

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA**



**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**“ANÁLISIS DEL TIEMPO DE VIDA DE LOS CRISOLES DE  
GRAFITO EN EL RENDIMIENTO TÉRMICO PARA LA  
PRODUCCIÓN DE ÓXIDO DE ZINC”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO METALURGISTA**

**ELABORADO POR  
WILLIAM JOSEPH LEÓN SABUCO**

**ASESOR  
Mag. ING. MARÍA FLOR SUÁREZ SÁNCHEZ**

**LIMA-PERÚ**

**2021**

## **DEDICATORIA**

Para mi esposa Cinthya Milagros, por su permanente comprensión y soporte en mi crecimiento profesional. Para mis padres Nicolás y Carmen, por su eterno cariño y sacrificios en mi educación profesional; para mis hermanos Betsy, Pamella y Nick por su gran amor y confianza en mí.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por la vida que me concedió, con bendiciones y prosperidad que me alegraron cada momento; y también con dificultades y obstáculos que me ayudaron a creer y confiar en mis competencias y habilidades ante la adversidad.

Así mismo agradezco a los docentes de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería por sus enseñanzas y de manera especial a los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por sus aportes en mi formación profesional.

Mis sinceros agradecimientos también para la Mg. Ing. María Flor Suárez Sánchez y el Ing. Over Avelino Aliaga Ingaruca por su tiempo y conocimiento compartido en la asesoría del presente trabajo de investigación.

Mis reconocimientos y agradecimientos también para todas las personas que me ayudaron a lograr concluir esta etapa de mi vida.

## RESUMEN

El rendimiento térmico en la producción de óxido de zinc, a través del método indirecto o francés, depende de diversas variables, que de no estar en control de proceso generan pérdidas en los estados financieros de las empresas metalúrgicas. Una de esas diversas variables es el tiempo de vida de los crisoles de grafito instalados en los hornos de fundición.

La presente investigación tuvo el objetivo de determinar el tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito para mejorar el rendimiento térmico en la producción del óxido de zinc, para tal fin se analizó técnicamente la influencia del tiempo de vida de los crisoles en el proceso luego de recopilar los datos de los consumos de gas natural, como combustible, los tiempos de vida de los crisoles y los pesos de la producción de óxido de zinc.

Con la información recopilada y analizada se confirmó una influencia de relación directa entre el tiempo de vida de los crisoles y el consumo de gas natural, es decir, a mayor tiempo de vida de los crisoles mayor es el consumo de combustible; y a menor tiempo de vida de los crisoles menor es el consumo de combustible. Así mismo, en cuanto al rendimiento térmico se concluyó una influencia de relación inversa, es decir, a mayor tiempo de vida de los crisoles menor es el rendimiento térmico; y a menor tiempo de vida de los crisoles mayor es el rendimiento térmico. Finalmente, luego de los análisis y discusiones se determinó el tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito para mejorar el rendimiento térmico en la producción de óxido de zinc.

Palabras claves: Crisoles de grafito, rendimiento térmico, producción de óxido de zinc.

## **ABSTRACT**

The thermal performance in the production of zinc oxide, through the indirect or french method, depends on several variables, which, if not in process control, generate losses in the financial statements of metallurgical companies. One of these various variables is the life time of the graphite crucibles installed in the smelting furnaces.

The present investigation had the objective of determining the optimal life time of graphite crucibles to improve the thermal performance in the production of zinc oxide, for this purpose the influence of the life time of crucibles in the process was technically analyzed after to collect data on natural gas consumption, as fuel, crucible life times, and zinc oxide production weights.

The information collected and analyzed confirmed a direct relationship influence between the life time of the crucibles and the consumption of natural gas, that is, the longer the crucibles life, the greater the fuel consumption; and the shorter the life of the crucibles, the lower the fuel consumption. Likewise, in terms of thermal performance, an inverse relationship influence was concluded, that is, the longer the crucibles life time, the lower the thermal performance; and the shorter the life of the crucibles, the higher the thermal performance.

Finally, after the analysis and discussions, the optimal life time of the graphite crucibles was determined to improve the thermal performance in the production of zinc oxide.

**Keywords:** Graphite crucibles, thermal performance, zinc oxide production.

## PRÓLOGO

La presente investigación aportó el análisis de la influencia del tiempo de vida de los crisoles de grafito en el rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc y la determinación del tiempo de vida óptimo de los crisoles para el proceso mencionado. El contenido del trabajo de investigación se desarrolló en cuatro capítulos, según se describe a continuación:

En el capítulo I, se explica las generalidades de la investigación, la descripción del problema, el establecimiento del objetivo, el planteamiento de la hipótesis, la definición de las variables y los antecedentes investigativos.

En el capítulo II, se expone el marco teórico y conceptual que sustentó los fundamentos teóricos de base para la investigación y definió los conceptos utilizados para el estudio respectivamente.

En el capítulo III, se describe la metodología de la investigación utilizada para el presente estudio, considerando el tipo y diseño de la investigación, la unidad de análisis y la matriz de consistencia respectiva. Así mismo se desarrolla la investigación con la presentación de la información recopilada y procesada digitalmente a través de la utilización de hojas de cálculo de Microsoft Excel.

En el capítulo IV, se presenta el análisis y la discusión del trabajo de investigación considerando la correlación entre el tiempo de vida de los crisoles de grafito y el rendimiento térmico para la producción del óxido de zinc.

Por último, se expone las conclusiones y las recomendaciones del trabajo de investigación.

## ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
PRÓLOGO	
ÍNDICE	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABLAS	
CAPITULO I	12
INTRODUCCIÓN	12
1.1 Generalidades	12
1.2 Descripción del problema	13
1.3 Objetivo	14
1.4 Hipótesis	14
1.5 Definición de variables	15
1.5.1 Variable independiente	15
1.5.2 Variable dependiente	15
1.6 Antecedentes investigativos	15
1.6.1 Investigaciones internacionales	15
1.6.2 Investigaciones nacionales	18
1.6.3 Investigaciones locales	20
CAPITULO II	23
MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL	23
2.1. Marco Teórico	23
2.1.1 Crisoles de grafito	23
2.1.2 Hornos de crisol	24
2.1.3 Métodos de producción del óxido de zinc	25
2.1.4 Usos del óxido de zinc	25
2.2. Marco Conceptual	26
2.2.1 Calor	26
2.2.2 Cama	26

2.2.3	Curado	26
2.2.4	Envejecimiento	27
2.2.5	Fisura	27
2.2.6	Fractura	27
2.2.7	Horno	27
2.2.8	Línea	27
2.2.9	Rendimiento	28
2.2.10	Tostado	28
2.2.11	Transferencia	28
2.2.12	Vida	28
CAPITULO III		29
DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN		29
3.1	Metodología de la investigación	29
3.1.1	Tipo y diseño de la investigación	29
3.1.2	Unidad de análisis	30
3.1.3	Matriz de consistencia	32
3.2	Recolección de datos	33
3.2.1	Tiempo de vida de los crisoles de grafito	34
3.2.2	Consumo de gas natural	37
3.2.3	Consumo de energía calorífica	40
3.2.4	Peso de la producción de óxido de zinc	43
3.3	Procesamiento de la información	46
3.4	Análisis de la información	49
3.4.1	Análisis de Correlación del Tiempo de vida de los crisoles y el Consumo de gas natural	50
3.4.2	Análisis de Correlación del Tiempo de vida de los crisoles y el Consumo de energía calorífica	51
3.4.3	Análisis de Correlación del Tiempo de vida de los crisoles y el Peso de producción de óxido de zinc	52
3.4.4	Análisis de Correlación del Consumo de energía calorífica y el Peso de producción de óxido de zinc	53
CAPITULO IV		55
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		55
4.1	Análisis y discusión de los resultados de las correlaciones	55

4.2	Análisis de la influencia del tiempo de vida de los crisoles en el rendimiento térmico	57
4.3	Tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito	62
	CONCLUSIONES	78
	RECOMENDACIONES	80
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
	ANEXOS	

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 3.1</i> Tiempo de vida de los crisoles para el Lote N° 1	34
<i>Figura 3.2</i> Tiempo de vida de los crisoles para el Lote N° 2	35
<i>Figura 3.3</i> Tiempo de vida de los crisoles para el Lote N° 3	36
<i>Figura 3.4</i> Consumo de gas natural para el Lote N° 1	37
<i>Figura 3.5</i> Consumo de gas natural para el Lote N° 2	38
<i>Figura 3.6</i> Consumo de gas natural para el Lote N° 3	39
<i>Figura 3.7</i> Consumo de energía calorífica para el Lote N° 1	40
<i>Figura 3.8</i> Consumo de energía calorífica para el Lote N° 2	41
<i>Figura 3.9</i> Consumo de energía calorífica para el Lote N° 3	42
<i>Figura 3.10</i> Pesos de producción de óxido de zinc para el Lote N° 1	43
<i>Figura 3.11</i> Pesos de producción de óxido de zinc para el Lote N° 2	44
<i>Figura 3.12</i> Pesos de producción de óxido de zinc para el Lote N° 3	45
<i>Figura 3.13</i> Tiempo de vida de los crisoles por Lote	47
<i>Figura 3.14</i> Consumo diario promedio de gas natural por Lote	47
<i>Figura 3.15</i> Consumo diario promedio de energía calorífica por Lote	48
<i>Figura 3.16</i> Peso promedio de producción diaria de óxido de zinc por Lote	48
<i>Figura 3.17</i> Correlación entre el tiempo de vida de los crisoles y el consumo de gas natural	51
<i>Figura 3.18</i> Correlación entre el tiempo de vida de los crisoles y el consumo de energía calorífica	52
<i>Figura 3.19</i> Correlación entre el tiempo de vida de los crisoles y el peso de producción de óxido de zinc	53
<i>Figura 3.20</i> Correlación entre el consumo de energía calorífica y el peso de producción de óxido de zinc	54

<i>Figura 4.1</i> Rendimiento térmico para el Lote N° 1	58
<i>Figura 4.2</i> Rendimiento térmico para el Lote N° 2	58
<i>Figura 4.3</i> Rendimiento térmico para el Lote N° 3	59
<i>Figura 4.4</i> Rendimiento térmico promedio para la producción de óxido de zinc por Lote	60
<i>Figura 4.5</i> Correlación entre el Rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc y el Tiempo de vida de los crisoles de grafito	61
<i>Figura 4.6</i> Modelo de regresión para el rendimiento térmico y el tiempo de vida de los crisoles del Lote N° 1	65
<i>Figura 4.7</i> Modelo de regresión para el rendimiento térmico y el tiempo de vida de los crisoles del Lote N° 2	67
<i>Figura 4.8</i> Modelo de regresión para el rendimiento térmico y el tiempo de vida de los crisoles del Lote N° 3	69
<i>Figura 4.9</i> Modelo de regresión para el rendimiento térmico en función del tiempo de vida de los crisoles	71
<i>Figura 4.10</i> Gráfica de la función $y''$ con visibilidad de la primera raíz negativa para $x$	75
<i>Figura 4.11</i> Gráfica de la función $y''$ con visibilidad de las raíces positivas para $x$	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 <i>Tiempo de vida de los crisoles por Lotes</i>	36
Tabla 3.2 <i>Consumo de gas natural por Lotes</i>	39
Tabla 3.3 <i>Consumo de energía calorífica por Lotes</i>	42
Tabla 3.4 <i>Peso promedio de producción diaria de óxido de zinc por Lotes</i>	45
Tabla 3.5 <i>Criterios para el Análisis de Correlación</i>	49
Tabla 4.1 <i>Resumen de los Coeficientes de Correlación de los datos analizados</i>	55
Tabla 4.2 <i>Resumen del Rendimiento térmico promedio por Lote</i>	59
Tabla 4.3 <i>Resultados del Análisis de Regresión para el Lote N° 1</i>	64
Tabla 4.4 <i>Resultados del Análisis de Regresión para el Lote N° 2</i>	66
Tabla 4.5 <i>Resultados del Análisis de Regresión para el Lote N° 3</i>	68
Tabla 4.6 <i>Resultados del Análisis de Regresión Total para el Rendimiento térmico en función del Tiempo de vida de los crisoles de grafito</i>	70
Tabla 4.7 <i>Cálculo de la segunda derivada de la función <math>y</math> (<math>y''</math>)</i>	72
Tabla 4.8 <i>Tabulación de datos <math>x</math> para <math>y''</math></i>	73
Tabla 4.9 <i>Raíces de la ecuación <math>y'' = 0</math></i>	76
Tabla 4.10 <i>Coordenadas de los puntos de inflexión de la función <math>y</math></i>	76

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 Generalidades**

El rendimiento térmico en la producción de óxido de zinc a través del método francés o indirecto tiene diversas variables que influyen en su resultado. Entre estas variables destacan: el caudal del combustible en el quemador del horno, el caudal del aire en el quemador del horno, la temperatura del ignitor, las dimensiones de la cámara del horno, los espesores de la pared refractaria, el aislamiento térmico del horno, el tiempo de vida de los crisoles y la producción del polvo de óxido de zinc, considerando estas variables se definió que el alcance de la presente investigación está delimitada al análisis de la influencia del tiempo de vida de los crisoles de grafito en el rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc. Para el estudio se consideró un mismo tipo de crisol, con diseño estándar para el método francés o indirecto, cuya composición química y dimensiones físicas no tuvieron cambios. Con el análisis de la influencia del tiempo de vida de los crisoles se determinó el tiempo de vida óptimo que permitirá equilibrar los consumos de combustible y el consumo de crisoles, en consecuencia, se logró identificar el punto de equilibrio para una mejora en el rendimiento térmico de la producción de óxido de zinc.

Los resultados obtenidos a partir de la identificación del tiempo de vida óptimo para los crisoles tienen impacto positivo en la reducción de las pérdidas financieras para las empresas metalúrgicas.

## **1.2 Descripción del problema**

La producción de óxido de zinc a través del método indirecto o francés utiliza como parte de los insumos o consumibles para la fundición a los crisoles de grafito y el gas natural, ambos recursos se relacionan en una línea de producción, de manera que cuando los crisoles son nuevos, el consumo de gas natural es menor, por tanto la energía calorífica que se necesita para fundir y evaporar el zinc también es menor comparado con la situación cuando el tiempo de vida de los crisoles muestran signos de envejecimiento. Al no tener definido el tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito bajo las condiciones operativas en la fundición se incurren en sobre costos productivos debido a los cambios tempranos de crisoles para priorizar el consumo de gas natural o caso contrario debido a los cambios tardíos de los crisoles para priorizar los costos por este recurso. Los consumos de ambos recursos previamente mencionados son registrados a través de controles diarios en la línea de producción de óxido de zinc, de tal manera que para cuantificar el tiempo de vida de los crisoles se registra de forma acumulada diariamente hasta el último día productivo de cada crisol en el horno de la fundición. El consumo del gas natural se mide a través del registro diario del medidor instalado en la línea de producción, este consumo expresado en volumen estándar ( $\text{sm}^3$ ) se convierte a las unidades de energía calorífica expresado en kW-h empleando el factor de conversión de  $11.7 \text{ kW-h/sm}^3$ .

Ambos registros de consumo de recursos por separado no aportan significativamente en la gestión operativa para la producción de óxido de zinc. Esta situación previamente descrita tiene un impacto negativo para el estado financiero de una organización debido a que incrementa los costos operativos por sobre consumo de gas natural, mantenimiento correctivo del horno y cambios de los crisoles en la etapa de fundición, de no realizarse mejoras será evidente la necesidad progresiva de suministrar mayor energía calorífica al sistema de los hornos de fundición para lograr fundir y vaporizar los lingotes de zinc. Las probables causas relacionadas a este problema se encuentran en la presencia de pérdidas de calor por fisuras o fracturas en las camas, paredes o tapas de los hornos de la fundición, fugas de gas natural, desgaste de los ladrillos refractarios y deterioro o envejecimiento de los crisoles de grafito. Considerando la descripción de la problemática expuesta se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo influye el tiempo de vida de los crisoles de grafito en el menor rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc?.

### **1.3 Objetivo**

Determinar el tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito para mejorar el rendimiento térmico en la producción de óxido de zinc.

### **1.4 Hipótesis**

Al analizar la influencia del tiempo de vida de los crisoles de grafito se logrará mejorar el rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc.

## 1.5 Definición de variables

### 1.5.1 Variable independiente

Tiempo de vida de los crisoles de grafito.

### 1.5.2 Variable dependiente

Rendimiento térmico en la producción de óxido de zinc.

## 1.6 Antecedentes investigativos

### 1.6.1 Investigaciones internacionales

Según Peña, I. (2017) en su tesis de grado "*Construcción de un crisol de grafito para la fusión de ferroaleaciones a escala de laboratorio*" menciona que para incrementar el tiempo de vida de los crisoles de grafito se necesita realizar un proceso de curado antes de ponerlos en servicio:

Un crisol nuevo (sin haberse usado) es aconsejable recubrirlo en su interior antes de fundir metal en él por primera vez; a este procedimiento preparatorio se le denomina: ``curado``; esto permite que dure mucho más tiempo en uso sin fracturarse o resquebrajarse por la explotación, alargando su vida útil. (p. 13)

Peña, I. (2017) también indica que el proceso de curado debe realizarse utilizando pedazos de vidrio de botella y aceite automotriz preferentemente usado, en una proporción de un litro de aceite por cada medio kilogramo de vidrio, la mezcla se debe colocar en el interior del crisol para que a continuación se caliente gradualmente hasta lograr una mezcla fundida y una coloración al rojo vivo en el crisol, la mezcla fundida debe llegar por lo menos hasta la tercera parte de la altura del crisol, seguidamente se debe inclinar el crisol para recubrir toda la pared interior con la mezcla y por último se colocará el crisol sobre una cama

de arena seca para su enfriamiento, el autor señala *“El procedimiento anterior sellará las paredes del crisol y extenderá la vida útil del mismo”* (p. 36), en conclusión realizando este proceso de curado se logrará prolongar el tiempo de vida de los crisoles de grafito.

Suntaxi, E. y Torres, C. (2014) en su tesis de grado *“Diseño y construcción de un horno crisol para fundición de aluminio con una capacidad de 15 kg/h a una temperatura de 800°C utilizando GLP”* muestran los cálculos detallados de ingeniería para determinar la eficiencia térmica de un horno de crisol en el proceso de fundición de aluminio utilizando gas licuado de petróleo, para tal fin mencionan: *“Para determinar la eficiencia térmica del horno se debe de establecer la relación entre el flujo de calor total y el flujo de la energía entregada por el combustible”* (p. 72). De acuerdo a los autores, para calcular el flujo de calor total, se considera la sumatoria de los siguientes valores de calor: a) calor sensible para elevar la temperatura del aluminio de temperatura ambiente a temperatura de fusión; b) calor latente de fusión del aluminio; c) calor sensible del aluminio para elevar la temperatura desde la fase líquida hasta la temperatura de colada; d) calor absorbido por el crisol; y e) pérdidas de calor en el horno de crisol. Para calcular el flujo de energía entregada por el combustible, determinaron primero, el poder calorífico del gas licuado de petróleo; segundo, obtuvieron un peso de gas licuado de petróleo necesario para el horno de crisol; tercero, conociéndose la densidad del gas licuado de petróleo calcularon el volumen necesario de combustible; cuarto, con el paso anterior calcularon el volumen necesario de aire para la mezcla

combustible; quinto, determinaron el poder calorífico de la mezcla; y sexto, con el resultado anterior obtuvieron el flujo de energía entregado por la mezcla combustible. Finalmente, conociéndose el flujo de calor total y el flujo de energía entregada por el combustible, cuantificaron la eficiencia o rendimiento térmico del horno de crisol para la fundición de aluminio utilizando gas licuado de petróleo.

Según Rivera, M. (2011) en su tesis de grado *“Uso del ZnO en la degradación del triclosan mediante irradiación de luz UV”* menciona que el óxido de zinc es un compuesto químico semiconductor debido al alto grado de ionicidad en su enlace atómico:

El ZnO es un compuesto semiconductor cuyos elementos pertenecen al grupo IIB, en el caso del zinc (Zn) y al VIA, en el caso del oxígeno (O), de la tabla periódica de los elementos. La diferencia de electronegatividades entre el Zn y el O produce un alto grado de ionicidad en su enlace, convirtiéndolo en uno de los compuestos más iónicos de dicha familia. (p. 14)

Rivera, M. (2011) también indica que la estructura cristalina más estable para el óxido de zinc es el de la wurtzita:

Las estructuras cristalinas del ZnO son: wurtzita, zincblenda y halita o sal de mesa, cuyas estructuras se muestran en la Figura 3. Esto provoca una repulsión considerable entre sus nubes de carga, haciendo que su estructura cristalina más estable sea hexagonal tipo wurtzita. (p. 14)

Rivera, M. (2011) además menciona que el óxido de zinc presenta múltiples propiedades que son útiles para numerosas aplicaciones tales como los protectores solares a los rayos ultravioleta, cerámicos tradicionales, industria del caucho, adhesivos, recubrimientos y pinturas:

Siendo útil en numerosas aplicaciones tales como protección a los rayos UV, fotocátalisis, muestras de emisión de campos, dispositivos funcionales, material termoeléctrico, cerámica tradicional, en la industria del caucho y adhesivos, en los recubrimientos y pinturas, dadas sus propiedades semiconductoras se utiliza en piezas eléctricas, dispositivos opto-eléctricos, transductores acústicos, electrodos transparentes, ventanas ópticas en paneles solares. (p. 17)

En conclusión, para que se entienda la relevancia del óxido de zinc en la vida del ser humano es importante conocer sus características, sus propiedades y sus aplicaciones industriales.

