

Composición de funciones lineales para el Ajuste de Aplicaciones en el Cuantómetro OBLF QSG 750-II

Composition of Linear Functions for Application Tuning on the OBLF QSG 750-II Quantometer

Waldo Osmidel Ávila Garcés¹ (waldo@ltu.giat.cu) (<https://orcid.org/0000-0002-8033-8639>)

Yenet Cabrales Perdomo² (yenet@ult.edu.cu) (<https://orcid.org/0000-0003-4046-2085>)

Ania Domínguez Reyes³ (ania@ult.edu.cu) (<https://orcid.org/0000-0003-3434-3493>)

Resumen

En este artículo se estudian los fundamentos de una opción de ajuste analítico relativamente nueva en la espectrometría de emisión óptica: Ajuste de Aplicación, utilizando el Cuantómetro OBLF QSG 750-II. Se utilizaron aplicaciones MS Excel para la visualización de la respuesta del equipo respecto a los valores de referencia y para la evaluación teórica de los factores de corrección obtenidos. La eficacia del Ajuste de Aplicaciones se verificó mediante ensayos de control con Materiales de Referencia Certificados. Los resultados obtenidos muestran que esta opción de ajuste permite realizar correcciones para todo o parte del dominio de valores de un determinado canal analítico, dentro de un grupo de trabajo específico, con un nivel de confianza adecuado; sin necesidad de realizar una operación de Recalibración para todo el sistema analítico.

Palabras clave: curva de calibración, ajuste analítico, modelo matemático, control de deriva.

Abstract

This paper studies the fundamentals behind a relatively new analytical adjustment option in Optical Emission Spectrometry: Application Adjustment, using the OBLF QSG 750-II Quantometer. MS Excel applications were used for the visualization of the response of the equipment with respect to reference values and for the theoretical evaluation of the correction factors obtained. The effectiveness of the Application Tuning was verified by control tests with Certified Reference Materials. The results obtained show that this adjustment option allows corrections to be made for all or part of the value domain of a given analytical channel, within a specific working group, with an adequate level of confidence; without having to perform a Recalibration operation for the entire analytical system.

Key words: calibration plot, analytical adjustment, mathematical model, drift control.

¹ Máster en Química. Licenciado en Química. Empresa Nacional de Análisis y Servicios Técnicos. Las Tunas, Cuba.

² Máster en Ciencias de la Educación. Licenciado en Educación, especialidad Matemática-Física. Universidad de Las Tunas, Cuba.

³ Doctor en Ciencias de la Educación. Licenciado en Educación, especialidad Matemática. Universidad de Las Tunas, Cuba.

Introducción

Durante el desarrollo de la química como ciencia, las matemáticas han desempeñado un papel fundamental. Las aplicaciones matemáticas sirven para crear modelos teóricos y expresiones que permiten una mejor comprensión y exactitud de los procesos químicos. Algunas herramientas, como las derivadas, han sido fundamentales para poder expresar y calcular razones de cambio y luego demostrarlas mediante la práctica. Por esto a acompañado desde sus inicios a esta ciencia, como aspecto formativo, en la aplicación de la lógica deductiva y su carácter formal y, posteriormente como herramienta de diseño, el análisis y optimización de los procesos químicos.

Los métodos de ensayo basados en Espectroscopia Atómica son los más ampliamente difundidos para la determinación del contenido de diferentes elementos químicos en la mayoría de las matrices imaginables, especialmente las metálicas. Fue hacia la mitad de la década de 1940, cuando se introdujeron los métodos espectroscópicos, con los primeros espectrómetros de emisión (Coedo y Padilla, 1998 y Peña, 2012).

El desarrollo posterior de estos equipos produjo sin duda un cambio drástico en las determinaciones químicas. Se transformaron los clásicos laboratorios de análisis químico en sofisticados laboratorios físico-químicos, en los cuales es posible realizar trabajos que con anterioridad precisaban mucho tiempo y destreza (Argota y Fernández, 2012; Ramírez et al., 2018; González y Montaña, 2015).

