,064 USD, lo que refleja el impacto financiero de la inestabilidad del proceso.

En contraste, tras la implementación de los cambios, el año fiscal actual mostró mejoras sustanciales: el impacto económico total se redujo a 94,668 USD, lo que representa una disminución aproximada de 73,396 USD en pérdidas o ganancias no presupuestadas respecto al año anterior.

Al separar la información por tipo de metal, se puede ver que la mayor parte de la variabilidad proviene del Metal C, con un total de 10.358 onzas desviadas, lo que representa aproximadamente 65,153 USD (cerca del 69% del total). Esto refleja claramente que este metal tiene un impacto económico considerable en la refinación, aun cuando, en términos generales, las variaciones se han reducido respecto al año fiscal anterior.

En consecuencia, aunque los cambios implementados en el proceso de refinación han logrado disminuir tanto la frecuencia como la magnitud de las desviaciones, el Metal C sigue siendo el principal responsable de la variabilidad económica. Por ello, resulta necesario centrar esfuerzos en su control y manejo. Abordar específicamente este punto permitirá mejorar la precisión de las estimaciones y evitar pérdidas o

ganancias no presupuestadas, fortaleciendo la confiabilidad y eficiencia del proceso en su conjunto.

Este análisis evidencia que las acciones implementadas como la preparación de mezclas intermedias, la validación externa de resultados, la optimización de volúmenes de material enviado y la documentación estandarizada del procedimiento han logrado disminuir tanto la magnitud como la frecuencia de las desviaciones, asegurando un proceso más confiable y con menor exposición económica frente a variaciones inesperadas.

V.6 Impacto económico de la unificación de nomenclaturas

La unificación de nomenclaturas analíticas representó un cambio estratégico orientado a reducir costos operativos y mejorar el proceso de refinación. Durante el año fiscal anterior, la diversidad de nomenclaturas implicaba la realización de múltiples análisis CRIT a lo largo del año, con un promedio de entre 6 y 8 análisis anuales. En el último año fiscal se registraron un total de 7 análisis, con un costo individual de \$11,500 MXN, lo que se traduce en un gasto anual de \$80,500 MXN.

Dicha variabilidad en las nomenclaturas no solo generaba un mayor costo, sino también mayor complejidad administrativa y tiempos de gestión más prolongados.

A partir de la estandarización de nomenclaturas y la consolidación de criterios, se estableció un esquema en el cual únicamente se requieren dos análisis CRIT por año. Dado que este nuevo esquema es reciente, su impacto económico directo aún no puede evaluarse de manera histórica. No obstante, con base en los costos registrados en el ejercicio anterior, se realizó una proyección del gasto acumulado y del ahorro potencial asociado a la reducción en el número de análisis requeridos.

En el Cuadro 4 se presenta la proyección del gasto acumulado por análisis CRIT bajo ambos esquemas operativos, mientras que en la Figura 5 se ilustra gráficamente esta comparación. La proyección se considera conservadora, ya que se basa en el número mínimo de análisis realizados durante el último año fiscal bajo el esquema

anterior, sin contemplar escenarios de mayor demanda analítica observados en ejercicios previos.

Cuadro 4. Proyección del gasto acumulado por análisis CRIT bajo ambos esquemas operativos.

AÑO	ACUMULADO DE GASTOS (FORMATO ANTERIOR)	ACUMULADO DE GASTOS (FORMATO ACTUAL)
1	\$ 80,500.00	\$ 23,000.00
2	\$ 161,000.00	\$ 46,000.00
3	\$ 241,500.00	\$ 69,000.00
4	\$ 322,000.00	\$ 92,000.00
5	\$ 402,500.00	\$ 115,000.00
6	\$ 483,000.00	\$ 138,000.00