### **1.6.2 Investigaciones nacionales**

Cabrera, D. y Morales, J. (2019) en su tesis de grado "*Diseño y construcción de un horno crisol estacionario para reciclaje de chatarra de cobre – Cajamarca 2019*" mencionan que el crisol es un recipiente a base de grafito sobre el cual se funden metales a temperaturas superiores a los 500 °C:

El crisol es un recipiente que se coloca dentro de los hornos para que reciba el metal fundido. Normalmente está hecho de grafito con cierto contenido de arcilla y puede soportar materiales a altas temperaturas, como el bronce fundido, o cualquier otro metal, normalmente a más de 500 °C. (p. 12)

Cabrera, D. y Morales, J. (2019) también mencionan que un horno de crisol es una recámara de combustión que aloja en su interior a un crisol de grafito donde se funden los metales con el calor absorbido del suministro de energía calorífica respectiva:

De manera sencilla un horno de crisol no es más que una recámara a la cual se le suministra energía, almacena calor y promueve la transferencia de este a un metal contenido en un recipiente conductor del calor y resistente a la acción del metal y a las altas temperaturas denominado crisol, el cual permite

fundir el metal en su interior para luego ser vertido a un molde previamente preparado. (p. 11)

Cabrera, D. y Morales, J. (2019) además mencionan que para el diseño del horno de crisol se tienen que considerar diferentes variables tales como: el tipo metal a fundir, el tipo de crisol a utilizar, el tipo de combustible a quemar, las temperaturas de servicio:

En el horno de crisol se identifican los siguientes parámetros de diseño:

Metal a fundir.

Crisol a emplear.

Temperatura máxima de operación.

Tiempo de operación.

Ubicación del horno y flujo de aire.

El metal por fundir ya ha sido definido en el título de esta investigación y resulta ser el objetivo primordial del horno.

Fundir cobre.

La temperatura máxima de operación se define por el punto de fusión del metal a fundir; en este caso el cobre tiene un punto de fusión de 1082°C. En este caso el cobre determina la temperatura de operación máximo. (p. 14)

Según Ureta, P. (2013) en su tesis de grado *“Reducción de concentración SO<sub>2</sub> por absorción en solución acuosa de carbonato de sodio de los gases residuales de la planta de ácido sulfúrico del circuito de zinc de la Empresa Doe Run Perú - La Oroya”* menciona que la producción del óxido de zinc, conocido también como calcina, se obtiene directamente de la tostación de los concentrados sulfurados de zinc en los hornos tostadores de lecho turbulento (TLR por sus siglas en inglés, Turbulent Layer Roaster), el autor indica *“En la tostación se transforma el concentrado de zinc conformado principalmente por sulfuro de zinc en óxido de zinc”* (p. 31). Los tostadores de lecho turbulento son hornos de forma cilíndrica, tienen agujeros en su base circular para permitir el ingreso de aire al proceso con el cual se

producirá directamente el óxido de zinc, el autor señala *“En el tostador de cama turbulenta (TLR) los concentrados son directamente alimentados por medio de una faja de alta velocidad (sistema slinger). El tostador es cilíndrico con una base circular perforada para permitir el paso del aire”* (p. 31).

Según Cardoza, O. (2019) en su tesis de grado *“Incremento de la recuperación de zinc en el proceso de lixiviación empleando la metodología Seis Sigma en la empresa Nexa Resources Cajamarquilla”* menciona que al utilizar un tostador de lecho fluidizado para la producción de óxido de zinc, conocido también como calcina, se genera también energía eléctrica para brindar autonomía a otros procesos:

Tiene un tostador de lecho fluidizado con 100 m<sup>2</sup> de área de fluidización, seguido de una caldera de cinco haces tipo Lamont para recuperar el calor del flujo de gas en un circuito cerrado con serpentín de enfriamiento en el lecho del horno. Este sistema produce vapor supersaturado que se utiliza para generar 2,2 MW de energía y para satisfacer las necesidades de los procesos de lixiviación y purificación. (p. 14)

### **1.6.3 Investigaciones locales**

Según Aranda, A. (2016) en su tesis de grado *“Síntesis de películas de nanorods de óxido de zinc sobre nanopartículas de plata”* menciona que en la producción del óxido de zinc, la morfología de los granos y el tamaño de las partículas dependerán de los controles que se tengan en la temperatura y el tiempo de la reacción química, además de la calidad de la materia prima, el autor señala *“La Morfología y tamaño de la partícula puede ser controlada por ajuste de la temperatura de la reacción, tiempo, y concentración del precursor”* (p. 25).

Según Castillo, C. (2016) en su tesis de grado *“Síntesis y caracterización de películas delgadas de nanorods de ZnO: N-Ag para su aplicación en purificación fotocatalítica del agua”* menciona que el óxido de zinc posee una variedad de propiedades que lo posicionan como un compuesto químico ideal para diversas aplicaciones en los diferentes campos de las ciencias y si a ésta condición se les adiciona las optimizaciones a sus propiedades el panorama de sus aplicaciones se incrementarán aún más, de aquí la importancia de la producción del óxido de zinc, el autor indica:

El óxido de zinc es un semiconductor muy importante, debido a una gran variedad de propiedades que lo convierten en un material ideal para aplicaciones en biomedicina, dispositivos ópticos, fotocatalisis, dispositivos fotovoltaicos, etc. Sin embargo estas propiedades están limitadas por una serie de características, las cuales al ser optimizadas mediante el proceso de síntesis, pueden mejorar significativamente las propiedades eléctricas, ópticas, estructurales, morfológicas, etc. Con ello aumentará el rango de aplicaciones. (p. 12)

Según Ramos, P. (2016) en su tesis de grado *“Nanoestructuras de ZnO-TiO<sub>2</sub> preparadas por Electrospinning: Influencia de los precursores en la morfología, estructura y actividad fotocatalítica”* menciona que clásicamente el óxido de zinc se ha empleado como pigmento y protector de superficies metálicas, sin embargo con los avances de la tecnología se han presentado nuevas aplicaciones para este compuesto químico tal como la nanoelectrónica, con esto se confirma la relevancia que tiene la producción del óxido de zinc, el autor señala:

En la nueva era de la nanotecnología, ZnO ha demostrado aplicaciones que abarcan enormes campos de la nanoelectrónica, la óptica y la fotónica. Por ejemplo, nanoestructuras de ZnO se han utilizado como cristales fotónicos y fotodetectores. Estructuras del ZnO (a) Rocksalt y (b) zincblenda. Esferas grises representan los átomos de O y

las esferas negras representan los átomos de Zn. 14 diodos emisores de luz, sensores de gas, guías de ondas ópticas, celdas solares y varistores. Aunque en menor medida, los materiales nanoestructurados de ZnO también han recibido considerable interés para aplicaciones fotocatalíticas. (p. 13)

## CAPITULO II

### MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

#### 2.1. Marco Teórico

##### 2.1.1 Crisoles de grafito

Según Peña, I. (2017) afirma que los crisoles de grafito “*son resistentes a temperaturas por encima de los 1600 °C*” (p. 12), en consecuencia, los crisoles fabricados a partir del carbono en su presentación alotrópica como grafito son resistentes térmicamente, esta resistencia térmica hace que sean utilizados en los procesos de fusión de metales ferrosos y no ferrosos. Si a la composición química de los crisoles de grafito se le adiciona el carburo de silicio se logra mejorar sus propiedades mecánicas haciéndolos resistentes mecánicamente, además indica: “*Un gran avance tecnológico del crisol sucedió cuando se inició el uso de carburo de silicio en su composición, lo que le proporciona una mayor resistencia mecánica*” (p. 7), por tal razón los crisoles de grafito contienen en su composición química un porcentaje de carburo de silicio que les permite ser mecanizados mediante el uso de los tornos adoptando las dimensiones y formas físicas de acuerdo a las especificaciones técnicas requeridas para los procesos metalúrgicos.

### 2.1.2 Hornos de crisol

Los autores Suntaxi, E. y Torres, C. (2014) describen las características de un horno de crisol de grafito incluyendo sus tipos de acuerdo a la ubicación del crisol, en ese sentido mencionan: *“El horno de crisol es un equipo utilizado principalmente para la fusión de metales no ferrosos. En este equipo el metal a ser fundido se encuentra en el interior de un crisol fabricado de grafito o carburo de silicio”* (p. 22). Los tipos de hornos de crisol mencionados son: a) horno de crisol pozo; b) horno de crisol Bale Out; c) horno de crisol basculante; d) horno de crisol inmerso; y e) horno rotativo de crisol. De los tipos mencionados el que está en estudio en la presente investigación es el horno de crisol inmerso, del que los autores indican: *“Sus ventajas principales respecto de hornos de llama abierta son una mayor eficiencia, que alcanza a un 40% y pérdidas de metal de tan sólo 1 o 2%, otorgando una considerable economía financiera”* (p. 25).

De igual manera, Flores, E. y Orellana, R. (2014), en su tesis de grado titulado *“Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas”* describen el diseño y construcción de un horno de crisol con cámara cilíndrica, armado con ladrillos refractarios y revestido internamente con material refractario, cubierto externamente con láminas de fierro y material aislante térmico para evitar la pérdida de calor, según el diseño el crisol de grafito quedó en el centro de la cámara del horno.

### 2.1.3 Métodos de producción del óxido de zinc

Según Verdeja, L., García, P. y Huerta, A. (2017) en su artículo "*El óxido de zinc: propiedades y aplicaciones*" mencionan que el óxido de zinc se obtiene a partir de dos métodos principales:

a) Método americano o directo, el cual parte de las menas oxidadas o sulfuradas (previamente tostadas) de zinc. Para tal fin, en un horno tipo Wetherill se cargan los minerales antes mencionados junto al carbón de tipo antracita, la mezcla es fundida logrando una reacción química de reducción entre el monóxido de carbono (CO) y los minerales de zinc, el zinc reducido y en estado de vapor es oxidado produciéndose los polvos de óxido de zinc que son colectados en los filtros de mangas del sistema.

b) Método francés o indirecto, el cual parte del zinc metálico. El proceso se realiza en hornos de crisol de grafito, donde el zinc con pureza de 99.99% es cargado en el interior de los crisoles para su fusión y posterior vaporización, una vez en estado gaseoso es oxidado por el oxígeno contenido en el aire del sistema formándose los polvos de óxido de zinc que son filtrados en precipitadores mecánicos como los filtros de mangas.

### 2.1.4 Usos del óxido de zinc

Así mismo, Verdeja, L., García, P. y Huerta, A. (2017) mencionan que el óxido de zinc es utilizado principalmente en la industria del caucho y de las pinturas. La aplicación en la industria electrónica está progresando rápidamente como parte de los circuitos conductores.

Otra aplicación del óxido de zinc es mencionada por Ochoa, D. (2015) en su proyecto de investigación "*Desarrollo de un material compuesto de óxido de zinc impregnado en un soporte granular que presente actividad fotocatalítica*" donde se indica el uso del compuesto impregnado sobre andesita y carbón activado como soportes granulares, en este estudio se evalúa el nivel de aprovechamiento de su propiedad fotocatalítica para oxidar contaminantes, el estudio obtuvo un nivel de eficacia de 100% sobre la andesita.

## **2.2. Marco Conceptual**

### **2.2.1 Calor**

Cantidad de energía que origina un incremento en la temperatura del zinc o que genera un cambio de su estado físico.

### **2.2.2 Cama**

Capa de material sólido granular que sirve como base para colocar alguna pieza moldeada o acabada como el crisol de grafito.

### **2.2.3 Curado**

Proceso de recubrimiento superficial del crisol de grafito con aceite y vidrio molido para alargar su tiempo de vida.

#### **2.2.4 Envejecimiento**

Pérdida de las propiedades físicas y químicas del crisol de grafito a través del paso del tiempo.

#### **2.2.5 Fisura**

Grieta longitudinal en la superficie del crisol de grafito producto de las presiones internas del sistema.

#### **2.2.6 Fractura**

Rotura o separación de un crisol de grafito en dos o más partes producto de los esfuerzos mecánicos a los que se sometió.

#### **2.2.7 Horno**

Construcción de ladrillos refractarios, mantas de fibra de vidrio y carcasa metálica para calentar crisoles de grafito con la finalidad de fundir y vaporizar zinc metálico.

#### **2.2.8 Línea**

Conjunto de sistemas técnicos, tales como, el horno de fundición, el ciclón, el cuarto de sedimentación, los filtros de mangas y las tolvas, los cuales están organizados mediante procesos operativos secuenciales para producir el óxido de zinc.

### **2.2.9 Rendimiento**

Relación de cociente entre la energía calorífica consumida y la cantidad producida de óxido de zinc.

### **2.2.10 Tostado**

Proceso químico de oxidación de los concentrados sulfurados de zinc para lograr su oxidación y luego su reducción a zinc gaseoso.

### **2.2.11 Transferencia**

Movimiento del calor desde un cuerpo o material caliente a uno frío. Considerando esta definición se tiene tres tipos de transferencia de calor: por conducción, por convección y por radiación.

### **2.2.12 Vida**

Periodo de duración de un crisol de grafito desde el inicio de operaciones hasta la remoción del horno de fundición.

## **CAPITULO III**

### **DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1 Metodología de la investigación**

##### **3.1.1 Tipo y diseño de la investigación**

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo porque cumplió con cinco de las siete características epistemológicas de una investigación de este tipo, estas características se explican a continuación:

Primero, es de percepción objetiva porque se fundamentó en las teorías de la física clásica que sustenta la transformación de los estados físicos de la materia como también en la termodinámica de los materiales.

Segundo, es de razonamiento deductivo porque contrastó la hipótesis planteada con el resultado de la investigación.

Tercero, la finalidad del estudio fue la comprobación de la influencia del tiempo de vida de los crisoles en el rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc.

Cuarto, la investigación estuvo orientada al resultado considerando que el logro del objetivo generará beneficios a las partes interesadas del estudio.

Quinto, respecto al principio de verdad predeterminará próximos estudios o investigaciones a partir del resultado logrado.

El alcance de la investigación es de tipo correlacional porque se analizó la influencia entre las variables del estudio: tiempo de vida de los crisoles de grafito y rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc.

El diseño de la investigación es no experimental porque se limitó a observar el comportamiento de las variables sin interferir en el estudio, solo se registraron los datos necesarios para su posterior análisis y conclusión del tema.

### **3.1.2 Unidad de análisis**

La presente investigación tiene como unidad de análisis el horno de crisol de grafito de una línea de producción de óxido de zinc.

Características:

- Método de producción: Indirecto o francés
- Materia prima: Zinc SHG (Special High Grade: 99.99%)
  - o Especificación: Norma ASTM B6 – 03
  - o Especificación: Norma BS EN 1179:2003

- Combustible: Gas natural, el quemador industrial se encuentra instalado en el interior de la base del horno y es controlado electrónicamente a través de un software computarizado que administra el personal capacitado.
- Tipo de horno: Cilíndrico y concéntrico con el eje central del crisol de grafito, construido con ladrillos refractarios de formas y dimensiones mixtas, como también juntados con morteros refractarios para consolidar el horno, esta construcción está aislada térmicamente por una primera capa concéntrica de mantas de fibra de vidrio y luego una segunda capa concéntrica de metal ferroso para brindarle rigidez a la estructura del horno.
- Ubicación: El horno de crisol de grafito como unidad de análisis forma parte de una planta de producción de óxido de zinc. Esta planta a su vez forma parte de una empresa metalúrgica ubicada en la ciudad de Lima Metropolitana.

### 3.1.3 Matriz de consistencia

#### Análisis del tiempo de vida de los crisoles de grafito en el rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc en un horno de crisol

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables		Indicadores	Técnicas e instrumentos de recolección de datos
			Dependiente	Independiente		
¿Cómo influye el tiempo de vida de los crisoles de grafito en el menor rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc?	Determinar el tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito para mejorar el rendimiento térmico en la producción de óxido de zinc.	Al analizar la influencia del tiempo de vida de los crisoles de grafito se logrará mejorar el rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc.	Rendimiento térmico en la producción de óxido de zinc.	Tiempo de vida de los crisoles de grafito.	*Número de días operativos acumulados del crisol (días). * Consumo diario de gas natural (sm <sup>3</sup> ). * Pesos de la producción diaria de óxido de zinc (t).	Reportes diarios de los operarios del horno de la línea de producción.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Recolección de datos

Los datos se recopilaban de forma manual usando formatos de papel con tablas impresas, se registraron a través de los manuscritos de los operarios capacitados en las lecturas de los medidores de consumo de gas natural, en el seguimiento del tiempo de vida de los crisoles de grafito y en la anotación de los pesos de la producción diaria de óxido de zinc.

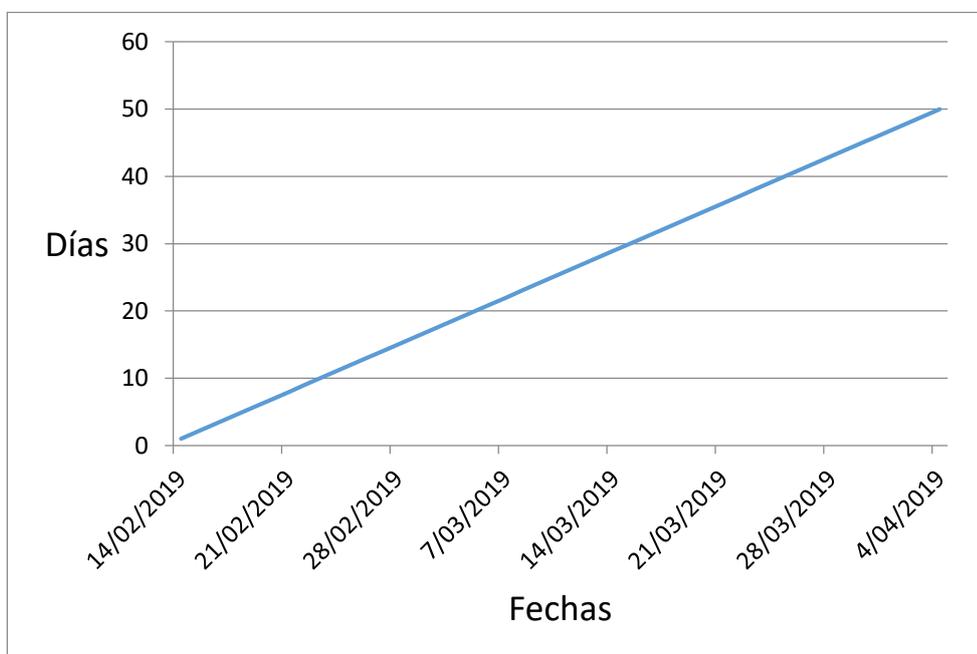
Diariamente se registraron los datos en los campos vacíos de los formatos del tiempo de vida de los crisoles, del consumo de gas natural y de los pesos de producción del óxido de zinc. Cada registro de datos diario se codificó con las fechas respectivas del día calendario operativo. Los registros con información completa se entregaron al investigador para su administración.

La información recopilada de la línea de producción de óxido de zinc se transcribió a hojas de cálculo de Microsoft Excel con la finalidad de elaborar bases de datos, tablas numéricas y gráficos para la presentación en esta parte del trabajo de investigación.

La investigación se realizó en la Línea "A" de la planta de producción de óxido de zinc, esta Línea tuvo tres Lotes de producción durante el año 2019, Lote N° 1, Lote N° 2 y Lote N° 3, cada Lote de producción se inició con crisoles nuevos en el horno de fundición, por esta razón se tuvieron tres periodos de vida para los crisoles de grafito, cada una asociada a cada Lote de producción. Los datos recolectados del tiempo de vida de los crisoles de grafito, del consumo de gas natural y de los pesos de producción del óxido de zinc se detallan a continuación:

### 3.2.1 Tiempo de vida de los crisoles de grafito

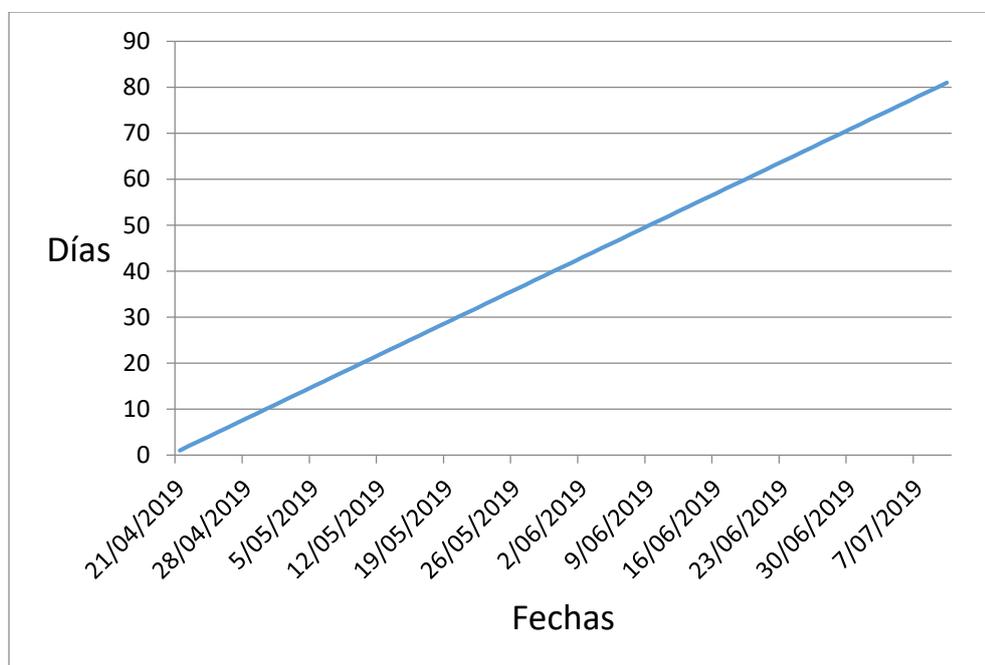
Para registrar el tiempo de vida de los crisoles en cada Lote de producción de óxido de zinc se realizó el conteo diario del número de días operativos acumulados de los crisoles desde el inicio hasta el fin de la producción, estos datos se midieron en las unidades de días. Los datos referentes al registro del tiempo de vida de los crisoles de grafito en el Lote N° 1 de la Línea "A" se encuentran detallados en el Anexo N° 1. Este Lote inició la producción el 14 de febrero del 2019 y terminó el 4 de abril del 2019, por tanto, luego del conteo de días operativos acumulados se obtuvo un total de 50 días como tiempo de vida de los crisoles de grafito correspondientes al Lote N° 1. En la Figura 3.1 se muestra el comportamiento lineal del tiempo de vida acumulado para los crisoles de grafito de acuerdo a las fechas operativas del Lote N° 1.