Los métodos instrumentales de Análisis Químico Cuantitativo, dada su naturaleza física (electrónica, electromagnética, térmica, etc.) basan sus determinaciones en la relación que existe entre una propiedad del mensurando, por ejemplo: su contenido en una muestra y una Propiedad Física medible (Aranda, Tapia y Millán, 2022 y Llovet, 2017).

Esta relación debe tener carácter funcional: para cada valor que pueda tomar la propiedad física que se mide, existe uno y solo un valor para la propiedad del mensurando (Castillo y Gamboa, 2020). El modelo matemático que describe esta relación, con un nivel de confianza adecuado, se denomina Curva de Calibración (Ramírez et al., 2018). En la práctica se obtiene realizando varias mediciones a Materiales de Referencia o Patrones con distintos contenidos del mensurando y obteniendo el modelo matemático que mejor ajuste este comportamiento.

Para describir con mayor exactitud dicho comportamiento, en ocasiones la Curva de Calibración está dividida por segmentos, debido a que la relación entre la propiedad física y la propiedad química no se manifiesta de igual forma a distintos valores del mensurando.

Para la corrección de la deriva natural que experimenta la respuesta del sistema analítico respecto a un valor de referencia, estos métodos instrumentales aplican diversas opciones de ajuste analítico (Cárdenas, Núñez y Núñez, 2019). Dado que la dinámica de trabajo de los laboratorios actuales, requiere de la realización de operaciones de recalibración en un breve período de tiempo, se han desarrollado métodos alternativos para lograr relacionar el resultado de medida con el valor teórico o

de referencia, con un nivel adecuado de confianza (Wyclslik, 2019; Gómez, Ortiz, Gallego y Echeverri, 2021).

En este trabajo se estudian los fundamentos que sustentan una opción de ajuste analítico relativamente novedosa en Espectrometría por Emisión Óptica: el Ajuste de Aplicaciones. El estudio permitió desarrollar una metodología para la obtención de factores de corrección, basada en la composición de las funciones que describen el modelo matemático de respuesta para la determinación de composición química en muestras de acero al carbono, utilizando un Cuantómetro OBLF QSG 750-II.

Materiales y métodos

Ajuste de Aplicaciones en el Cuantómetro OBLF QSG 750-II

Se utiliza, como gas inerte, Argón grado espectrométrico (Argón 5.0) suministrado por MESSER Group, Alemania. Tela Abrasiva ZK713X (tamaño de grano G-60) de VSM-Vitex Abrasivos, S.A., Alemania. Material de Referencia Certificado IARM 194A de Analytical Reference Materials International, Estados Unidos. Material de Referencia Certificado BS 1030 Brammer Standard Company, Inc., Estados Unidos. Material de Referencia Certificado BS 4820A Brammer Standard Company, Inc., Estados Unidos. Material de Referencia Espectrométrico IMZ-117 del Instituto Metalúrgico de Silesia, República de Polonia; distribuido por Brammer Standard Company, Inc., Estados Unidos. Material de Referencia (Setting-up Sample) BS 04D de Brammer Standard Company, Inc., Estados Unidos.

Equipos empleados: Esmeriladora G9-250 de la República Popular Democrática de Corea, Rectificadora de dos discos HERZOG HT-350-2 de Alemania, Filtro Purificador de Argón Sircal Instruments MP-2000 de Reino Unido, Cuantómetro de Emisión Óptica OBLF QSG 750-II de Alemania.

El Cuantómetro OBLF QSG 750-II

El Cuantómetro OBLF QSG 750-II es un Espectrómetro de Emisión Óptica (Cuantómetro), diseñado para la determinación cuantitativa del contenido de varios elementos químicos en muestras de distintos tipos de materiales ferrosos (Ramírez, Gil, Corrales y Cruz, 2021; Ávila, Arada y Hechavarría, 2018).

La determinación se basa en la relación que existe entre la concentración de los elementos presentes en la muestra y la emisión de energía en forma de luz que producen los átomos de dichos elementos, luego de ser excitados por una fuente de energía (American Society for Testing Materials, 2017).