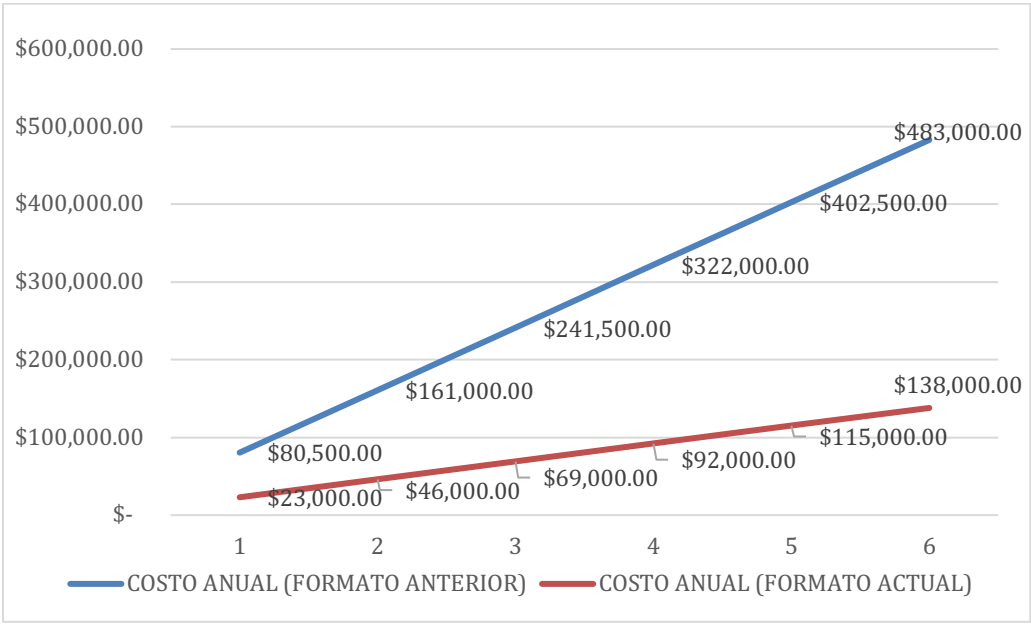


Figura 5. Proyección del gasto acumulado por análisis CRIT bajo ambos esquemas operativos.

Bajo este escenario, el esquema anterior representaba un gasto anual aproximado de \$ 80,500 MXN, mientras que el esquema actual implica un costo estimado de \$ 23,000 MXN, considerando únicamente dos análisis CRIT. Esto se traduce en un ahorro anual proyectado de aproximadamente \$ 57,500 MXN, sin considerar posibles aumentos en el costo a futuro.

Más allá del impacto económico directo, la unificación de nomenclaturas aporta beneficios operativos adicionales que no se reflejan únicamente en el costo de los análisis. La reducción en el número de análisis CRIT simplifica la planeación y disminuye la carga administrativa y reduce la probabilidad de errores. En conjunto, esta estandarización contribuye positivamente en el proceso de refinación para ser mucho más ordenado, predecible y más que nada eficiente.

V.7 Impacto global de las acciones implementadas en el último año fiscal

Las acciones implementadas a lo largo del último año fiscal tuvieron un impacto muy positivo y medible tanto en el control técnico del proceso como en su impacto económico.

La estandarización de nomenclaturas, la revisión de los criterios analíticos y los ajustes en la forma de manejar, analizar y declarar los metales contenidos en las mezclas permitieron reducir la variabilidad asociada al proceso de refinación. De esta manera, los resultados han aumentado su confiabilidad contra las estimaciones iniciales.

Adicionalmente, se permitió reducir de manera directa los costos asociados a los análisis CRIT, así como simplificar la gestión administrativa y disminuir la complejidad operativa del sistema, sin comprometer el cumplimiento normativo ni la seguridad del proceso.

En conjunto, los resultados confirman que las acciones implementadas fortalecieron la estabilidad del proceso de refinación en Johnson Matthey de México, estableciendo una base más sólida y estandarizada para su operación. Si bien aún existen áreas de oportunidad, el nivel de control alcanzado representa una mejora

sustancial respecto al esquema operativo previo y sienta las bases para una estrategia de mejora continua.

V.8 Proyectos en desarrollo y oportunidades de mejora futura

Como consecuencia de la reestructuración expuesta, fue posible identificar oportunidades adicionales de optimización que anteriormente no podían evaluarse con tanta claridad. Una de las principales corresponde al proceso de evaporación de remanentes previo al envío a refinación.