**Figura 3.1** Tiempo de vida de los crisoles para el Lote N° 1

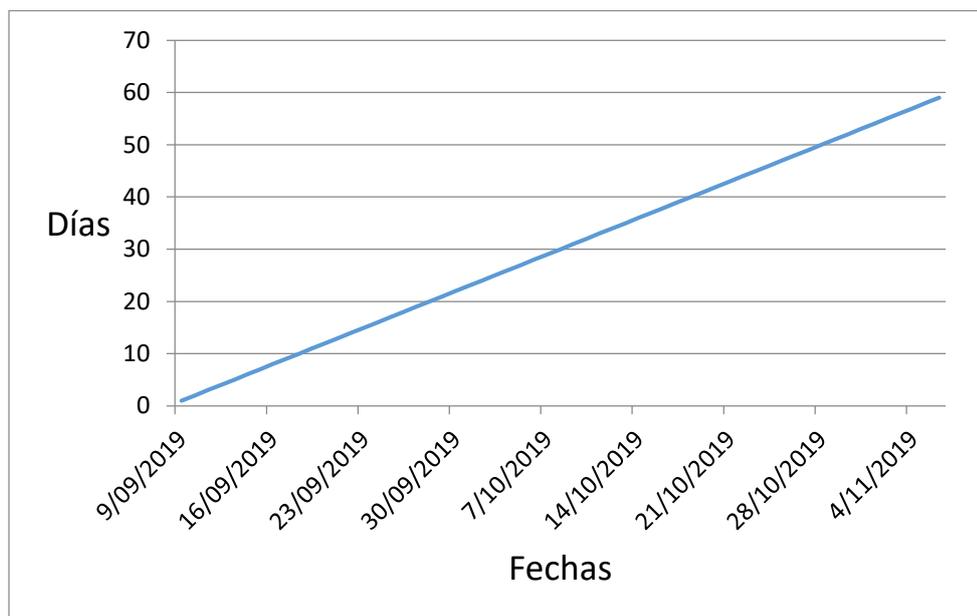
Fuente: Elaboración propia

El Lote N° 2 inició la producción el 21 de abril del 2019 y concluyó el 10 de julio del 2019. En este Lote se obtuvo un total de 81 días como tiempo de vida de los crisoles de grafito. Los datos correspondientes al Lote N° 2 de la Línea "A" se encuentran en el Anexo N° 2. En la Figura 3.2 se presenta la linealidad del tiempo de vida acumulado de los crisoles para el Lote N° 2.



**Figura 3.2** Tiempo de vida de los crisoles para el Lote N° 2  
Fuente: Elaboración propia

El Lote N° 3 comenzó la producción el 9 de septiembre del 2019 y terminó el 6 de noviembre del 2019. En este Lote se obtuvo 59 días como tiempo de vida para los crisoles de grafito. El Anexo N° 3 contiene los datos respectivos al Lote N° 3 de la Línea "A". La Figura 3.3 presenta la tendencia lineal del tiempo de vida de los crisoles para el Lote N° 3.



**Figura 3.3** Tiempo de vida de los crisoles para el Lote N° 3  
Fuente: Elaboración propia

Los Lotes N° 1, 2 y 3 representan una muestra de la población de los Lotes de producción en el horno de fundición de la Línea “A” dentro de la planta de óxido de zinc.

En la Tabla 3.1 se presenta el resumen de los datos registrados para el tiempo de vida de los crisoles de grafito de los Lotes N° 1, 2 y 3.

**Tabla 3.1**  
*Tiempo de vida de los crisoles por Lotes*

Resumen	
Muestra	Tiempo de vida de los crisoles (días)
Lote N° 1	50
Lote N° 2	81
Lote N° 3	59

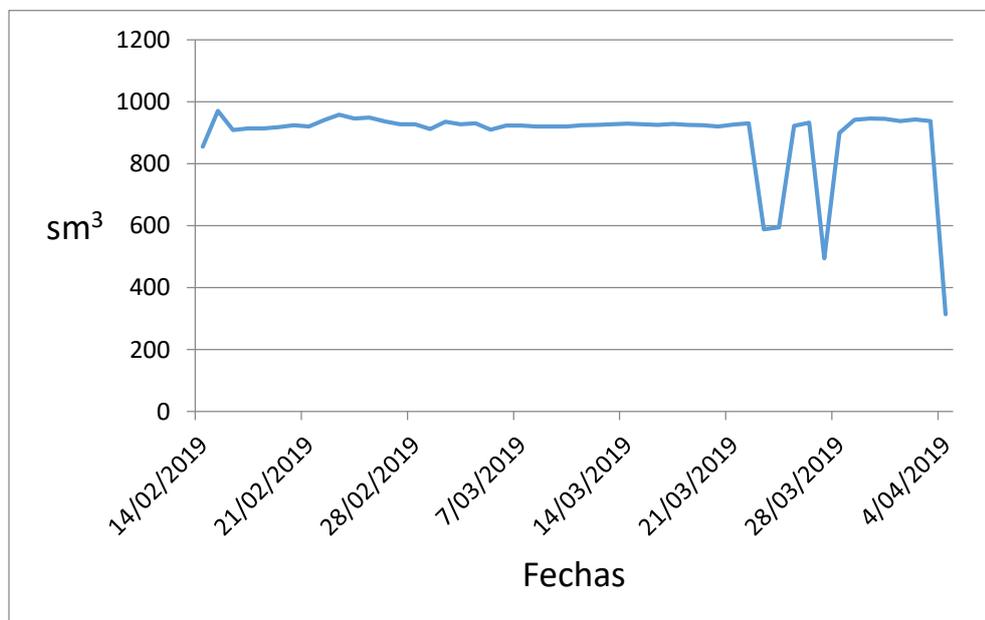
Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2 Consumo de gas natural

Los datos de los consumos diarios de gas natural se obtuvieron a través de las lecturas del medidor instalado en el horno de fundición correspondiente a la Línea "A". Este consumo se midió en unidades de metros cúbicos estándares ( $\text{sm}^3$  por sus iniciales en inglés) desde el comienzo hasta el final de cada Lote de producción de óxido de zinc.

Los datos correspondientes al registro de consumos diarios de gas natural en el Lote N° 1 se encuentran ampliados en el Anexo N° 4. El consumo promedio de gas natural para este Lote se calculó en un valor de  $893 \text{ sm}^3$ .

En la Figura 3.4 se muestra los consumos de gas natural de acuerdo a las fechas de producción correspondientes al Lote N° 1.

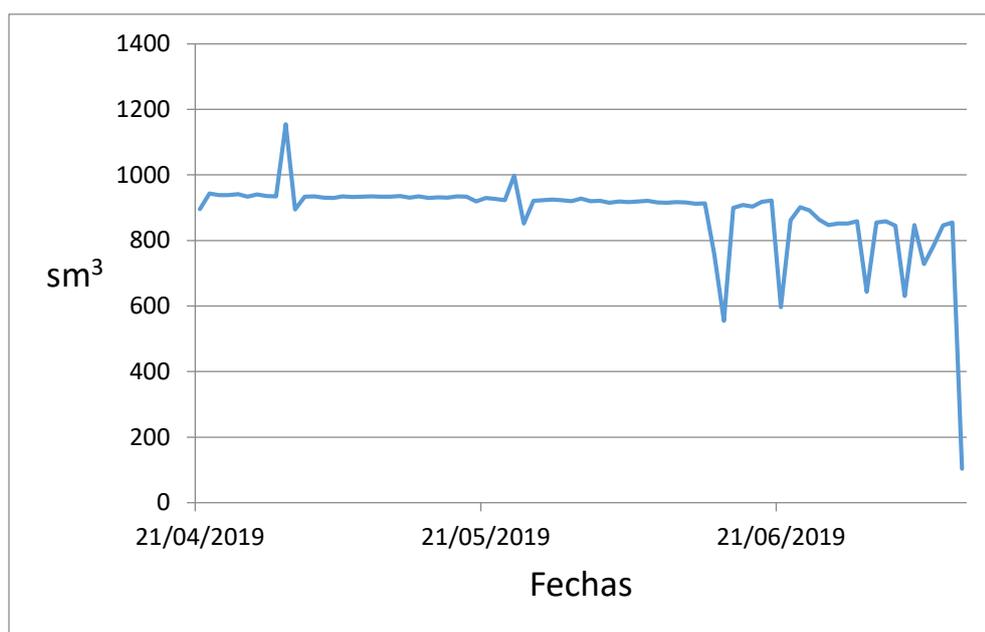


**Figura 3.4** Consumo de gas natural para el Lote N° 1

Fuente: Elaboración propia

La información recopilada sobre los consumos de gas natural para el Lote N° 2 están especificados en el Anexo N° 5. El consumo promedio de gas natural en este Lote se cuantificó en un valor de 884 sm<sup>3</sup>.

En la Figura 3.5 se indica los consumos diarios de gas natural para el Lote N° 2 según las fechas de producción.

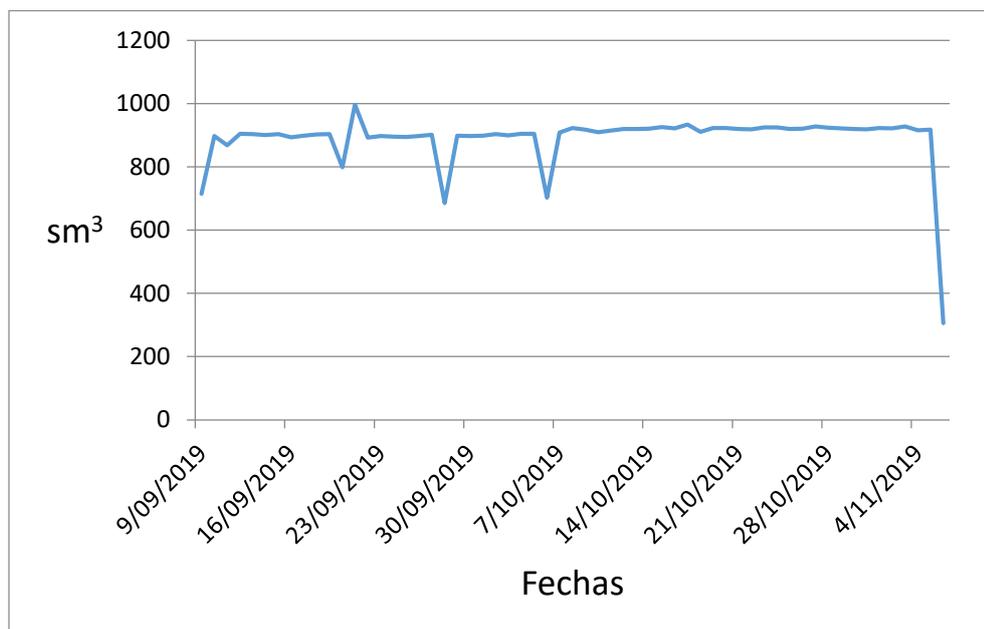


**Figura 3.5** Consumo de gas natural para el Lote N° 2

Fuente: Elaboración propia

Los datos correspondientes a los consumos diarios de gas natural para el Lote N° 3 están indicados en el Anexo N° 6. El consumo promedio de gas natural para este Lote se determinó en un valor de 889 sm<sup>3</sup>.

En la Figura 3.6 se expone las mediciones de consumo de gas natural para el Lote N° 3.



**Figura 3.6** Consumo de gas natural para el Lote N° 3

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.2 se muestra el resumen de los consumos promedio de gas natural para los Lotes N° 1, 2 y 3 de la producción de óxido de zinc.

**Tabla 3.2**

*Consumo de gas natural por Lotes*

Resumen	
Muestra	Consumo promedio de Gas Natural (sm³)
Lote N° 1	893
Lote N° 2	884
Lote N° 3	889

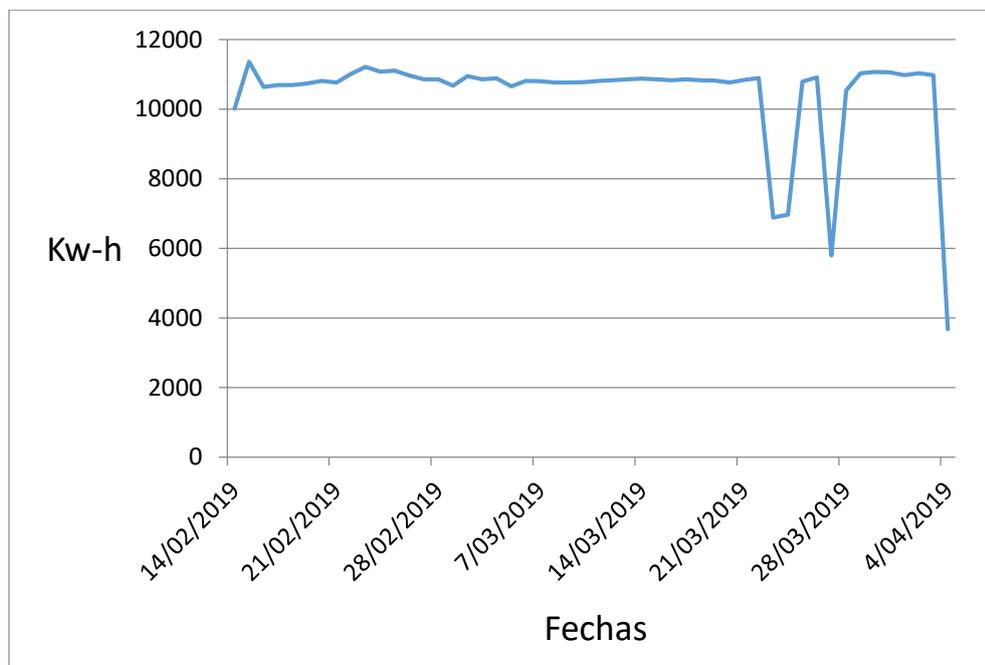
Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3 Consumo de energía calorífica

Los datos correspondientes a los consumos de energía calorífica se obtuvieron de la multiplicación de los consumos diarios de gas natural por un factor de conversión de 11.7 Kw-h/sm<sup>3</sup>. Los consumos diarios de energía calorífica están expresados en unidades de Kw-h.

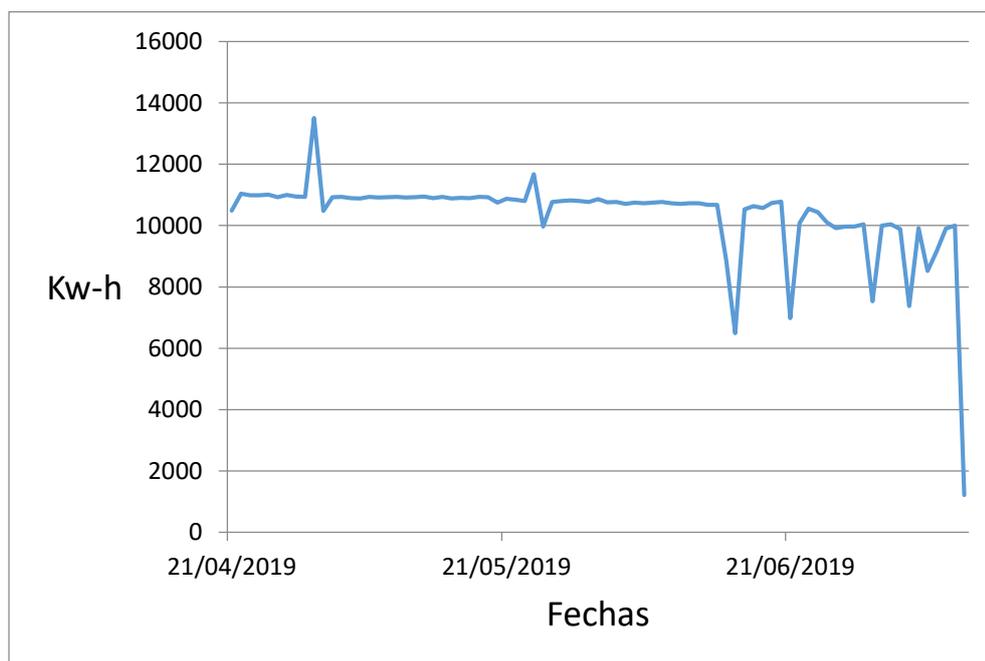
La información recopilada sobre los consumos de energía calorífica para el Lote N° 1 de producción de óxido de zinc están precisados en el Anexo N° 7. El consumo promedio de energía calorífica para este Lote se calculó en un valor de 10450 Kw-h.

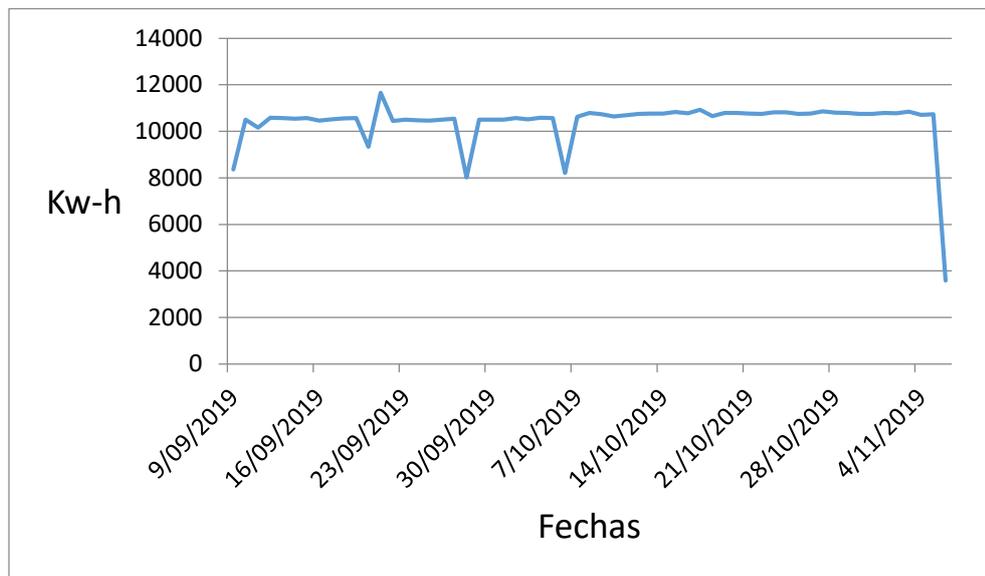
En la Figura 3.7 se expone la tendencia del consumo de energía calorífica para el Lote N° 1.



**Figura 3.7** Consumo de energía calorífica para el Lote N° 1  
Fuente: Elaboración propia

Los datos del consumo diario de energía calorífica para el Lote N° 2 se encuentran especificados en el Anexo N° 8. El consumo promedio de energía calorífica para este Lote se determinó en un valor de 10348 Kw-h. En la Figura 3.8 se muestra el comportamiento de los consumos diarios de energía calorífica para el Lote N° 2.





**Figura 3.9** Consumo de energía calorífica para el Lote N° 3  
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.3 se expone el resumen de los consumos promedio de energía calorífica para los Lotes N° 1, 2 y 3 de la producción de óxido de zinc en la Línea "A".

**Tabla 3.3**  
*Consumo de energía calorífica por Lotes*

Resumen	
Muestra	Consumo promedio de Energía Calorífica (Kw-h)
Lote N° 1	10450
Lote N° 2	10348
Lote N° 3	10405

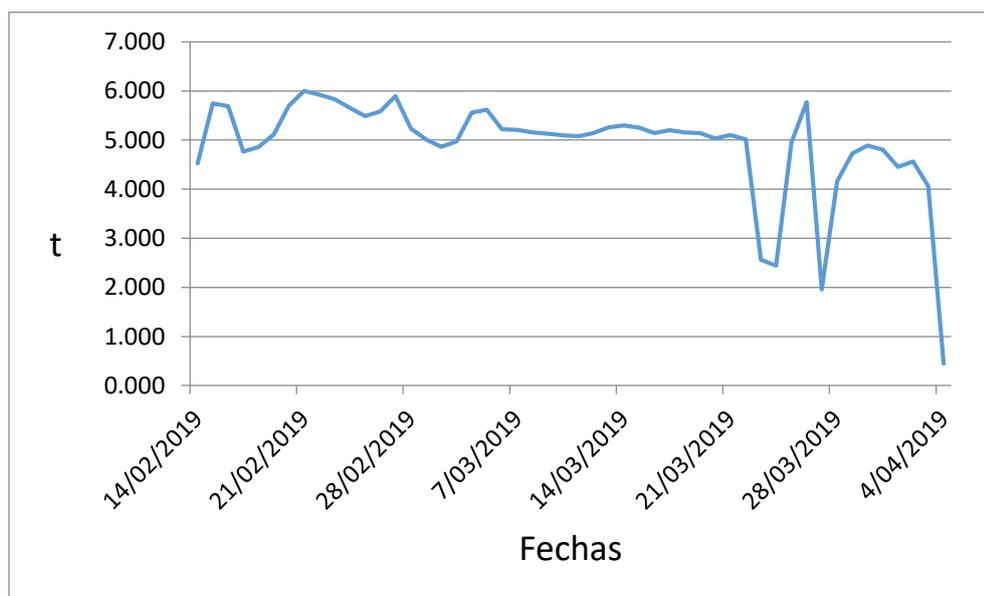
Fuente: Elaboración propia

### 3.2.4 Peso de la producción de óxido de zinc

La información correspondiente a los pesos de la producción se consiguió a través de los pesajes de la descarga diaria de óxido de zinc de la Línea "A", las mediciones de los pesos se realizaron en una balanza electrónica industrial de plataforma. Los pesos se reportaron en toneladas (t) como unidad de medida para la producción del óxido de zinc.