Para la corrección de la deriva natural que sufre el sistema analítico, el Cuantómetro OBLF QSG 750-II posee tres opciones de ajuste:

1. Recalibración.
2. Estandarización Tipo.
3. Ajuste de Aplicaciones.

Las cuales generan Factores de Corrección, según la naturaleza del desajuste. El cual, a su vez, se detecta mediante ensayos de control con Materiales de Referencia.

Resultados y discusión

La Tabla 1 resume las principales diferencias entre las tres opciones (Ávila, 2019).

El Ajuste de Aplicaciones en este equipo es una opción de ajuste analítico de acuerdo con el denominado método de dos puntos. Puede utilizarse, por tanto, para corregir desajustes que reflejen rotación, traslación (o ambos), respecto a la respuesta teórica o de referencia. Las facilidades que aporta esta opción de ajuste son tales que casi puede compararse con una Recalibración para un elemento químico en un grupo de trabajo determinado (ver tabla 1).

Tabla 1

Principales diferencias entre las opciones de ajuste en el cuantómetro oblf qsg 750-ii

Aspectos	Opciones de Ajuste			
	Recalibración	Estandarización Tipo	Ajuste Aplicaciones	de
Tipo de muestra utilizada	Juego de muestras extraordinariamente homogéneas (Setting Up Samples)	Material seleccionado por el laboratorio para este fin	Materiales Referencia	de
Cantidad de muestras	Siete	Uno	Dos	
Magnitud medida	Intensidad de luz	Concentración	Concentración	
Naturaleza del desajuste	Rotación, traslación o ambas	Traslación	Rotación, traslación o ambas	
Elementos que ajusta	Todos los elementos	Todos los elementos	Elementos de interés	
Grupos de trabajo que ajusta	Todos los grupos de trabajo	Grupo de trabajo de interés	Grupo de trabajo de interés	

Fuente: Elaboración propia.

Consiste en realizar determinaciones a dos Materiales de Referencia con contenidos bajos y altos del elemento químico de interés, respectivamente. Luego se relacionan los resultados que emite el equipo con los de referencia para generar los Factores de

Corrección correspondientes: Factor de Corrección Multiplicativo (o pendiente) y Factor de Corrección Aditivo (o intercepto).

Una vez que la luz emitida por los átomos excitados se transforma en señal eléctrica, luego en analógica, después en digital, hasta relacionarse con la concentración del elemento químico mediante la Curva de Calibración (al resultado obtenido hasta aquí le llamaremos “en bruto”, por comodidad), antes de visualizarse, en el software OBLFwin ocurre otra transformación: si para el canal analítico en cuestión existen Factores de Corrección registrados en Menú Principal/Programas de Análisis/Ajuste de Aplicaciones, este resultado “en bruto” se transforma según la ecuación:

$$y_A = m_v \cdot x + n_v \quad (1)$$

Donde:

y_A : Resultado transformado (resultado actual).

x : Resultado “en bruto”.

m_v : Factor de Corrección Multiplicativo vigente (pendiente).

n_v : Factor de Corrección Aditivo vigente (intercepto).

El modelo de esta relación/transformación corresponde al de una función lineal debido a la propia naturaleza del método de ajuste de dos puntos. Es la forma en que se relacionan los resultados sobre contenidos bajos y altos, con los respectivos valores de referencia (Figura 1).

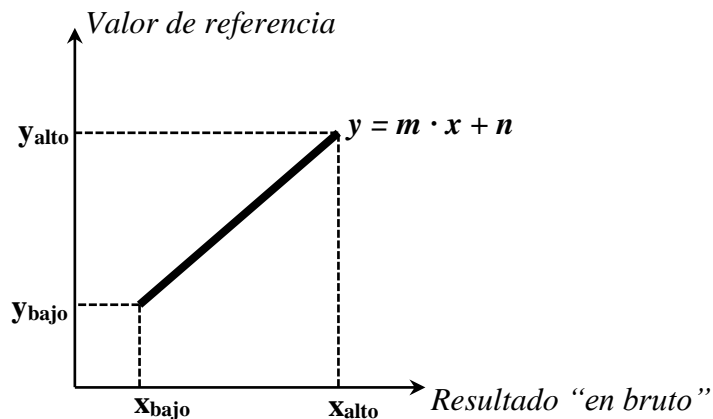
De este modo, podríamos definir el Ajuste de Aplicaciones como la transformación del resultado “en bruto” del sistema analítico, en el valor verdadero del mensurando.