Actualmente, el sistema de evaporación disponible presenta algunas limitaciones técnicas, principalmente la capacidad de concentrar los remanentes más allá de un 20-30% en sólidos por cuestiones relacionadas a la agitación en un tanque tan grande para tan poco material, tiempo de operación, entre otros. Estas restricciones provocan que el material enviado a refinación contenga una fracción elevada de agua, incrementando de manera directa el peso transportado sin aportar valor metalúrgico. La estabilización del proceso lograda durante el último año fiscal permitió cuantificar este efecto y justificar la evaluación de un nuevo sistema de evaporación con mayor eficiencia.

Con base en datos reales de operación, durante los últimos cuatro meses se procesaron aproximadamente 13,055 kg de remanentes líquidos. Mediante el sistema de evaporación actual, el tamaño se redujo a 4,424 kg, mientras que el equipo propuesto permitiría alcanzar un peso estimado de 1,609 kg, al operar con contenidos de sólidos cercanos o superiores al 60%.

Considerando que la refinadora cobra 2.5 USD por libra de peso neto enviado, el envío de material con un alto contenido de agua representa un costo significativo. A partir de esta diferencia de peso, se estimó que el envío de agua excedente representó un costo de aproximadamente 46,545 USD, únicamente por concepto de procesamiento de material no metálico.

Adicionalmente, el costo logístico asociado al transporte asciende a aproximadamente 5,350 USD por camión. Bajo el esquema actual, durante 2025 se realizaron 7 envíos, mientras que, de haberse contado con el sistema propuesto, la

misma cantidad de PGM se habría enviado en 2 camiones, reduciendo de manera considerable esta parte del gasto logístico anual.

El costo estimado del proyecto para la adquisición e implementación del nuevo evaporador es de unos \$100,000.00. Al contratar este valor con los ahorros potenciales, se concluye que el proyecto presenta un alto potencial de retorno de inversión. No obstante, dado que el proyecto se encuentra aún en fase de evaluación e implementación, estos valores deben considerarse como una estimación conservadora.

La inclusión de este proyecto representa una oportunidad de mejora futura, no pretende presentar resultados concluyentes, sino evidenciar cómo la reestructuración del proceso permitió identificar iniciativas de alto impacto.

VI. CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió evaluar y documentar la reestructuración del proceso de refinación y estandarización de nomenclaturas analíticas implementadas en Johnson Matthey de México, demostrando que los cambios realizados han tenido un impacto positivo en el control del proceso y en la optimización de recursos económicos.

La definición de criterios claros, junto a la modificación en la forma de manejar y declarar las mezclas, contribuyó a reducir de manera significativa la variabilidad asociada a las estimaciones del metal. El análisis comparativo entre el año fiscal anterior y el actual evidenció una disminución tanto en la frecuencia como en la magnitud de las desviaciones en términos absolutos (onzas), reflejando una mayor estabilidad y confiabilidad del proceso.

Desde un punto de vista económico, la reducción en la variabilidad no presupuestada asociada a las diferencias entre metal declarado y metal recuperado se tradujo en una disminución sustancial del impacto financiero en el proceso. Al evaluar las desviaciones, se confirmó que las acciones implementadas permitieron reducir la exposición económica derivada de estas variaciones.

La estandarización de nomenclaturas para las mezclas de refinación y la consolidación del análisis CRIT representaron un cambio estratégico relevante. Con esta acción se logró reducir la complejidad en sistema, establecer un esquema que permite dar un mejor seguimiento, y una proyección de ahorro económico anual significativo.

Si bien se observó una mejora general del proceso, el análisis por tipo de metal permitió identificar que ciertas corrientes continúan concentrando una mayor proporción de la variabilidad económica, lo que resalta la importancia de mantener un enfoque de mejora continua y de análisis focalizado en aquellas etapas que representan mayor impacto financiero.