Los datos obtenidos sobre los pesos de producción diaria de óxido de zinc para el Lote N° 1 se detallan en el Anexo N° 10. El peso promedio de producción para este Lote se cuantificó en un valor de 4.909 t.

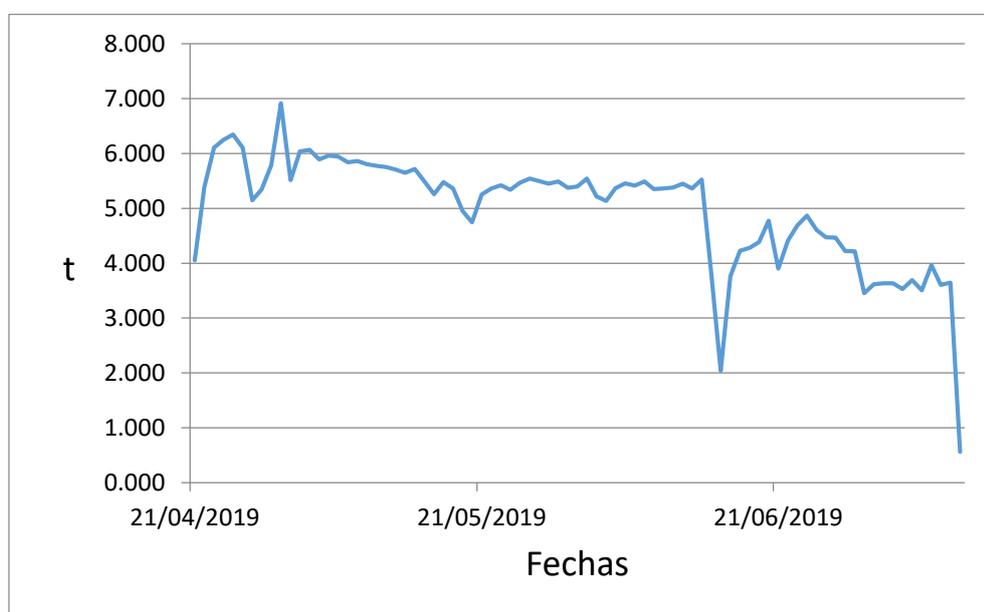
En la Figura 3.10 se presenta la tendencia de los pesos diarios para la producción del Lote N° 1.



**Figura 3.10** Pesos de producción de óxido de zinc para el Lote N° 1  
Fuente: Elaboración propia

La información recopilada sobre los pesos de producción de óxido de zinc correspondiente al Lote N° 2 se pormenorizan en el Anexo N° 11. El peso promedio de producción de óxido de zinc para este Lote se determinó en un valor de 4.985 t.

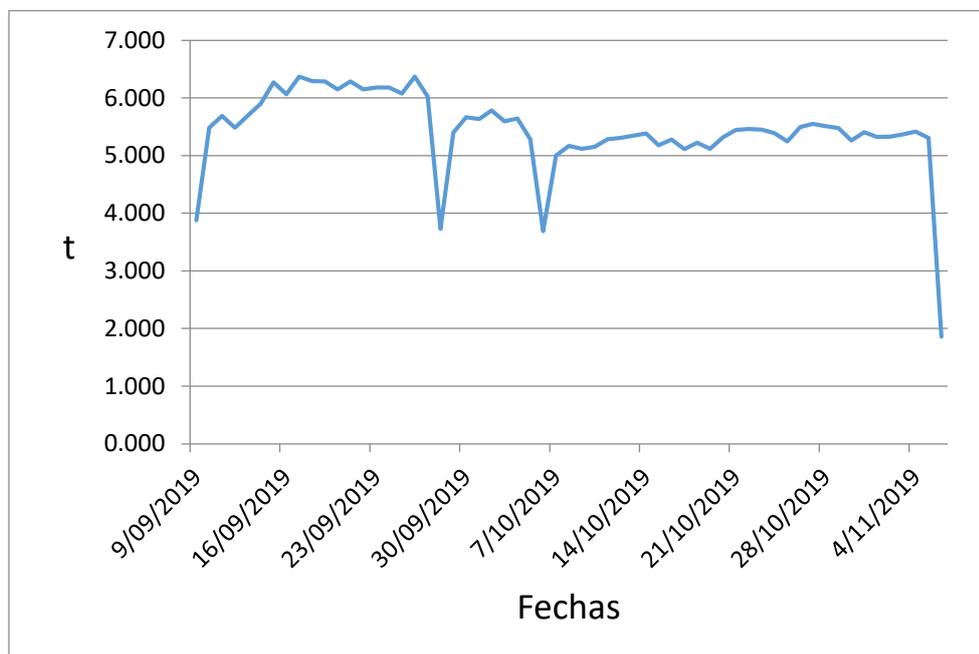
En la Figura 3.11 se muestra el comportamiento de los pesos diarios para la producción de óxido de zinc durante las fechas de fabricación del Lote N° 2.



**Figura 3.11** Pesos de producción de óxido de zinc para el Lote N° 2  
Fuente: Elaboración propia

Los datos registrados sobre los pesos de producción de óxido de zinc para las fechas correspondientes al Lote N° 3 se encuentran precisados en el Anexo N° 12. El peso promedio de producción de óxido de zinc durante la manufactura de este Lote se calculó en un valor de 5.432 t.

En la Figura 3.12 se expone la tendencia de los pesos diarios de producción de óxido de zinc para la fabricación del Lote N° 3.



**Figura 3.12** Pesos de producción de óxido de zinc para el Lote N° 3  
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.4 se presenta el resumen de los pesos promedio de producción diaria de óxido de zinc por cada Lote de fabricación para la Línea "A".

**Tabla 3.4**

*Peso promedio de producción diaria de óxido de zinc por Lotes*

Resumen	
Muestra	Peso promedio de producción diaria de ZnO (t)
Lote N° 1	4.909
Lote N° 2	4.985
Lote N° 3	5.432

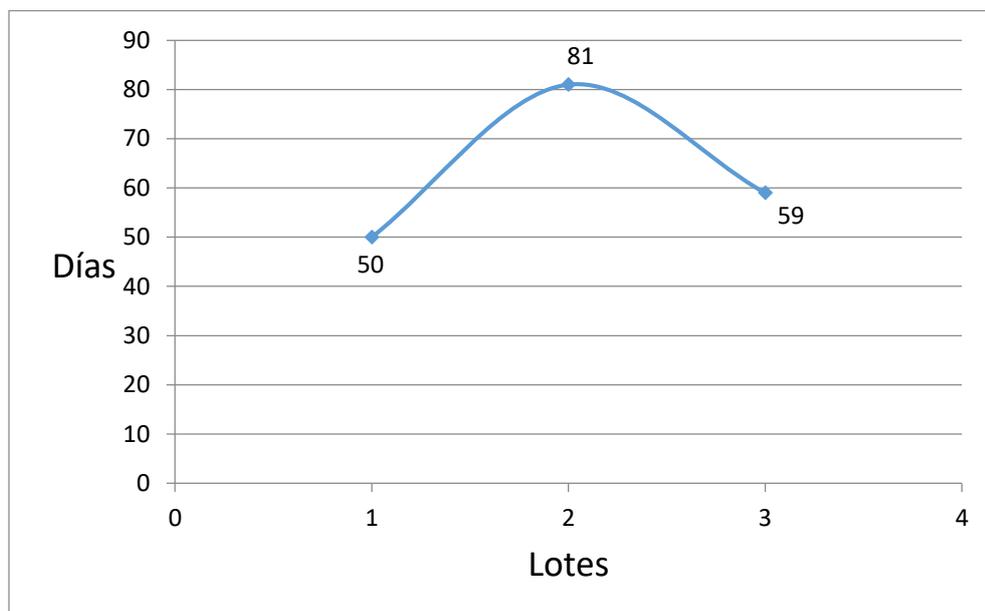
Fuente: Elaboración propia

### **3.3 Procesamiento de la información**

La información recopilada en los registros correspondientes al tiempo de vida de los crisoles de grafito, consumo de gas natural, consumo de energía calorífica y pesos de producción de óxido de zinc se encuentran pormenorizados desde el Anexo N° 1 hasta el Anexo N° 12 en el presente trabajo de investigación. El investigador ha transcrito estos datos de los registros físicos a las hojas de cálculo de Microsoft Excel.

En esta etapa se tuvo especial cuidado en la correcta transcripción de los datos manuales a datos digitales, los registros manuales que se transcribieron están archivados en el almacén documentario de la planta de óxido de zinc. La información digital está grabada en dos discos duros diferentes como respaldo y seguridad de la investigación. Los datos digitalizados se han organizado en tablas y gráficos para su presentación en esta parte del trabajo de investigación.

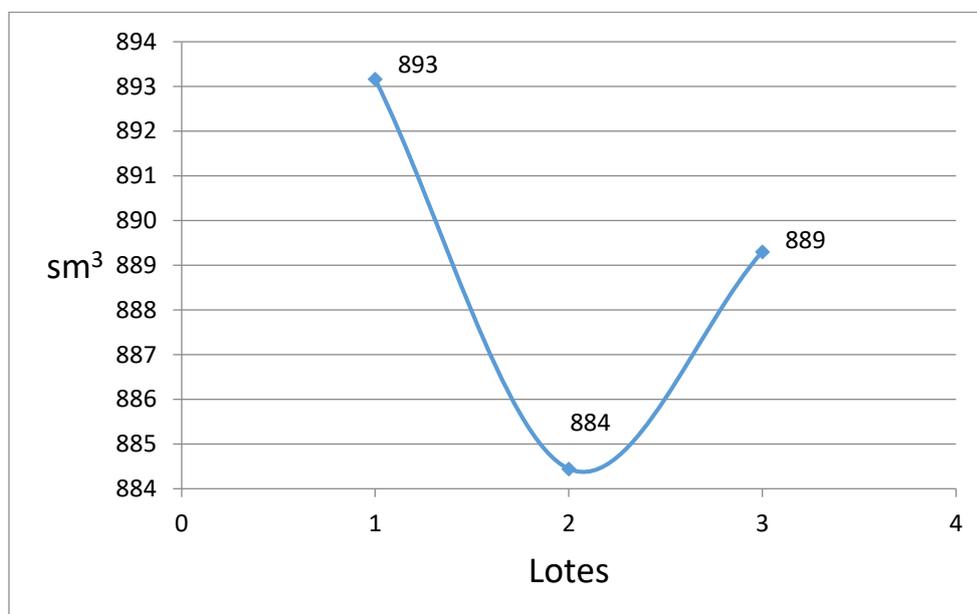
En la Figura 3.13 se muestra los datos referentes al tiempo de vida de los crisoles de grafito en cada Lote de producción de óxido de zinc.



**Figura 3.13** Tiempo de vida de los crisoles por Lote

Fuente: Elaboración propia

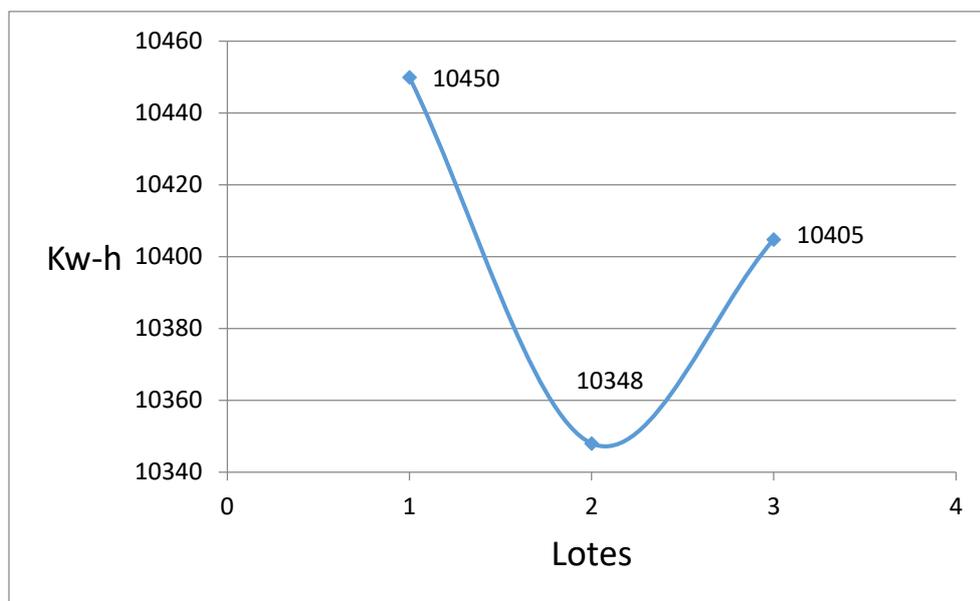
En la Figura 3.14 se presenta la información correspondiente al consumo diario promedio de gas natural para cada Lote de producción de óxido de zinc en la Línea "A".



**Figura 3.14** Consumo diario promedio de gas natural por Lote

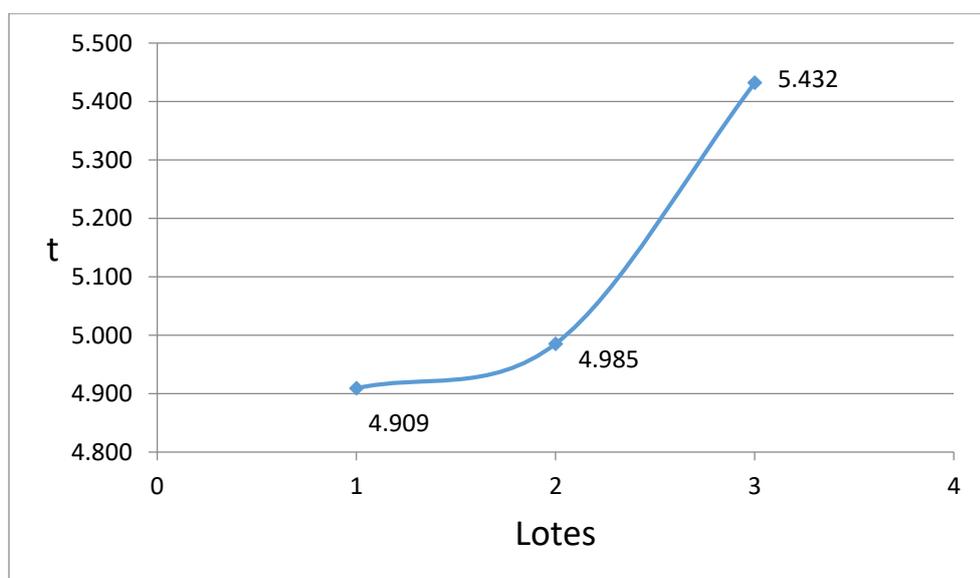
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.15 se expone los datos correspondientes al consumo diario promedio de energía calorífica para cada Lote de producción de óxido de zinc en la Línea "A".



**Figura 3.15** Consumo diario promedio de energía calorífica por Lote  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.16 se presenta la información referente al peso promedio de producción diaria de óxido de zinc por cada Lote en la Línea "A".



**Figura 3.16** Peso promedio de producción diaria de óxido de zinc por Lote  
Fuente: Elaboración propia

### 3.4 Análisis de la información

Con la información recopilada y procesada a través de hojas de cálculo de Microsoft Excel se elaboraron las curvas que representan el tiempo de vida de los crisoles de grafito, los consumos de gas natural por día, los consumos de energía calorífica por día y los pesos diarios de óxido de zinc producido en el horno de crisoles en estudio. Los datos de las curvas obtenidas se analizaron estadísticamente en parejas a través del Coeficiente de Pearson para determinar el grado de correlación estadística existente entre ellos, es decir, este análisis permitió conocer el nivel de influencia de los datos de una curva en los datos de otra.

En la Tabla 3.5 se presenta los criterios del análisis de correlación estadística.

**Tabla 3.5**  
*Criterios para el Análisis de Correlación*

Criterios del Análisis de Correlación Estadística	
Coeficiente de Pearson (r)	Tipo de Correlación
$r = -1$	Correlación inversa perfecta
$-1 < r < 0$	Correlación inversa
$r = 0$	No hay correlación
$0 < r < 1$	Correlación directa
$r = 1$	Correlación directa perfecta

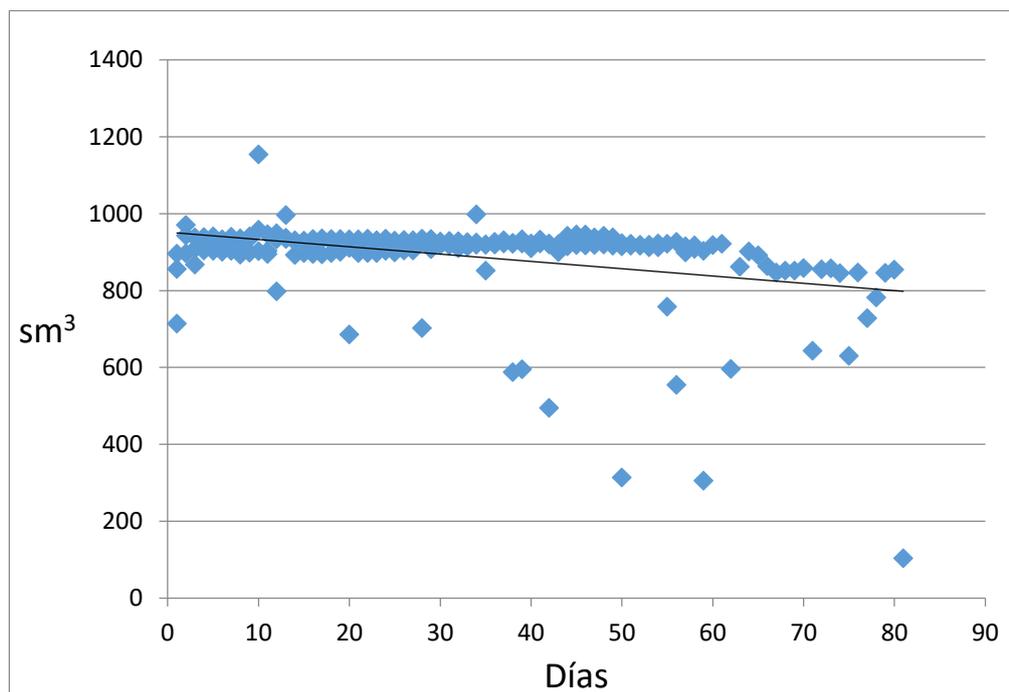
Fuente: Elaboración propia

### **3.4.1 Análisis de Correlación del Tiempo de vida de los crisoles y el Consumo de gas natural**

Para realizar el análisis de correlación entre el tiempo de vida de los crisoles de grafito y el consumo de gas natural se consideró la utilización de los datos detallados en los Anexos N° 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

El análisis de correlación se realizó mediante la aplicación del comando Análisis de Datos y Coeficiente de Correlación de Microsoft Excel.

El resultado de este análisis determinó que el coeficiente de correlación ( $r =$  coeficiente de Pearson) es de  $r = -0.35$  lo que indica que existe una correlación inversa entre el tiempo de vida de los crisoles y el consumo del gas natural, esta correlación se muestra en la Figura 3.17.