Los Factores de Corrección para el Ajuste de Aplicaciones se obtienen mediante el tratamiento analítico de una función lineal, dados dos de sus puntos. Matemáticamente consiste en hallar la ecuación que describe la Figura 1, a partir de los valores de los puntos $P_b(x_{bajo}, y_{bajo})$ y $P_a(x_{alto}, y_{alto})$, determinando:

- Pendiente (Factor Multiplicativo).
- Intercepto (Factor Aditivo).

Figura 1

Relación de los resultados con los respectivos valores de referencia



Fuente: Elaboración propia.

Para ello debe seleccionarse un Material de Referencia con contenido bajo del mensurando y otro con contenido alto. Realizamos determinaciones a ambos materiales de modo que tengamos los datos que se relacionan en la Tabla 2. De esta manera, las coordenadas de los puntos P_b y P_a son:

- $P_b(y_{Ab}, y_{Rb})$: resultado del ensayo para contenidos bajos; valor de referencia bajo.
- $P_a(y_{Aa}, y_{Ra})$: resultado del ensayo para contenidos altos; valor de referencia alto.

Tabla 2

Datos necesarios para el ajuste de aplicaciones

Material de Referencia	Datos	Descripción	Notación
Con contenido bajo	Valor actual	Resultado actual que se obtiene al realizar la determinación	y_{Ab}
	Valor de Referencia	Valor certificado	y_{Rb}
Con contenido alto	Valor actual	Resultado actual que se obtiene al realizar la determinación	y_{Aa}
	Valor de Referencia	Valor certificado	y_{Ra}

Fuente: Elaboración propia.

Determinación del Factor de Corrección Multiplicativo

La pendiente de una función lineal se calcula según la expresión general:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (2)$$

Sustituyendo en la Ecuación 2 los datos para el Ajuste Aplicaciones (Tabla 2), tenemos que el Factor Multiplicativo se calcula como:

$$m = \frac{(y_{Ra} - y_{Rb})}{(y_{Aa} - y_{Ab})} \quad (3)$$

Determinación del Factor de Corrección Aditivo

Una vez que tenemos la pendiente de una función lineal y las coordenadas de uno de sus puntos, el intercepto con el eje de las abscisas se calcula según la expresión general:

$$n = y - m \cdot x \quad (4)$$

Sustituyendo en la Ecuación 4 los datos para el Ajuste de Aplicaciones, tenemos que el Factor Aditivo se calcula como:

$$n = y_{Aa} - \frac{(y_{Ra} - y_{Rb})}{(y_{Aa} - y_{Ab})} \cdot y_{Ra} \quad (5)$$

Combinación de los Factores de Corrección obtenidos con los vigentes

Cuando ya existen Factores de Corrección Aditivos y/o Multiplicativos registrados en el software del instrumento, los factores obtenidos deben combinarse con ellos. Esto se debe a que los resultados actuales se obtienen debido a la transformación de un resultado “en bruto”, teniendo en cuenta el Ajuste de Aplicaciones vigente (ver Ecuación 1). Es lo que en Matemáticas se denomina una composición de funciones o Función Compuesta. De este modo, los Factores de Corrección que finalmente se registrarán, son una combinación de los factores obtenidos con los vigentes.

Para combinar los factores de corrección debemos tener en cuenta que el resultado con el equipo finalmente ajustado analíticamente, se obtendrá transformando el resultado actual con los Factores de Corrección obtenidos, según:

$$y = m \cdot y_A + n \quad (6)$$

Donde:

y : Resultado con el equipo finalmente ajustado analíticamente.

y_A : Resultado actual.

m : Factor Multiplicativo obtenido.

n : Factor Aditivo obtenido.