Finalmente, este trabajo sienta bases sólidas para la evolución futura del proceso de refinación. Las acciones ya implementadas, junto con los proyectos actualmente en desarrollo, posicionan al proceso en un nivel de estandarización y control

significativamente superior al que se tenía previamente. Aunque aún existe margen de mejora, la reestructuración documentada representa un avance claro hacia un proceso más confiable, eficiente y alineado con la optimización integral de recursos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Barwick, V. J., & Ellison, S. L. R. (1999). Measurement uncertainty: Approaches to the evaluation of uncertainties associated with recovery. *Analyst*, 124(7), 981–990.

<https://doi.org/10.1039/A901845J>

Binnemans, K., Jones, P. T., Manjón Fernández, Á., & Tomiyama, M. (2020). Hydrometallurgical processes for the recovery of metals from steel industry by-products: A critical review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 6(4), 505–540.

<https://doi.org/10.1007/s40831-020-00306-2>

Goc, K., Kučera, J., & Kučera, M. (2023). Application of ion-exchange dynamic conditions in the recovery of platinum, palladium, rhodium, and gold from technological solutions. *Scientific Reports*, 14(1), 1–10.

<https://doi.org/10.1038/s41598-024-66086-x>

Hernández, J., & Svehla, G. (1983). Thermal analysis of platinum and palladium nitrates. *Thermochimica Acta*, 68(1), 39–46.

[https://doi.org/10.1016/0040-6031\(83\)80059-8](https://doi.org/10.1016/0040-6031(83)80059-8)

Hu, F., Wilson, B. P., Han, B., & Louhi-Kultanen, M. (2020). High purity nickel recovery from an industrial sidestream using concentration and liquid–liquid extraction techniques. *JOM*, 72(2), 831–838.

<https://doi.org/10.1007/s11837-019-03928-4>

Meija, J., & Possolo, A. (2023). Uncertainty in chemical measurement: A critical review and practical recommendations. *Pure and Applied Chemistry*, 95(2), 199–222.

<https://doi.org/10.1515/pac-2022-0904>

Mooiman, M. B. (2021). Where did the gold go? Precious metal losses in refineries. *The Alchemist (LBMA)*, (101), 12–17.

<https://www.lbma.org.uk/alchemist/issue-101/where-did-the-gold-go-precious-metal-losses-in-refineries>

Occupational Safety and Health Administration. (2015). *Hazard communication standard: Pictograms*. U.S. Department of Labor.

<https://www.osha.gov/hazcom/pictograms>

Orozco Lab. (2023). *¿Análisis CRIT a un lodo?*
<https://www.oroicolab.info/analisis-crit-a-un-lodo>

Rui, X., Geng, Y., Sun, X., Hao, H., & Xiao, S. (2021). Dynamic material flow analysis of natural graphite in China for 2001–2018. *Resources, Conservation & Recycling*, 173, Artículo 105732.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105732>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2005). *NOM-052-SEMARNAT-2005: Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos*. Diario Oficial de la Federación.
<https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1291/1/nom-052-semarnat-2005.pdf>

Singh, M. (2023). Catalysis: Accelerating chemical reactions for a sustainable future. *Advanced Materials Science Research*, 6(3), 16614.
<https://www.openaccessjournals.com/articles/catalysis-accelerating-chemical-reactions-for-a-sustainable-future-16614.html>

Sodhi, H. S. (2021). A review of scrap reduction techniques used in manufacturing. *Procedia CIRP*, 98, 205–210.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.034>

Suzuki, T., & Daigo, I. (2024). Recycled content for metals with refined classification of metal scrap: Micro-level circularity indicator in accordance with macro-level system. *Sustainability*, 16(16), Artículo 6933.
<https://doi.org/10.3390/su16166933>

Torres Flores, Á. J. (2024, 13 de junio). *NOM-052-SEMARNAT: Análisis CRIT para residuos peligrosos*. Grupo Microanálisis.
<https://grupomicroanalisis.com/nom-052-semarnat-analisis-crit-para-residuos-peligrosos/>

Xolo, L., Moleko-Boyce, P., Makelane, H., Faleni, N., & Tshentu, Z. R. (2021). Status of recovery of strategic metals from spent catalytic converters, e-waste and batteries. *Minerals*, 11(7), Artículo 673.
<https://doi.org/10.3390/min11070673>