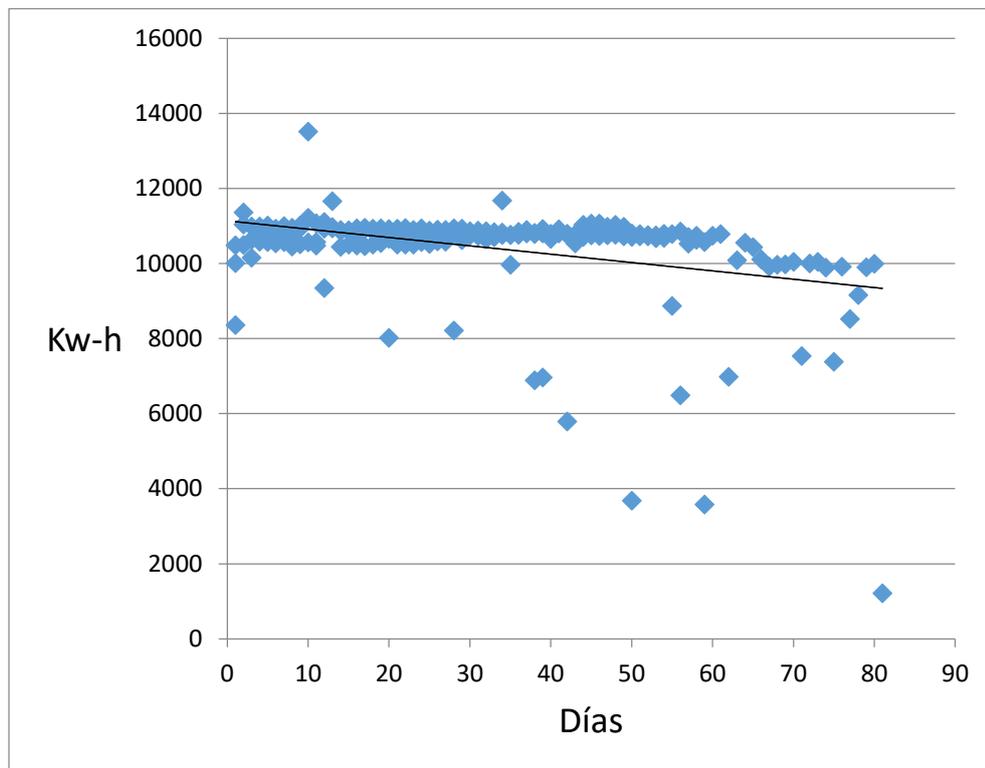
**Figura 3.17** Correlación entre el tiempo de vida de los crisoles y el consumo de gas natural

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.2 Análisis de Correlación del Tiempo de vida de los crisoles y el Consumo de energía calorífica

Para efectuar el análisis de correlación entre el tiempo de vida de los crisoles de grafito y el consumo de energía calorífica se utilizaron los datos precisados en los Anexos N° 1, 2, 3, 7, 8 y 9.

El análisis de correlación se realizó mediante la aplicación del Análisis de Datos y Coeficiente de Correlación de Microsoft Excel. El resultado de este análisis calculó que el coeficiente de correlación ( $r =$  coeficiente de Pearson) es de  $r = -0.35$  lo que indica que existe una correlación inversa entre el tiempo de vida de los crisoles y el consumo de energía calorífica, esta correlación se presenta en la Figura 3.18.



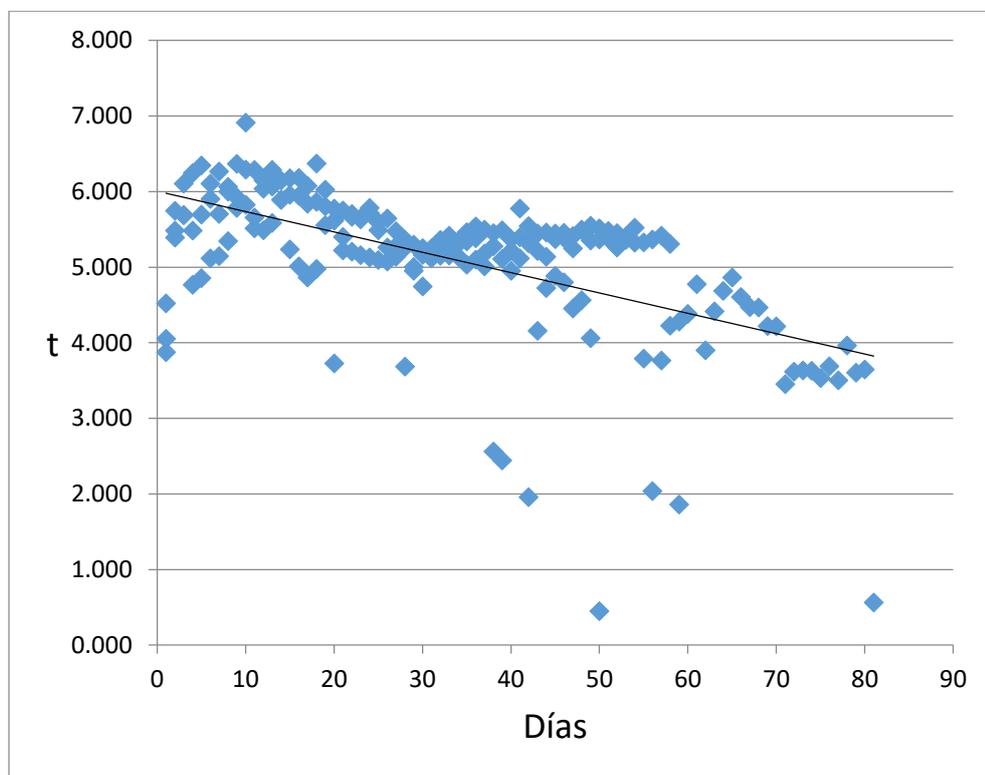
**Figura 3.18** Correlación entre el tiempo de vida de los crisoles y el consumo de energía calorífica  
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3 Análisis de Correlación del Tiempo de vida de los crisoles y el Peso de producción de óxido de zinc

Para ejecutar el análisis de correlación entre el tiempo de vida de los crisoles de grafito y el peso de producción de óxido de zinc se consideraron los datos pormenorizados en los Anexos N° 1, 2, 3, 10, 11 y 12. El análisis de correlación se realizó mediante la aplicación del Análisis de Datos y Coeficiente de Correlación de Microsoft Excel.

El resultado de este análisis determinó que el coeficiente de correlación ( $r$  = coeficiente de Pearson) es de  $r = -0.58$  lo que indica que existe una correlación inversa entre el tiempo de vida de los crisoles y el peso de

producción de óxido de zinc, esta correlación se expone en la Figura 3.19.



**Figura 3.19** Correlación entre el tiempo de vida de los crisoles y el peso de producción de óxido de zinc

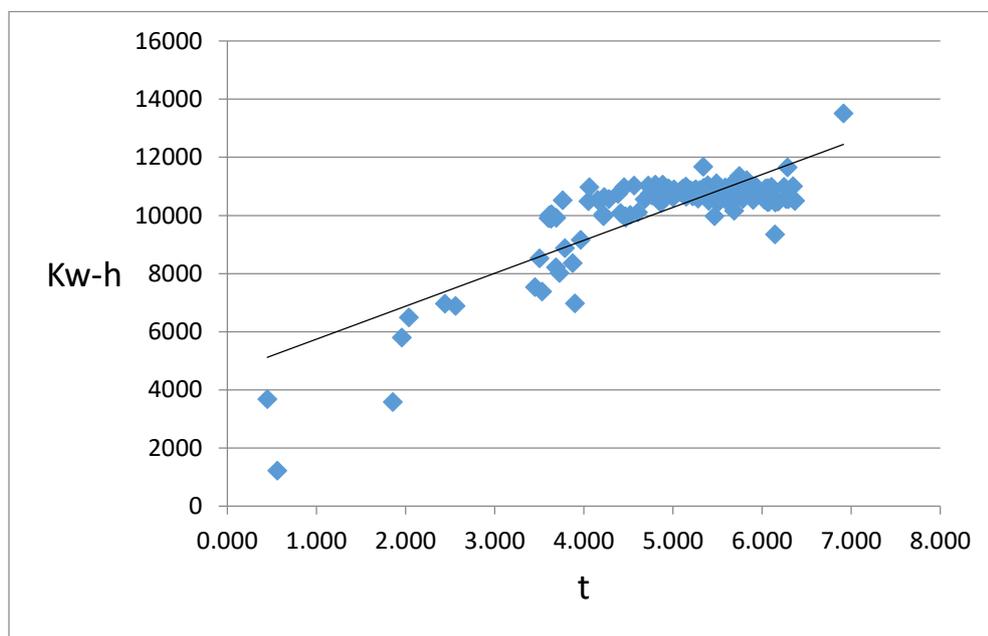
Fuente: Elaboración propia

#### **3.4.4 Análisis de Correlación del Consumo de energía calorífica y el Peso de producción de óxido de zinc**

Para realizar el análisis de correlación entre el consumo de energía calorífica y el peso de producción de óxido de zinc se consideraron los datos indicados en los Anexos N° 7, 8, 9, 10, 11 y 12.

El análisis de correlación se ejecutó mediante la aplicación del comando Análisis de Datos y Coeficiente de Correlación de Microsoft Excel.

El resultado de este análisis determinó que el coeficiente de correlación ( $r =$  coeficiente de Pearson) es de  $r = 0.82$  lo que significa que existe una correlación directa entre el consumo de energía calorífica y el peso de producción de óxido de zinc, esta correlación se muestra en la Figura 3.20.



**Figura 3.20** Correlación entre el consumo de energía calorífica y el peso de producción de óxido de zinc  
Fuente: Elaboración propia

## CAPITULO IV

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 Análisis y discusión de los resultados de las correlaciones

Los análisis de correlación que se presentaron en la sección 3.4 a través de los resultados de los respectivos coeficientes de correlación (r) (coeficientes de Pearson) y de las dispersiones de los datos mostrados en las Figuras 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20 indican la existencia de influencias directas e inversas entre unos y otros datos como se expone en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1**

*Resumen de los Coeficientes de Correlación de los datos analizados*

Análisis de Correlación	
Resumen	
Datos analizados	Coeficiente de Correlación (r)
Tiempo de vida de los crisoles versus Consumo de gas natural	-0.35
Tiempo de vida de los crisoles versus Consumo de energía calorífica	-0.35
Tiempo de vida de los crisoles versus Pesos de producción de ZnO	-0.58
Consumo de energía calorífica versus Pesos de producción de ZnO	0.82

Fuente: Elaboración propia

Los coeficientes de correlación de los análisis realizados al Tiempo de vida de los crisoles versus el Consumo de gas natural y al Tiempo de vida de los crisoles versus el Consumo de energía son iguales en el valor de  $r = -0.35$ , los coeficientes indican correlaciones de tipo inversa, esto significa que a mayor tiempo de vida de los crisoles de grafito menor es el consumo de gas natural y también el consumo de energía calorífica.

El coeficiente de correlación del análisis efectuado al Tiempo de vida de los crisoles versus los Pesos de producción de óxido de zinc obtuvo un valor de  $r = -0.58$ , el coeficiente representa una correlación de tipo inversa, esto significa que a mayor tiempo de vida de los crisoles de grafito menor es el peso de producción de óxido de zinc.

El coeficiente de correlación del análisis ejecutado al Consumo de energía calorífica versus los Pesos de producción de óxido de zinc consiguió un valor de  $r = 0.82$ , el coeficiente muestra una correlación de tipo directa, esto significa que a mayor peso de producción de óxido de zinc mayor es el consumo de energía calorífica.

Los resultados previamente descritos confirmaron una influencia directa o inversa entre los datos analizados, con este conocimiento se preparó el análisis de la influencia del tiempo de vida de los crisoles de grafito en el rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc.

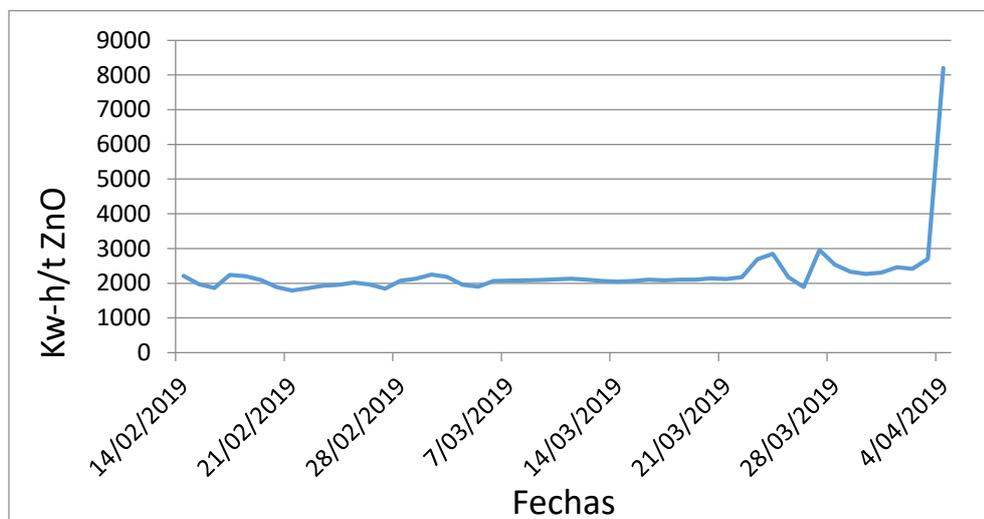
#### **4.2 Análisis de la influencia del tiempo de vida de los crisoles en el rendimiento térmico**

El análisis de la influencia del tiempo de vida de los crisoles de grafito en el rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc se inició con la determinación del indicador de rendimiento térmico, el cual se definió como el consumo de energía calorífica para la producción de una tonelada de óxido de zinc, las unidades de medición se expresaron en Kw-h /t ZnO.

La información correspondiente a los rendimientos térmicos diarios se obtuvo de los cálculos respectivos al dividir los consumos diarios de energía calorífica (Kw-h) entre los pesos diarios de producción de óxido de zinc (t).

Los datos de los rendimientos térmicos obtenidos para cada Lote de producción de óxido de zinc se detallan en los Anexos respectivos.

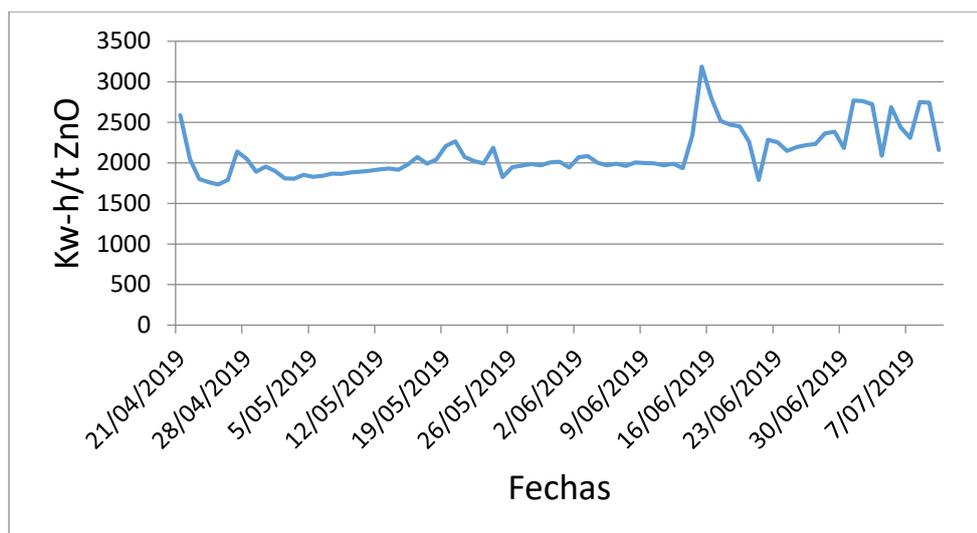
En el Anexo N° 13 se pormenoriza los datos correspondientes a los Rendimientos térmicos para la producción de óxido de zinc del Lote N° 1. El Rendimiento térmico promedio para este Lote se cuantificó en un valor de 2277 Kw-h/t ZnO. En la Figura 4.1 se muestra la tendencia del rendimiento térmico para la producción de este Lote.



**Figura 4.21** Rendimiento térmico para el Lote N° 1

Fuente: Elaboración propia

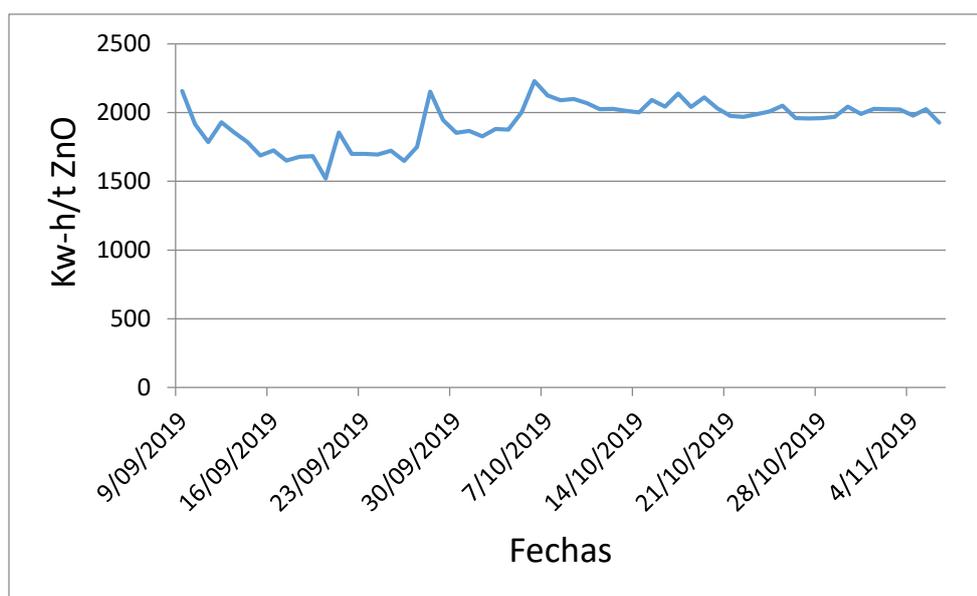
Los datos correspondientes al Rendimiento térmico para el Lote N° 2 están precisados en el Anexo N° 14. El Rendimiento térmico promedio para este Lote se determinó en un valor de 2121 Kw-h/t ZnO. En la Figura 4.2 se expone el comportamiento del rendimiento térmico para este Lote.



**Figura 4.22** Rendimiento térmico para el Lote N° 2

Fuente: Elaboración propia

La información correspondiente al Rendimiento térmico diario para la producción de óxido de zinc del Lote N° 3 están indicados en el Anexo N° 15. El Rendimiento térmico promedio para este Lote se calculó en un valor de 1929 Kw-h/t ZnO. En la Figura 4.3 se presenta la tendencia de los rendimientos térmicos para este Lote.



**Figura 4.23** Rendimiento térmico para el Lote N° 3

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.2 se muestra el resumen de los rendimientos térmicos promedio para la producción de óxido de zinc por cada Lote de fabricación en la Línea "A".

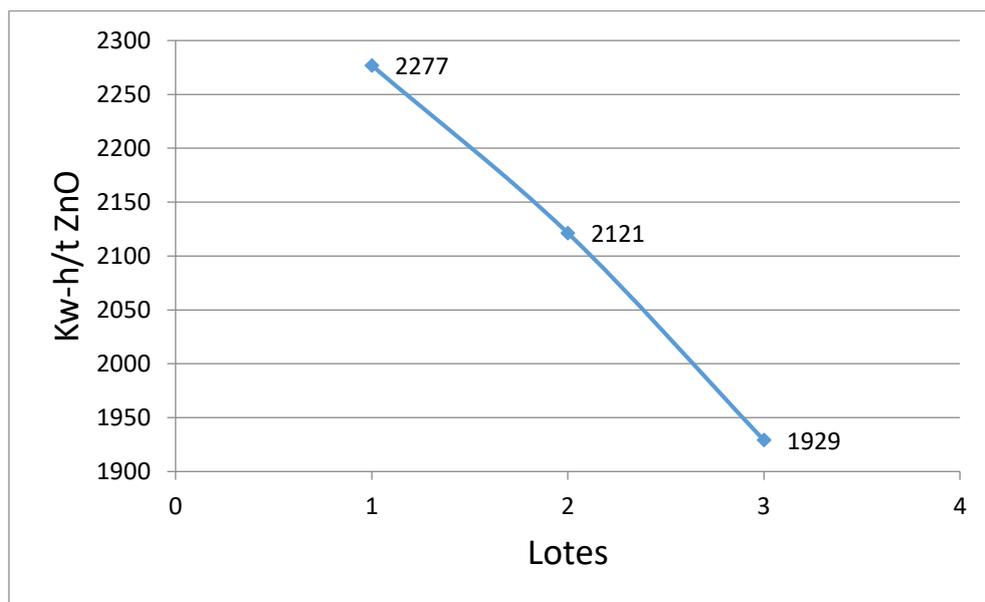
**Tabla 4.2**

*Resumen del Rendimiento térmico promedio por Lote*

Resumen	
Muestra	Rendimiento térmico promedio (Kw-h/t ZnO)
Lote N° 1	2277
Lote N° 2	2121
Lote N° 3	1929

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.4 se expone gráficamente los datos correspondientes al rendimiento térmico promedio para la producción de óxido de zinc por cada Lote de fabricación en la Línea "A".

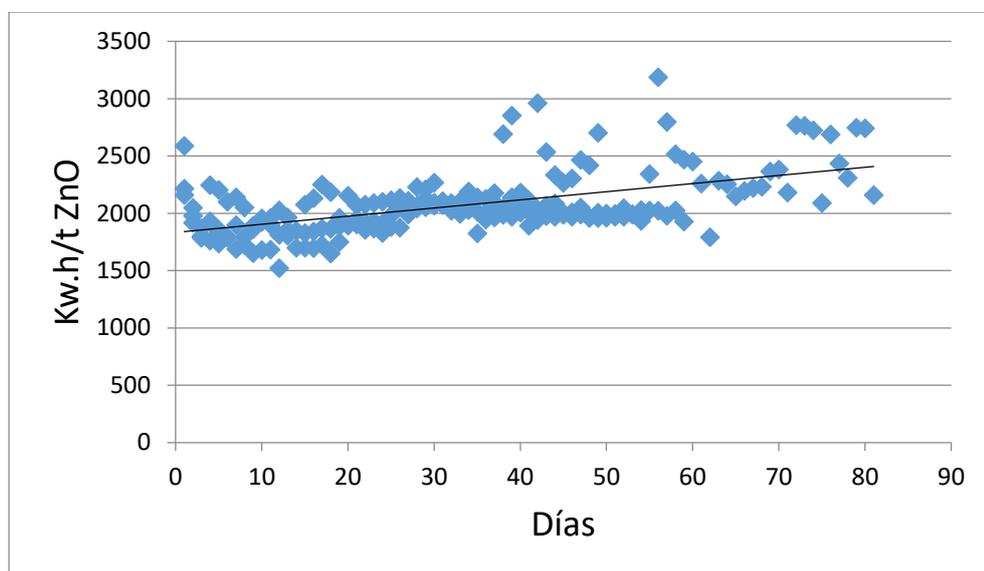


**Figura 4.24** Rendimiento térmico promedio para la producción de óxido de zinc por Lote

Fuente: Elaboración propia

Para ejecutar el análisis de correlación entre el tiempo de vida de los crisoles de grafito y el rendimiento térmico se consideró la utilización de los datos precisados en los Anexos N° 1, 2, 3, 13, 14 y 15. Previo al análisis de correlación se depuraron los datos correspondientes a la fecha del 04 de abril del 2019, en el Anexo N° 1 del tiempo de vida de los crisoles (dato = 50 días) y en el Anexo N° 13 del rendimiento térmico (dato = 8198 Kwh/t ZnO) por una distorsión identificada en el análisis estadístico, la causa asignable de esta distorsión se atribuyó a una falla operativa en el horno de fundición que liberó energía calorífica no productiva por la chimenea, siendo esta una condición no normal en las operaciones de producción de óxido de zinc.

El análisis de correlación entre el Tiempo de vida de los crisoles de grafito y el Rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc se calculó mediante la utilización del comando Análisis de Datos y Coeficiente de Correlación de Microsoft Excel. El resultado de este análisis determinó que el coeficiente de correlación ( $r =$  coeficiente de Pearson) es de  $r = 0.55$ , lo que indica que existe una correlación directa entre el tiempo de vida de los crisoles y el rendimiento térmico, esta correlación se muestra en la Figura 4.5.



**Figura 4.25** Correlación entre el Rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc y el Tiempo de vida de los crisoles de grafito  
Fuente: Elaboración propia

El resultado del análisis de correlación realizado entre el Rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc y el Tiempo de vida de los crisoles de grafito a través del Coeficiente de Correlación obtuvo un valor de  $r = 0.55$ , lo que significa que existe una correlación de tipo directa entre los datos de la variable independiente y los datos de la variable dependiente, este resultado confirma una influencia directa del tiempo de vida de los crisoles de grafito en el rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc, a mayor tiempo de vida de los crisoles de grafito mayor es el indicador de rendimiento térmico para

la producción de óxido de zinc, en consecuencia se consume mayor energía calorífica para producir una tonelada de óxido de zinc, esto denota un menor rendimiento térmico.

#### **4.3 Tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito**

El tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito (días) es aquel tiempo en el que es idóneo realizar el cambio de los crisoles por otros nuevos, si los cambios se realizan en tiempos mayores al tiempo de vida óptimo se incrementa el indicador de rendimiento térmico ( $Kw-h/t ZnO$ ) y viceversa, si los cambios se realizan en tiempos menores al tiempo de vida óptimo se reduce el indicador de rendimiento térmico pero se incrementa la frecuencia de rotación de los crisoles con los sobre costos logísticos que estos cambios involucra.

Para determinar el tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito se consideró que existe una correlación directa entre el tiempo de vida de los crisoles y el rendimiento térmico según los análisis desarrollados en la sección 4.2, con esta base y utilizando Microsoft Excel se realizaron análisis de regresión a los datos de los rendimientos térmicos y tiempos de vida de los crisoles de cada lote, se analizaron las regresiones de diferentes funciones matemáticas, tales como función lineal, funciones polinómicas, función logarítmica, función exponencial y función potencia, con la finalidad de identificar la función con mejor coeficiente de determinación ( $r^2$ ) que permitió explicar el comportamiento de la variable dependiente (rendimiento térmico) en función de la variable independiente (tiempo de vida de los crisoles).

Este mismo análisis se realizó para todos los datos del rendimiento térmico y tiempo de vida de los crisoles sin considerar las separaciones por Lotes, con el resultado general del Análisis de Regresión se seleccionó la función matemática que mejor representó el comportamiento de las variables dependiente e independiente a través del mayor Coeficiente de Determinación ( $r^2$ ).

La función matemática seleccionada, a través de su expresión algebraica, se sometió al análisis de cálculo diferencial con la finalidad de identificar los puntos de inflexión donde las curvas formaron concavidades positivas, finalmente se seleccionó el punto de inflexión que representa al tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito.

El Análisis de Regresión realizado para los datos del Tiempo de vida de los crisoles incluidos en el Anexo N° 1 y el Rendimiento térmico detallados en el Anexo N° 13, correspondientes al Lote N° 1 se presentan en la Tabla N° 4.3.

**Tabla 4.3***Resultados del Análisis de Regresión para el Lote N° 1*

Análisis de Regresión		
Modelo	Función	Coefficiente de Determinación (r <sup>2</sup> )
Lineal	$y = 10.681x + 1889$	0.3709
Exponencial	$y = 1903.5e^{0.0047x}$	0.3845
Logarítmica	$y = 121.88\ln(x) + 1796.5$	0.1864
Polinómica 2°	$y = 0.412x^2 - 9.9192x + 2064.1$	0.4591
Polinómica 3°	$y = -0.006x^3 + 0.8628x^2 - 19.026x + 2104$	0.462
Polinómica 4°	$y = 0.0001x^4 - 0.0193x^3 + 1.2943x^2 - 23.936x + 2117.4$	0.4622
Polinómica 5°	$y = -8E-05x^5 + 0.0098x^4 - 0.4534x^3 + 9.5621x^2 - 85.452x + 2234.4$	0.4732
Polinómica 6°	$y = 5E-06x^6 - 0.0008x^5 + 0.0486x^4 - 1.4991x^3 + 22.986x^2 - 156.84x + 2336.7$	0.4787
Potencial	$y = 1826.2x^{0.0542}$	0.1941

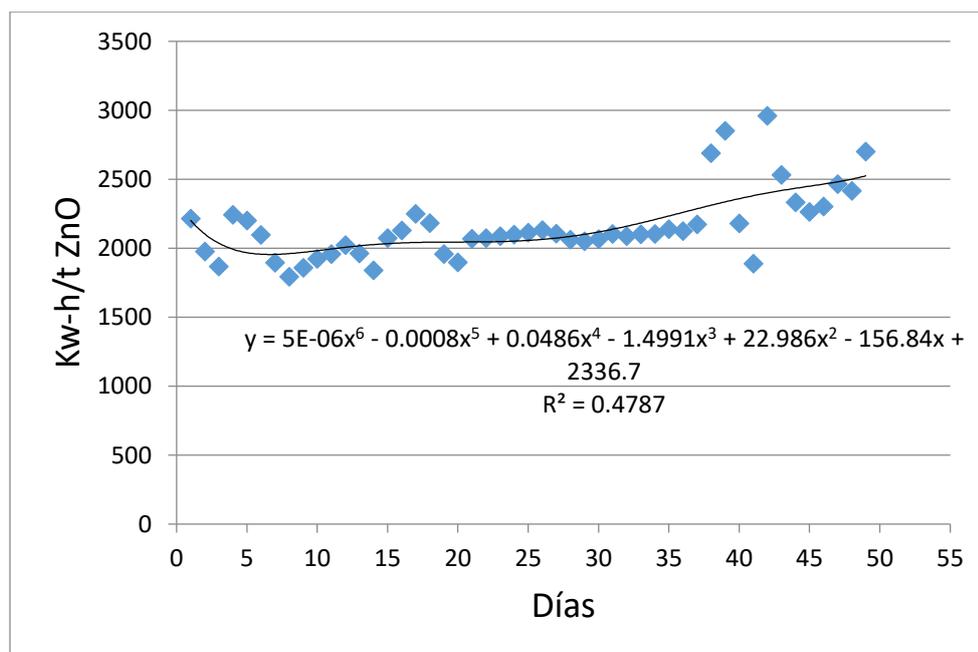
Fuente: Elaboración propia

El modelo y la función seleccionada para los análisis de regresión presentados en la Tabla 4.3, son la polinómica de sexto grado y la función

$$y = 5E-06x^6 - 0.0008x^5 + 0.0486x^4 - 1.4991x^3 + 22.986x^2 - 156.84x + 2336.7,$$

considerando que esta función es la que obtuvo el mayor Coeficiente de Determinación ( $r^2 = 0.4787$ ).

La Figura 4.6 muestra la regresión de la función matemática seleccionada para el Lote N° 1.



**Figura 4.26** Modelo de regresión para el rendimiento térmico y el tiempo de vida de los crisoles del Lote N° 1

Fuente: Elaboración propia

El Análisis de Regresión ejecutado para los datos del Tiempo de vida de los crisoles precisados en el Anexo N° 2 y el Rendimiento térmico pormenorizados en el Anexo N° 14, correspondientes al Lote N° 2 se exponen en la Tabla N° 4.4.

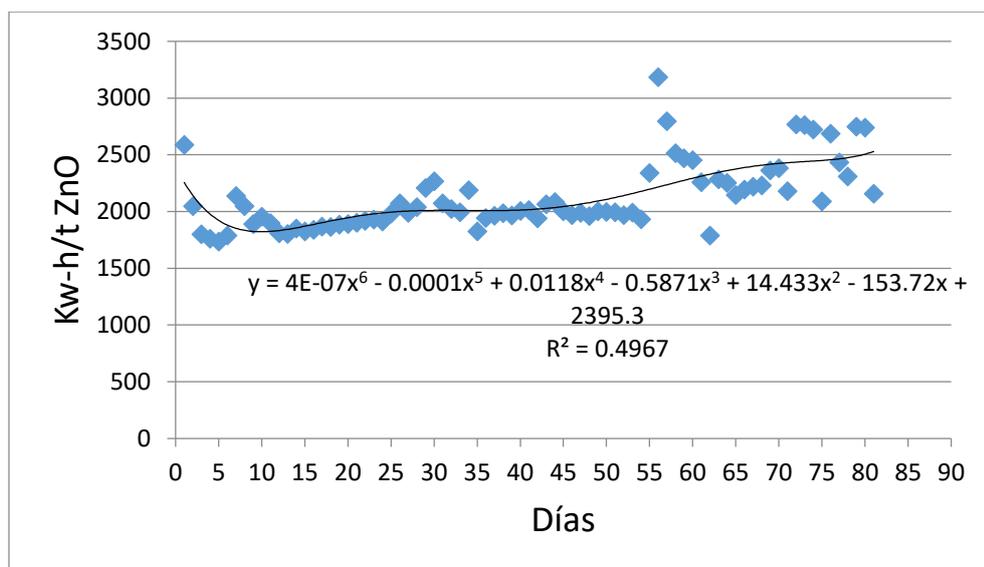
**Tabla 4.4***Resultados del Análisis de Regresión para el Lote N° 2*

Análisis de Regresión		
Modelo	Función	Coficiente de Determinación (r <sup>2</sup> )
Lineal	$y = 7.9626x + 1794.9$	0.3994
Exponencial	$y = 1812e^{0.0036x}$	0.4277
Logarítmica	$y = 141.81\ln(x) + 1634.6$	0.1927
Polinómica 2°	$y = 0.1391x^2 - 3.4403x + 1952.7$	0.4526
Polinómica 3°	$y = -0.0027x^3 + 0.4718x^2 - 14.423x + 2030$	0.4611
Polinómica 4°	$y = 5E-05x^4 - 0.0105x^3 + 0.8858x^2 - 22.074x + 2063.1$	0.4622
Polinómica 5°	$y = -1E-05x^5 + 0.0021x^4 - 0.1611x^3 + 5.5596x^2 - 78.195x + 2229.7$	0.4823
Polinómica 6°	$y = 4E-07x^6 - 0.0001x^5 + 0.0118x^4 - 0.5871x^3 + 14.433x^2 - 153.72x + 2395.3$	0.4967
Potencial	$y = 1678.2x^{0.0657}$	0.2132

Fuente: Elaboración propia

El modelo y la función seleccionada para los análisis de regresión presentados en la Tabla 4.4, también son la polinómica de sexto grado y la función  $y = 4E-07x^6 - 0.0001x^5 + 0.0118x^4 - 0.5871x^3 + 14.433x^2 - 153.72x + 2395.3$ , considerando que esta función es la que obtuvo el mayor Coeficiente de Determinación ( $r^2 = 0.4967$ ).

La Figura 4.7 presenta la regresión de la función matemática seleccionada para el Lote N° 2.



**Figura 4.27** Modelo de regresión para el rendimiento térmico y el tiempo de vida de los crisoles del Lote N° 2

Fuente: Elaboración propia

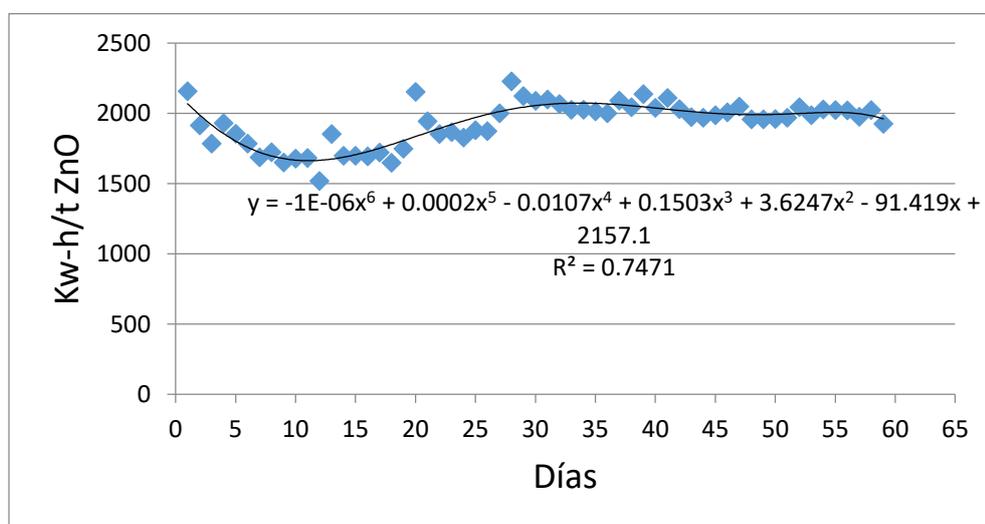
Los resultados del Análisis de Regresión efectuado para los datos del Tiempo de vida de los crisoles detallados en el Anexo N° 3 y el Rendimiento térmico precisados en el Anexo N° 15, correspondientes al Lote N° 3 se muestran en la Tabla N° 4.5.

**Tabla 4.56***Resultados del Análisis de Regresión para el Lote N° 3*

Análisis de Regresión		
Modelo	Función	Coefficiente de Determinación (r <sup>2</sup> )
Lineal	$y = 5.1004x + 1776.3$	0.3119
Exponencial	$y = 1769.7e^{0.0028x}$	0.3220
Logarítmica	$y = 74.915\ln(x) + 1695$	0.1847
Polinómica 2°	$y = -0.1006x^2 + 11.135x + 1714.9$	0.3401
Polinómica 3°	$y = -0.0167x^3 + 1.4059x^2 - 25.325x + 1904.8$	0.5139
Polinómica 4°	$y = 0.0012x^4 - 0.1655x^3 + 7.1754x^2 - 103.78x + 2158$	0.7235
Polinómica 5°	$y = -2E-05x^5 + 0.0045x^4 - 0.3384x^3 + 11.118x^2 - 138.74x + 2236.1$	0.7373
Polinómica 6°	$y = -1E-06x^6 + 0.0002x^5 - 0.0107x^4 + 0.1503x^3 + 3.6247x^2 - 91.419x + 2157.1$	0.7471
Potencial	$y = 1693.9x^{0.0405}$	0.1898

Fuente: Elaboración propia

El modelo y la función seleccionada para los análisis de regresión presentados en la Tabla 4.5, también son la polinómica de sexto grado y la función  $y = -1E-06x^6 + 0.0002x^5 - 0.0107x^4 + 0.1503x^3 + 3.6247x^2 - 91.419x + 2157.1$ , considerando que esta función es la que obtuvo el mayor Coeficiente de Determinación ( $r^2 = 0.7471$ ). La Figura 4.8 muestra la regresión de la función matemática seleccionada para el Lote N° 3.



**Figura 4.28** Modelo de regresión para el rendimiento térmico y el tiempo de vida de los crisoles del Lote N° 3

Fuente: Elaboración propia

Los análisis de regresión realizados a los datos del Rendimiento térmico y el Tiempo de vida de los crisoles para los Lotes N° 1, 2 y 3 mostraron una predominancia del modelo de la función polinómica de sexto grado. Para confirmar esta predominancia se sometieron todos los datos del Rendimiento térmico y del Tiempo de vida de los crisoles de grafito a un Análisis de Regresión Total considerando la dispersión de todos los datos detallados en los Anexos N° 1, 2, 3, 13, 14 y 15. La Tabla 4.6 presenta los resultados de la Regresión Total descrita previamente.

**Tabla 4.6***Resultados del Análisis de Regresión Total para el Rendimiento térmico en función del Tiempo de vida de los crisoles de grafito*

Análisis de Regresión		
Modelo	Función	Coefficiente de Determinación (r <sup>2</sup> )
Lineal	$y = 7.1115x + 1832.8$	0.3062
Exponencial	$y = 1839.8e^{0.0033x}$	0.3205
Logarítmica	$y = 113.82\ln(x) + 1704.7$	0.1567
Polinómica 2°	$y = 0.0735x^2 + 1.6615x + 1901.7$	0.3221
Polinómica 3°	$y = -0.001x^3 + 0.188x^2 - 1.9007x + 1925.3$	0.3233
Polinómica 4°	$y = 0.0003x^4 - 0.0404x^3 + 2.1706x^2 - 36.65x + 2068.1$	0.3546
Polinómica 5°	$y = -1E-05x^5 + 0.0027x^4 - 0.2101x^3 + 7.2338x^2 - 95.011x + 2234.8$	0.3856
Polinómica 6°	$y = -2E-08x^6 - 8E-06x^5 + 0.0023x^4 - 0.195x^3 + 6.9282x^2 - 92.495x + 2229.4$	0.3856
Potencial	$y = 1729.3x^{0.0537}$	0.1687

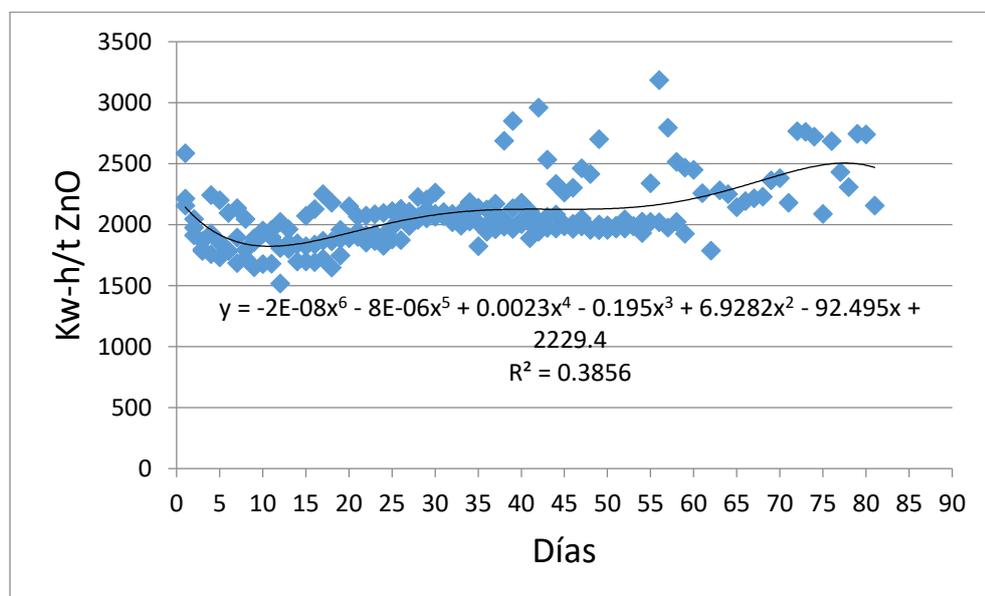
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) presentan un empate entre los modelos de función polinómica de quinto y sexto grado considerando para ambos un valor de  $r^2 = 0.3856$ , sin embargo, al analizar los resultados individuales por cada Lote se observó que la función polinómica de sexto grado tuvo predominancia entre los tres Lotes.

Por tanto, se decidió seleccionar el modelo de la función polinómica de sexto grado, cuya función es:

$$y = -2E-08x^6 - 8E-06x^5 + 0.0023x^4 - 0.195x^3 + 6.9282x^2 - 92.495x + 2229.4$$

considerando que esta función obtuvo el Coeficiente de Determinación ( $r^2 = 0.3856$ ). La Figura 4.9 muestra la regresión de la función matemática seleccionada que representa el modelo del Rendimiento térmico (Kw-h/t ZnO) en función del tiempo de vida de los crisoles de grafito (días).



**Figura 4.29** Modelo de regresión para el rendimiento térmico en función del tiempo de vida de los crisoles

Fuente: Elaboración propia

La función  $y = -2E-08x^6 - 8E-06x^5 + 0.0023x^4 - 0.195x^3 + 6.9282x^2 - 92.495x + 2229.4$  representa el comportamiento de los valores del Rendimiento térmico en función del Tiempo de vida de los crisoles de grafito.

Para determinar el tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito se sometió la función y a los análisis de cálculo diferencial con la finalidad de identificar los puntos de inflexión donde la función y contiene curvas cóncavas positivas que indican el momento en el que el indicador del rendimiento térmico se incrementa de forma ascendente en la función, con esta finalidad se realizó el cálculo de la segunda derivada de la función y, tal como se señala en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7**  
*Cálculo de la segunda derivada de la función y (y'')*

Determinación de la función y''	
Polinómica 6°	$y = -2E-08x^6 - 8E-06x^5 + 0.0023x^4 - 0.195x^3 + 6.9282x^2 - 92.495x + 2229.4$
1° Derivada	$y' = -12E-08x^5 - 40E-06x^4 + 0.0092x^3 - 0.585x^2 + 13.8564x - 92.495$
2° Derivada	$y'' = -0.0000006x^4 - 0.00016x^3 + 0.0276x^2 - 1.17x + 13.8564$
Fuente: Elaboración propia	

Para identificar los puntos de inflexión de la función y, se debe resolver primero la ecuación:

$$y'' = 0; \quad y'' = 0 = -0.0000006x^4 - 0.00016x^3 + 0.0276x^2 - 1.17x + 13.8564$$

Esta ecuación se resolvió utilizando la tabulación de datos, la elaboración de gráficos y el cálculo a través del comando Solver, todas herramientas de Microsoft Excel.

La tabulación de datos se realizó con dos finalidades: primero, identificar los valores de  $y''$  donde se generaron cambios de signos (- a + ó + a -) y segundo, identificar los rangos aproximados de  $x$  donde se generaron esos cambios de signo en  $y''$ , esto último para restringir el cálculo de las raíces de la función  $y''$  con la aplicación del Solver.

La tabulación de datos inició con  $x = 0$ , entonces  $y'' = 13.8564$ , seguidamente se asignaron valores positivos y negativos a las  $x$  obteniendo sus valores respectivos en  $y''$  tal como se muestra en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8**  
*Tabulación de datos  $x$  para  $y''$*

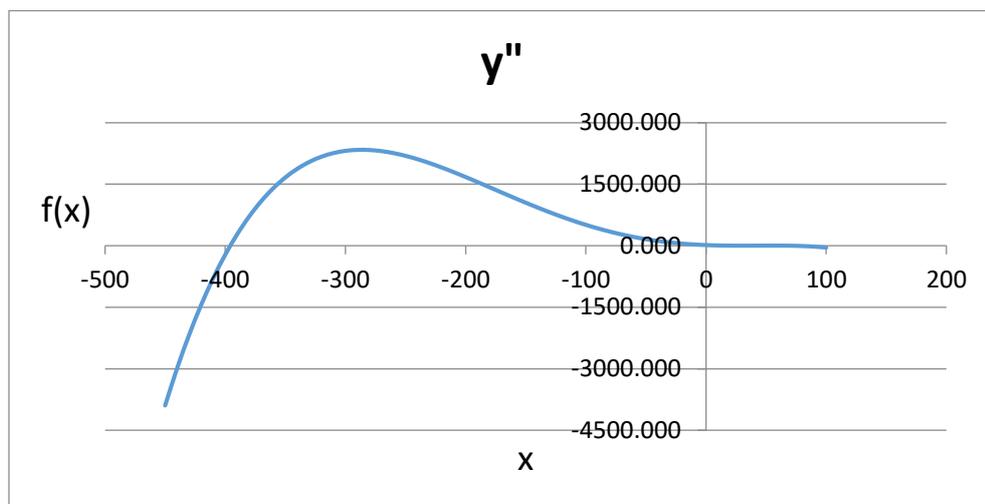
$x$	$y''$	Cambio de signo	Tipo de cóncava
-450	-3894.394		
-440	-2987.120		
-430	-2171.490		
-420	-1442.200		
-410	-794.090		
<b>-400</b>	<b>-222.144</b>	<b>1° raíz: cambio de (-) a (+)</b>	<b>Cóncava para arriba (positiva)</b>
<b>-390</b>	<b>278.510</b>		
-380	712.600		
-370	1084.710		
-360	1399.280		
-350	1660.606		
-340	1872.840		
-330	2039.990		
-320	2165.920		
-310	2254.350		
-300	2308.856		
-290	2332.870		
-280	2329.680		
-270	2302.430		
-260	2254.120		
-250	2187.606		
-240	2105.600		

-230	2010.670		
-220	1905.240		
-210	1791.590		
-200	1671.856		
-190	1548.030		
-180	1421.960		
-170	1295.350		
-160	1169.760		
-150	1046.606		
-140	927.160		
-130	812.550		
-120	703.760		
-110	601.630		
-100	506.856		
-90	419.990		
-80	341.440		
-70	271.470		
-60	210.200		
-50	157.606		
-40	113.520		
-30	77.630		
-20	49.480		
-10	28.470		
0	13.856		
10	4.750		
<b>20</b>	<b>0.120</b>	<b>2° raíz: cambio de (+) a (-)</b>	<b>Cóncava para abajo (negativa)</b>
<b>30</b>	<b>-1.210</b>		
<b>40</b>	<b>-0.560</b>	<b>3° raíz: cambio de (-) a (+)</b>	<b>Cóncava para arriba (positiva)</b>
<b>50</b>	<b>0.606</b>		
<b>60</b>	<b>0.680</b>	<b>4° raíz: cambio de (+) a (-)</b>	<b>Cóncava para abajo (negativa)</b>
<b>70</b>	<b>-2.090</b>		
80	-9.600		
90	-23.890		
100	-47.144		

---

Fuente: Elaboración propia

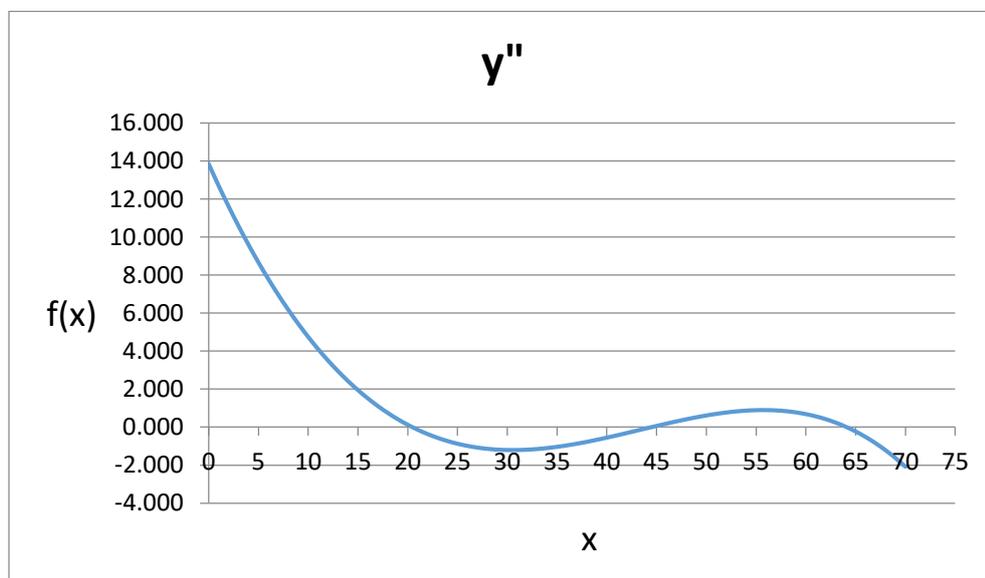
La Figura 4.10 muestra la gráfica de la función  $y''$  considerando los datos de la Tabla 4.8.



**Figura 4.10** Gráfica de la función  $y''$  con visibilidad de la primera raíz negativa para  $x$

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.11 se presenta otra vista de la función  $y''$  incluyendo las otras tres raíces que resuelven la ecuación  $y'' = 0$ .



**Figura 4.30** Gráfica de la función  $y''$  con visibilidad de las raíces positivas para  $x$

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabulación de datos y de la elaboración de gráficos sirvieron para aproximarse a las cuatro raíces que resuelven la ecuación  $y'' = 0$ , para precisar la solución de la ecuación se complementó con la utilización del comando Solver de Microsoft Excel, para que este comando calcule cada raíz se insertaron los rangos aproximados de  $x$  en los que  $y''$  cambió de signo, con estas restricciones se obtuvieron las cuatro raíces de  $x$  que resolvieron la ecuación  $y'' = 0$ , tal como se indica en la Tabla 4.9.

**Tabla 4.9**

*Raíces de la ecuación  $y'' = 0$*

$x$	$f(x) / f(\text{objetivo})$
$X_1$	-395.732
$X_2$	20.446
$X_3$	44.548
$X_4$	64.071

Fuente: Elaboración propia

Las raíces calculadas de la función  $y''$  según se indican en la Tabla 4.9 se reemplazaron en la función  $y$  inicial para determinar las coordenadas de los puntos de inflexión. En la Tabla 4.10 se presenta las coordenadas  $(x, y)$  para los cuatro puntos de inflexión de la función  $y$ .

**Tabla 4.10**

*Coordenadas de los puntos de inflexión de la función  $y$*

Raíces (x)		Función y
$x$	$y = -2E-08x^6 - 8E-06x^5 + 0.0023x^4 - 0.195x^3 + 6.9282x^2 - 92.495x + 2229.4$	
$X_1$	-395.732	70443739.408
$X_2$	20.446	1939.694
$X_3$	44.548	2117.130
$X_4$	64.071	2193.527

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el punto de inflexión que representa el punto donde la función se hace creciente (cóncava positiva) y cuyo valor en  $x$  representa al Tiempo de vida óptimo para los crisoles de grafito se analizó cada coordenada.

La primera coordenada  $x_1 = -395.732$ ;  $y = 70443739.408$  indica un punto de inflexión de cambio de signo de negativo a positivo (cóncava hacia arriba) según se analizó en la Tabla 4.8 sin embargo al ser negativo el valor de  $x_1$  se descarta porque el Tiempo de vida de los crisoles es positivo.

La segunda coordenada  $x_2 = 20.446$ ;  $y = 1939.694$  indica un punto de inflexión de cambio de signo de positivo a negativo (cóncava hacia abajo) según se analizó en la Tabla 4.8 por tanto se descarta porque la curva de la función es decreciente.

La tercera coordenada  $x_3 = 44.548$ ;  $y = 2117.130$  indica un punto de inflexión de cambio de signo de negativo a positivo (cóncava hacia arriba) según se analizó en la Tabla 4.8 por tanto se acepta porque la curva de la función es creciente.

La cuarta coordenada  $x_4 = 64.071$ ;  $y = 2193.527$  indica un punto de inflexión de cambio de signo de positivo a negativo (cóncava hacia abajo) según se analizó en la Tabla 4.8 por tanto se descarta porque la curva de la función es decreciente.

En consecuencia, el Tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito se representa por la tercera coordenada de los puntos de inflexión, entonces el Tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito es de 45 días ( $x_3 = 44.548$ ).

## CONCLUSIONES

- La investigación demostró que existe una influencia directa del tiempo de vida de los crisoles en el rendimiento térmico, ésta se manifiesta de la siguiente manera: al colocar crisoles nuevos el consumo de energía calorífica para producir una tonelada de óxido de zinc es menor, por tanto, el rendimiento térmico es mayor porque se necesita menos energía para producir, esta situación se va invirtiendo conforme los crisoles van acumulando más días operativos llegando a los extremos en los que estando envejecidos consumen más energía calorífica para producir una tonelada de óxido de zinc, en este momento el rendimiento térmico es menor porque se necesita más energía para producir. Cabe resaltar que la investigación estableció un indicador de medición del rendimiento térmico definido como el cociente del consumo de la energía calorífica entre el peso de producción de óxido de zinc.
- La investigación concluyó que el tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito está en los 45 días, con el conocimiento de este tiempo de vida óptimo se eliminará la incertidumbre de las frecuencias tempranas o tardías de los cambios de los crisoles, este tiempo servirá para planificar eficientemente la logística de abastecimiento, el manejo de los inventarios y la reducción de los sobre costos por sobre consumos de energía calorífica y también de crisoles.

- También se concluyó que la hipótesis establecida para el estudio desarrollado resultó positiva o aceptada, considerando que se analizó la influencia del tiempo de vida de los crisoles de grafito en el rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc y se determinó también el tiempo de vida óptimo de los crisoles de grafito, con estos logros se espera una mejora en el rendimiento térmico, ya que al aplicar los cambios de los crisoles de grafito en los 45 días de vida útil se evitarán los sobre consumos de gas natural, de energía calorífica y de unidades de crisoles.

## RECOMENDACIONES

- Considerando que la presente investigación solo se enfocó en el estudio de la influencia del tiempo de vida de los crisoles en el rendimiento térmico, se recomienda estudiar la influencia de las otras variables en el rendimiento térmico, tales como las dimensiones físicas de los crisoles, la composición química de los crisoles, las dimensiones de la cámara del horno de crisoles en la fundición.
- El trabajo de investigación se desarrolló con los datos correspondientes a tres Lotes de producción de óxido de zinc dentro de un solo año, se recomienda realizar nuevas investigaciones con mayor cantidad de datos correspondientes a más Lotes de producción por tanto de mayor cantidad de años de producción para complementar el presente estudio.
- El estudio se realizó en el horno de crisoles de una sola línea de producción de óxido de zinc, se recomienda realizar la misma investigación en otras líneas de producción de óxido de zinc con el método francés para complementar la investigación con los análisis comparativos correspondientes.

- La investigación se centró en el análisis del tiempo de vida de los crisoles de grafito en el rendimiento térmico para la producción de óxido de zinc con el método indirecto o francés, se recomienda desarrollar otra investigación para analizar el rendimiento térmico en la producción de óxido de zinc con el método directo o americano con la finalidad de formular la hipótesis de que el rendimiento térmico con el método francés es más eficiente que el rendimiento térmico con el método americano.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aranda, A. (2016). *“Síntesis de películas de nanorods de óxido de zinc sobre nanopartículas de plata”*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Cabrera, D., Morales, J. (2019). *“Diseño y construcción de un horno crisol estacionario para reciclaje de chatarra de cobre – Cajamarca 2019”*. Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú.
- Cardoza, O. (2019). *“Incremento de la recuperación de zinc en el proceso de lixiviación empleando la metodología Seis Sigma en la empresa Nexa Resources Cajamarquilla”*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Castillo, C. (2016). *“Síntesis y caracterización de películas delgadas de nanorods de ZnO: N-Ag para su aplicación en purificación fotocatalítica del agua”*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Flores, E., Orellana, R. (2014). *“Diseño y Construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas”*. Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Ochoa, D. (2015). *“Desarrollo de un material compósito de óxido de zinc impregnado en un soporte granular que presente actividad fotocatalítica”*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Peña, I. (2017). *“Construcción de un crisol de grafito para la fusión de ferroaleaciones a escala de Laboratorio”*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Cuba.
- Ramos, P. (2016). *“Nanoestructuras de ZnO-TiO<sub>2</sub> preparadas por Electrospinning: Influencia de los precursores en la morfología, estructura y actividad fotocatalítica”*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Rivera, M. (2011). *“Uso del ZnO en la degradación del triclosan mediante irradiación de luz UV”*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., San Luis Potosí, México.
- Suntaxi, E., Torres, C. (2014). *“Diseño y construcción de un horno crisol para fundición de aluminio con una capacidad de 15 kg/h a una temperatura de 800°C utilizando GLP”*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito. Ecuador.
- Ureta, P. (2013). *“Reducción de concentración SO<sub>2</sub> por absorción en solución acuosa de carbonato de sodio de los gases residuales de la planta de ácido sulfúrico del circuito de zinc de la Empresa Doe Run Perú - La Oroya”*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- Verdeja, L., García, P., Huerta, A. (2017). *“El óxido de zinc: propiedades y aplicaciones”*. Universidad de Oviedo. España.

## **ANEXOS**

## Anexo N° 1

---

Línea "A"

---

Lote N° 1

---

Fecha	Tiempo de vida (días)	Fecha	Tiempo de vida (días)
14/02/2019	1	26/03/2019	41
15/02/2019	2	27/03/2019	42
16/02/2019	3	28/03/2019	43
17/02/2019	4	29/03/2019	44
18/02/2019	5	30/03/2019	45
19/02/2019	6	31/03/2019	46
20/02/2019	7	01/04/2019	47
21/02/2019	8	02/04/2019	48
22/02/2019	9	03/04/2019	49
23/02/2019	10	04/04/2019	50
24/02/2019	11		
25/02/2019	12		
26/02/2019	13		
27/02/2019	14		
28/02/2019	15		
01/03/2019	16		
02/03/2019	17		
03/03/2019	18		
04/03/2019	19		
05/03/2019	20		
06/03/2019	21		
07/03/2019	22		
08/03/2019	23		
09/03/2019	24		
10/03/2019	25		
11/03/2019	26		
12/03/2019	27		
13/03/2019	28		
14/03/2019	29		
15/03/2019	30		
16/03/2019	31		

17/03/2019	32
18/03/2019	33
19/03/2019	34
20/03/2019	35
21/03/2019	36
22/03/2019	37
23/03/2019	38
24/03/2019	39
25/03/2019	40

---

## Anexo N° 2

Línea "A"

Lote N° 2

Fecha	Tiempo de vida (días)	Fecha	Tiempo de vida (días)	Fecha	Tiempo de vida (días)
21/04/2019	1	31/05/2019	41	10/07/2019	81
22/04/2019	2	01/06/2019	42		
23/04/2019	3	02/06/2019	43		
24/04/2019	4	03/06/2019	44		
25/04/2019	5	04/06/2019	45		
26/04/2019	6	05/06/2019	46		
27/04/2019	7	06/06/2019	47		
28/04/2019	8	07/06/2019	48		
29/04/2019	9	08/06/2019	49		
30/04/2019	10	09/06/2019	50		
01/05/2019	11	10/06/2019	51		
02/05/2019	12	11/06/2019	52		
03/05/2019	13	12/06/2019	53		
04/05/2019	14	13/06/2019	54		
05/05/2019	15	14/06/2019	55		
06/05/2019	16	15/06/2019	56		
07/05/2019	17	16/06/2019	57		
08/05/2019	18	17/06/2019	58		
09/05/2019	19	18/06/2019	59		
10/05/2019	20	19/06/2019	60		
11/05/2019	21	20/06/2019	61		
12/05/2019	22	21/06/2019	62		
13/05/2019	23	22/06/2019	63		
14/05/2019	24	23/06/2019	64		
15/05/2019	25	24/06/2019	65		
16/05/2019	26	25/06/2019	66		
17/05/2019	27	26/06/2019	67		
18/05/2019	28	27/06/2019	68		
19/05/2019	29	28/06/2019	69		
20/05/2019	30	29/06/2019	70		
21/05/2019	31	30/06/2019	71		
22/05/2019	32	01/07/2019	72		

23/05/2019	33	02/07/2019	73
24/05/2019	34	03/07/2019	74
25/05/2019	35	04/07/2019	75
26/05/2019	36	05/07/2019	76
27/05/2019	37	06/07/2019	77
28/05/2019	38	07/07/2019	78
29/05/2019	39	08/07/2019	79
30/05/2019	40	09/07/2019	80

---

### Anexo N° 3

---

Línea "A"

---

Lote N° 3

Fecha	Tiempo de vida (días)	Fecha	Tiempo de vida (días)
09/09/2019	1	19/10/2019	41
10/09/2019	2	20/10/2019	42
11/09/2019	3	21/10/2019	43
12/09/2019	4	22/10/2019	44
13/09/2019	5	23/10/2019	45
14/09/2019	6	24/10/2019	46
15/09/2019	7	25/10/2019	47
16/09/2019	8	26/10/2019	48
17/09/2019	9	27/10/2019	49
18/09/2019	10	28/10/2019	50
19/09/2019	11	29/10/2019	51
20/09/2019	12	30/10/2019	52
21/09/2019	13	31/10/2019	53
22/09/2019	14	01/11/2019	54
23/09/2019	15	02/11/2019	55
24/09/2019	16	03/11/2019	56
25/09/2019	17	04/11/2019	57
26/09/2019	18	05/11/2019	58
27/09/2019	19	06/11/2019	59
28/09/2019	20		
29/09/2019	21		
30/09/2019	22		
01/10/2019	23		
02/10/2019	24		
03/10/2019	25		
04/10/2019	26		
05/10/2019	27		
06/10/2019	28		
07/10/2019	29		
08/10/2019	30		
09/10/2019	31		

10/10/2019	32
11/10/2019	33
12/10/2019	34
13/10/2019	35
14/10/2019	36
15/10/2019	37
16/10/2019	38
17/10/2019	39
18/10/2019	40

---

## Anexo N° 4

---

Línea "A"

---

Lote N° 1

---

Fecha	Consumo de Gas Natural (sm <sup>3</sup> )	Fecha	Consumo de Gas Natural (sm <sup>3</sup> )
14/02/2019	856	26/03/2019	933
15/02/2019	971	27/03/2019	495
16/02/2019	909	28/03/2019	900
17/02/2019	914	29/03/2019	942
18/02/2019	914	30/03/2019	946
19/02/2019	918	31/03/2019	946
20/02/2019	924	01/04/2019	938
21/02/2019	920	02/04/2019	943
22/02/2019	941	03/04/2019	938
23/02/2019	959	04/04/2019	314
24/02/2019	947		
25/02/2019	949		
26/02/2019	937		
27/02/2019	928		
28/02/2019	928		
01/03/2019	913		
02/03/2019	936		
03/03/2019	928		
04/03/2019	930		
05/03/2019	911		
06/03/2019	924		
07/03/2019	923		
08/03/2019	920		
09/03/2019	920		
10/03/2019	921		
11/03/2019	924		
12/03/2019	925		

13/03/2019	928
14/03/2019	929
15/03/2019	928
16/03/2019	925
17/03/2019	928
18/03/2019	926
19/03/2019	925
20/03/2019	920
21/03/2019	926
22/03/2019	931
23/03/2019	588
24/03/2019	595
25/03/2019	923

---

## Anexo N° 5

Línea "A"

Lote N° 2

Fecha	Consumo de Gas Natural (sm <sup>3</sup> )	Fecha	Consumo de Gas Natural (sm <sup>3</sup> )	Fecha	Consumo de Gas Natural (sm <sup>3</sup> )
21/04/2019	896	31/05/2019	928	10/07/2019	104
22/04/2019	943	01/06/2019	920		
23/04/2019	939	02/06/2019	921		
24/04/2019	939	03/06/2019	915		
25/04/2019	941	04/06/2019	919		
26/04/2019	934	05/06/2019	917		
27/04/2019	940	06/06/2019	919		
28/04/2019	936	07/06/2019	921		
29/04/2019	935	08/06/2019	917		
30/04/2019	1155	09/06/2019	915		
01/05/2019	895	10/06/2019	917		
02/05/2019	934	11/06/2019	917		
03/05/2019	935	12/06/2019	912		
04/05/2019	931	13/06/2019	913		
05/05/2019	930	14/06/2019	758		
06/05/2019	934	15/06/2019	555		
07/05/2019	933	16/06/2019	900		
08/05/2019	934	17/06/2019	909		
09/05/2019	934	18/06/2019	903		
10/05/2019	933	19/06/2019	918		
11/05/2019	934	20/06/2019	921		
12/05/2019	935	21/06/2019	596		
13/05/2019	931	22/06/2019	862		
14/05/2019	935	23/06/2019	902		
15/05/2019	930	24/06/2019	892		
16/05/2019	932	25/06/2019	864		
17/05/2019	931	26/06/2019	847		
18/05/2019	935	27/06/2019	852		
19/05/2019	934	28/06/2019	852		
20/05/2019	919	29/06/2019	858		
21/05/2019	930	30/06/2019	644		
22/05/2019	927	01/07/2019	855		

23/05/2019	923	02/07/2019	858
24/05/2019	998	03/07/2019	845
25/05/2019	852	04/07/2019	631
26/05/2019	921	05/07/2019	847
27/05/2019	923	06/07/2019	728
28/05/2019	925	07/07/2019	782
29/05/2019	923	08/07/2019	846
30/05/2019	920	09/07/2019	854

---

## Anexo N° 6

---

Línea "A"

---

Lote N° 3

Fecha	Consumo de Gas Natural (sm <sup>3</sup> )	Fecha	Consumo de Gas Natural (sm <sup>3</sup> )
09/09/2019	715	19/10/2019	923
10/09/2019	897	20/10/2019	923
11/09/2019	868	21/10/2019	919
12/09/2019	904	22/10/2019	919
13/09/2019	903	23/10/2019	925
14/09/2019	901	24/10/2019	924
15/09/2019	904	25/10/2019	919
16/09/2019	894	26/10/2019	920
17/09/2019	899	27/10/2019	928
18/09/2019	903	28/10/2019	923
19/09/2019	904	29/10/2019	922
20/09/2019	798	30/10/2019	919
21/09/2019	996	31/10/2019	919
22/09/2019	893	01/11/2019	922
23/09/2019	897	02/11/2019	921
24/09/2019	895	03/11/2019	927
25/09/2019	894	04/11/2019	915
26/09/2019	898	05/11/2019	918
27/09/2019	901	06/11/2019	306
28/09/2019	686		
29/09/2019	898		
30/09/2019	897		
01/10/2019	898		
02/10/2019	903		
03/10/2019	899		
04/10/2019	905		
05/10/2019	904		
06/10/2019	702		
07/10/2019	908		
08/10/2019	923		

09/10/2019	917
10/10/2019	910
11/10/2019	915
12/10/2019	919
13/10/2019	919
14/10/2019	920
15/10/2019	926
16/10/2019	921
17/10/2019	933
18/10/2019	910

---

## Anexo N° 7

Línea "A"

Lote N° 1

Fecha	Consumo de Gas Natural (sm3)	Consumo de Energía Calorífica (Kw-h)	Fecha	Consumo de Gas Natural (sm3)	Consumo de Energía Calorífica (Kw-h)
14/02/2019	856	10012	26/03/2019	933	10912
15/02/2019	971	11359	27/03/2019	495	5794
16/02/2019	909	10633	28/03/2019	900	10533
17/02/2019	914	10692	29/03/2019	942	11027
18/02/2019	914	10694	30/03/2019	946	11065
19/02/2019	918	10740	31/03/2019	946	11063
20/02/2019	924	10814	01/04/2019	938	10974
21/02/2019	920	10765	02/04/2019	943	11032
22/02/2019	941	11011	03/04/2019	938	10978
23/02/2019	959	11215	04/04/2019	314	3677
24/02/2019	947	11075			
25/02/2019	949	11108			
26/02/2019	937	10967			
27/02/2019	928	10856			
28/02/2019	928	10856			
01/03/2019	913	10677			
02/03/2019	936	10948			
03/03/2019	928	10856			
04/03/2019	930	10886			
05/03/2019	911	10655			
06/03/2019	924	10808			
07/03/2019	923	10803			
08/03/2019	920	10767			
09/03/2019	920	10767			
10/03/2019	921	10770			
11/03/2019	924	10816			
12/03/2019	925	10826			
13/03/2019	928	10857			

14/03/2019	929	10873
15/03/2019	928	10855
16/03/2019	925	10826
17/03/2019	928	10861
18/03/2019	926	10833
19/03/2019	925	10823
20/03/2019	920	10765
21/03/2019	926	10839
22/03/2019	931	10896
23/03/2019	588	6883
24/03/2019	595	6964
25/03/2019	923	10794

---

## Anexo N° 8

Línea "A"

Lote N° 2

Fecha	Consumo de Gas Natural (sm3)	Consumo de Energía Calorífica (Kw-h)	Fecha	Consumo de Gas Natural (sm3)	Consumo de Energía Calorífica (Kw-h)
21/04/2019	896	10484	31/05/2019	928	10860
22/04/2019	943	11036	01/06/2019	920	10762
23/04/2019	939	10983	02/06/2019	921	10773
24/04/2019	939	10985	03/06/2019	915	10710
25/04/2019	941	11011	04/06/2019	919	10751
26/04/2019	934	10924	05/06/2019	917	10732
27/04/2019	940	10998	06/06/2019	919	10753
28/04/2019	936	10950	07/06/2019	921	10771
29/04/2019	935	10939	08/06/2019	917	10724
30/04/2019	1155	13509	09/06/2019	915	10708
01/05/2019	895	10473	10/06/2019	917	10726
02/05/2019	934	10925	11/06/2019	917	10724
03/05/2019	935	10935	12/06/2019	912	10673
04/05/2019	931	10894	13/06/2019	913	10679
05/05/2019	930	10881	14/06/2019	758	8871
06/05/2019	934	10932	15/06/2019	555	6488
07/05/2019	933	10912	16/06/2019	900	10527
08/05/2019	934	10926	17/06/2019	909	10630
09/05/2019	934	10932	18/06/2019	903	10568
10/05/2019	933	10918	19/06/2019	918	10742
11/05/2019	934	10925	20/06/2019	921	10781
12/05/2019	935	10941	21/06/2019	596	6977
13/05/2019	931	10894	22/06/2019	862	10082
14/05/2019	935	10937	23/06/2019	902	10550
15/05/2019	930	10878	24/06/2019	892	10436
16/05/2019	932	10900	25/06/2019	864	10107
17/05/2019	931	10893	26/06/2019	847	9913
18/05/2019	935	10936	27/06/2019	852	9968

19/05/2019	934	10926	28/06/2019	852	9972
20/05/2019	919	10749	29/06/2019	858	10044
21/05/2019	930	10876	30/06/2019	644	7531
22/05/2019	927	10845	01/07/2019	855	10004
23/05/2019	923	10797	02/07/2019	858	10041
24/05/2019	998	11678	03/07/2019	845	9888
25/05/2019	852	9969	04/07/2019	631	7377
26/05/2019	921	10771	05/07/2019	847	9914
27/05/2019	923	10796	06/07/2019	728	8523
28/05/2019	925	10818	07/07/2019	782	9155
29/05/2019	923	10797	08/07/2019	846	9902
30/05/2019	920	10769	09/07/2019	854	9995
			10/07/2019	104	1213

---

## Anexo N° 9

Línea "A"

Lote N° 3

Fecha	Consumo de Gas Natural (sm3)	Consumo de Energía Calorífica (Kw-h)	Fecha	Consumo de Gas Natural (sm3)	Consumo de Energía Calorífica (Kw-h)
09/09/2019	715	8360	19/10/2019	923	10796
10/09/2019	897	10495	20/10/2019	923	10794
11/09/2019	868	10155	21/10/2019	919	10756
12/09/2019	904	10581	22/10/2019	919	10747
13/09/2019	903	10569	23/10/2019	925	10819
14/09/2019	901	10538	24/10/2019	924	10812
15/09/2019	904	10571	25/10/2019	919	10754
16/09/2019	894	10455	26/10/2019	920	10764
17/09/2019	899	10514	27/10/2019	928	10857
18/09/2019	903	10560	28/10/2019	923	10800
19/09/2019	904	10574	29/10/2019	922	10785
20/09/2019	798	9342	30/10/2019	919	10754
21/09/2019	996	11657	31/10/2019	919	10752
22/09/2019	893	10445	01/11/2019	922	10792
23/09/2019	897	10499	02/11/2019	921	10780
24/09/2019	895	10473	03/11/2019	927	10848
25/09/2019	894	10462	04/11/2019	915	10710
26/09/2019	898	10501	05/11/2019	918	10740
27/09/2019	901	10542	06/11/2019	306	3580
28/09/2019	686	8022			
29/09/2019	898	10505			
30/09/2019	897	10499			
01/10/2019	898	10505			
02/10/2019	903	10570			
03/10/2019	899	10520			
04/10/2019	905	10584			
05/10/2019	904	10576			

06/10/2019	702	8216
07/10/2019	908	10623
08/10/2019	923	10794
09/10/2019	917	10733
10/10/2019	910	10645
11/10/2019	915	10700
12/10/2019	919	10754
13/10/2019	919	10758
14/10/2019	920	10765
15/10/2019	926	10830
16/10/2019	921	10780
17/10/2019	933	10921
18/10/2019	910	10651

---

## Anexo N° 10

---

Línea "A"

---

Lote N° 1

Fecha	Pesos de ZnO (t)	Fecha	Pesos de ZnO (t)
14/02/2019	4.522	26/03/2019	5.775
15/02/2019	5.745	27/03/2019	1.956
16/02/2019	5.691	28/03/2019	4.158
17/02/2019	4.765	29/03/2019	4.724
18/02/2019	4.857	30/03/2019	4.886
19/02/2019	5.118	31/03/2019	4.802
20/02/2019	5.704	01/04/2019	4.453
21/02/2019	6.001	02/04/2019	4.564
22/02/2019	5.925	03/04/2019	4.063
23/02/2019	5.829	04/04/2019	0.449
24/02/2019	5.657		
25/02/2019	5.489		
26/02/2019	5.586		
27/02/2019	5.896		
28/02/2019	5.235		
01/03/2019	5.013		
02/03/2019	4.864		
03/03/2019	4.976		
04/03/2019	5.555		
05/03/2019	5.615		
06/03/2019	5.223		
07/03/2019	5.206		
08/03/2019	5.158		
09/03/2019	5.131		
10/03/2019	5.097		
11/03/2019	5.074		
12/03/2019	5.139		

13/03/2019	5.261
14/03/2019	5.299
15/03/2019	5.254
16/03/2019	5.144
17/03/2019	5.201
18/03/2019	5.154
19/03/2019	5.143
20/03/2019	5.033
21/03/2019	5.101
22/03/2019	5.013
23/03/2019	2.559
24/03/2019	2.443
25/03/2019	4.950

---

## Anexo N° 11

Línea "A"

Lote N° 2

Fecha	Pesos de ZnO (t)	Fecha	Pesos de ZnO (t)	Fecha	Pesos de ZnO (t)
21/04/2019	4.053	31/05/2019	5.395	10/07/2019	0.562
22/04/2019	5.390	01/06/2019	5.543		
23/04/2019	6.104	02/06/2019	5.215		
24/04/2019	6.245	03/06/2019	5.137		
25/04/2019	6.347	04/06/2019	5.370		
26/04/2019	6.106	05/06/2019	5.455		
27/04/2019	5.145	06/06/2019	5.412		
28/04/2019	5.345	07/06/2019	5.492		
29/04/2019	5.786	08/06/2019	5.353		
30/04/2019	6.913	09/06/2019	5.364		
01/05/2019	5.516	10/06/2019	5.380		
02/05/2019	6.039	11/06/2019	5.450		
03/05/2019	6.066	12/06/2019	5.362		
04/05/2019	5.890	13/06/2019	5.524		
05/05/2019	5.958	14/06/2019	3.789		
06/05/2019	5.944	15/06/2019	2.037		
07/05/2019	5.840	16/06/2019	3.764		
08/05/2019	5.863	17/06/2019	4.227		
09/05/2019	5.804	18/06/2019	4.281		
10/05/2019	5.777	19/06/2019	4.382		
11/05/2019	5.749	20/06/2019	4.773		
12/05/2019	5.705	21/06/2019	3.900		
13/05/2019	5.647	22/06/2019	4.414		
14/05/2019	5.715	23/06/2019	4.685		
15/05/2019	5.489	24/06/2019	4.864		
16/05/2019	5.259	25/06/2019	4.606		

17/05/2019	5.477	26/06/2019	4.469
18/05/2019	5.362	27/06/2019	4.467
19/05/2019	4.951	28/06/2019	4.220
20/05/2019	4.744	29/06/2019	4.217
21/05/2019	5.249	30/06/2019	3.454
22/05/2019	5.364	01/07/2019	3.616
23/05/2019	5.418	02/07/2019	3.636
24/05/2019	5.339	03/07/2019	3.632
25/05/2019	5.465	04/07/2019	3.532
26/05/2019	5.541	05/07/2019	3.690
27/05/2019	5.497	06/07/2019	3.504
28/05/2019	5.452	07/07/2019	3.964
29/05/2019	5.489	08/07/2019	3.605
30/05/2019	5.371	09/07/2019	3.648

---

## Anexo N° 12

Línea "A"

Lote N° 3

Fecha	Pesos de ZnO (t)	Fecha	Pesos de ZnO (t)
09/09/2019	3.875	19/10/2019	5.115
10/09/2019	5.482	20/10/2019	5.315
11/09/2019	5.687	21/10/2019	5.447
12/09/2019	5.482	22/10/2019	5.459
13/09/2019	5.696	23/10/2019	5.447
14/09/2019	5.901	24/10/2019	5.386
15/09/2019	6.268	25/10/2019	5.247
16/09/2019	6.063	26/10/2019	5.495
17/09/2019	6.366	27/10/2019	5.548
18/09/2019	6.292	28/10/2019	5.513
19/09/2019	6.287	29/10/2019	5.478
20/09/2019	6.146	30/10/2019	5.262
21/09/2019	6.287	31/10/2019	5.407
22/09/2019	6.149	01/11/2019	5.323
23/09/2019	6.178	02/11/2019	5.328
24/09/2019	6.182	03/11/2019	5.365
25/09/2019	6.076	04/11/2019	5.418
26/09/2019	6.370	05/11/2019	5.306
27/09/2019	6.027	06/11/2019	1.859
28/09/2019	3.727		
29/09/2019	5.401		
30/09/2019	5.665		
01/10/2019	5.630		
02/10/2019	5.783		
03/10/2019	5.595		

04/10/2019	5.645
05/10/2019	5.283
06/10/2019	3.687
07/10/2019	5.002
08/10/2019	5.165
09/10/2019	5.115
10/10/2019	5.149
11/10/2019	5.284
12/10/2019	5.306
13/10/2019	5.342
14/10/2019	5.381
15/10/2019	5.179
16/10/2019	5.276
17/10/2019	5.110
18/10/2019	5.220

---

### Anexo N° 13

---

Línea "A"

---

Lote N° 1

---

Fecha	Rendimiento Térmico (Kw-h/t ZnO)	Fecha	Rendimiento Térmico (Kw-h/t ZnO)
14/02/2019	2214	26/03/2019	1889
15/02/2019	1977	27/03/2019	2962
16/02/2019	1868	28/03/2019	2533
17/02/2019	2244	29/03/2019	2334
18/02/2019	2202	30/03/2019	2265
19/02/2019	2098	31/03/2019	2304
20/02/2019	1896	01/04/2019	2465
21/02/2019	1794	02/04/2019	2417
22/02/2019	1858	03/04/2019	2702
23/02/2019	1924	04/04/2019	8198
24/02/2019	1958		
25/02/2019	2024		
26/02/2019	1963		
27/02/2019	1841		
28/02/2019	2074		
01/03/2019	2130		
02/03/2019	2251		
03/03/2019	2182		
04/03/2019	1960		
05/03/2019	1898		
06/03/2019	2069		
07/03/2019	2075		
08/03/2019	2087		
09/03/2019	2098		

10/03/2019	2113
11/03/2019	2132
12/03/2019	2106
13/03/2019	2064
14/03/2019	2052
15/03/2019	2066
16/03/2019	2104
17/03/2019	2088
18/03/2019	2102
19/03/2019	2105
20/03/2019	2139
21/03/2019	2125
22/03/2019	2173
23/03/2019	2690
24/03/2019	2851
25/03/2019	2180

---

## Anexo N° 14

---

Línea "A"

---

Lote N° 2

---

Fecha	Rendimiento Térmico (Kw-h/t ZnO)	Fecha	Rendimiento Térmico (Kw-h/t ZnO)
21/04/2019	2587	31/05/2019	2013
22/04/2019	2047	01/06/2019	1942
23/04/2019	1799	02/06/2019	2066
24/04/2019	1759	03/06/2019	2085
25/04/2019	1735	04/06/2019	2002
26/04/2019	1789	05/06/2019	1967
27/04/2019	2137	06/06/2019	1987
28/04/2019	2049	07/06/2019	1961
29/04/2019	1891	08/06/2019	2003
30/04/2019	1954	09/06/2019	1996
01/05/2019	1899	10/06/2019	1994
02/05/2019	1809	11/06/2019	1968
03/05/2019	1803	12/06/2019	1991
04/05/2019	1850	13/06/2019	1933
05/05/2019	1826	14/06/2019	2341
06/05/2019	1839	15/06/2019	3185
07/05/2019	1868	16/06/2019	2797
08/05/2019	1863	17/06/2019	2515
09/05/2019	1884	18/06/2019	2468
10/05/2019	1890	19/06/2019	2451
11/05/2019	1900	20/06/2019	2259
12/05/2019	1918	21/06/2019	1789
13/05/2019	1929	22/06/2019	2284
14/05/2019	1914	23/06/2019	2252

15/05/2019	1982	24/06/2019	2145
16/05/2019	2073	25/06/2019	2194
17/05/2019	1989	26/06/2019	2218
18/05/2019	2040	27/06/2019	2232
19/05/2019	2207	28/06/2019	2363
20/05/2019	2266	29/06/2019	2382
21/05/2019	2072	30/06/2019	2180
22/05/2019	2022	01/07/2019	2767
23/05/2019	1993	02/07/2019	2761
24/05/2019	2187	03/07/2019	2723
25/05/2019	1824	04/07/2019	2089
26/05/2019	1944	05/07/2019	2687
27/05/2019	1964	06/07/2019	2433
28/05/2019	1984	07/07/2019	2310
29/05/2019	1967	08/07/2019	2747
30/05/2019	2005	09/07/2019	2740
		10/07/2019	2157

---

## Anexo N° 15

---

Línea "A"

---

Lote N° 3

---

Fecha	Rendimiento Térmico (Kw-h/t ZnO)	Fecha	Rendimiento Térmico (Kw-h/t ZnO)
09/09/2019	2157	19/10/2019	2111
10/09/2019	1914	20/10/2019	2031
11/09/2019	1786	21/10/2019	1975
12/09/2019	1930	22/10/2019	1969
13/09/2019	1855	23/10/2019	1986
14/09/2019	1786	24/10/2019	2007
15/09/2019	1687	25/10/2019	2050
16/09/2019	1724	26/10/2019	1959
17/09/2019	1651	27/10/2019	1957
18/09/2019	1678	28/10/2019	1959
19/09/2019	1682	29/10/2019	1969
20/09/2019	1520	30/10/2019	2044
21/09/2019	1854	31/10/2019	1988
22/09/2019	1699	01/11/2019	2027
23/09/2019	1699	02/11/2019	2023
24/09/2019	1694	03/11/2019	2022
25/09/2019	1722	04/11/2019	1977
26/09/2019	1649	05/11/2019	2024
27/09/2019	1749	06/11/2019	1926
28/09/2019	2153		
29/09/2019	1945		
30/09/2019	1853		
01/10/2019	1866		
02/10/2019	1828		

03/10/2019	1880
04/10/2019	1875
05/10/2019	2002
06/10/2019	2229
07/10/2019	2124
08/10/2019	2090
09/10/2019	2098
10/10/2019	2067
11/10/2019	2025
12/10/2019	2027
13/10/2019	2014
14/10/2019	2001
15/10/2019	2091
16/10/2019	2043
17/10/2019	2137
18/10/2019	2040

---