Pero el resultado actual está siendo transformado, a la vez, con los Factores de Corrección Vigentes, según la Ecuación 1. Luego, sustituyendo la Ecuación 1 en la Ecuación 6, tenemos que:

$$y = m(m_v \cdot x + n_v) + n \quad (7)$$

Desarrollando los términos de la Ecuación 7, aplicando la propiedad distributiva:

$$y = \underbrace{m \cdot m_v}_{\text{pendiente}} \cdot x + \underbrace{m \cdot n_v + n}_{\text{intercepto}} \quad (8)$$

Por tanto:

- El Factor Multiplicativo Combinado es el resultado de multiplicar el Factor Multiplicativo obtenido con el vigente (Ecuación 9).

$$m_c = m \cdot m_v \quad (9)$$

Donde:

m_c : Factor Multiplicativo Combinado.

m : Factor Multiplicativo obtenido.

m_v : Factor Multiplicativo vigente.

- El Factor Aditivo Combinado es el producto del Factor Multiplicativo obtenido por el Factor Aditivo Vigente, más el Factor Aditivo obtenido (Ecuación 10).

$$n_c = m \cdot n_v + n \quad (10)$$

Donde:

n_c : Factor Aditivo Combinado.

m : Factor Multiplicativo obtenido.

n_v : Factor Aditivo vigente.

n : Factor Aditivo obtenido.

Para la comprobación de la efectividad de la propuesta, se verificó el Ajuste Analítico del Cuantómetro OBLF QSG 750-II, aplicando la composición de funciones lineales para la obtención de los Factores de Corrección, en la determinación del contenido de nitrógeno en muestras de acero al carbono. Para ello se seleccionaron dos Materiales de Referencia. El IARM 194A con contenido bajo de este analito (Analytical Reference Materials International, 2004) y el IMZ-117 con contenido alto (Instytut Metalurgii Żelaza, 2018). Los resultados del ensayo de control se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Resultados del ensayo de control con materiales de referencia

Material referencia	de Valor Certificado (% m/m)	Resultado Ensayo (% m/m)	de ε	Evaluación
IARM 194A	0,0055 ± 0,0002	0,0052 ± 0,0003	0,8	Satisfactorio
IMZ-117	0,0154 ± 0,0005	0,0129 ± 0,0005	3,5	No Satisfactorio

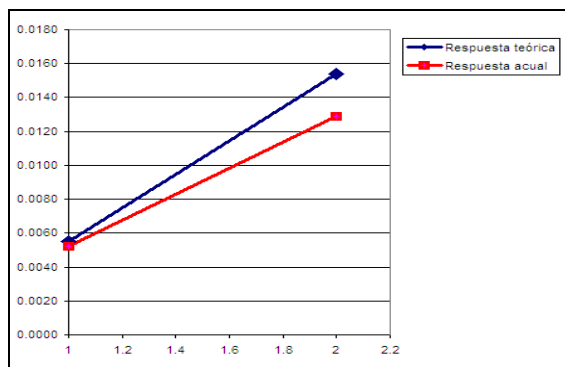
Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados muestran un desajuste en la respuesta analítica, respecto a los valores de referencia. El desajuste es más significativo para contenidos altos de nitrógeno. El gráfico de la figura 2, obtenido con una aplicación MS Excel, visualiza la diferencia entre los resultados obtenidos y la respuesta teórica.

La figura 2 muestra una evidente rotación en los resultados, respecto a los valores de referencia. Dado que los resultados de ensayo se encuentran fuera del intervalo de incertidumbre reportado para los valores certificados de los Materiales de Referencia, es necesario realizar una operación de ajuste analítico.

Figura 2

Representación gráfica del resultado del ensayo de control



Fuente: Elaboración propia.

Utilizando los resultados del ensayo de control (tabla 3) se calculan los factores de corrección para el Ajuste de Aplicaciones, según las ecuaciones 3 y 5. La tabla 4 muestra los valores de los factores multiplicativo y aditivo, obtenidos.

Al estar vigentes, en el software del equipo, factores de corrección de un Ajuste de Aplicaciones realizado anteriormente, los factores obtenidos deben combinarse con los vigentes para lograr el ajuste final del sistema analítico, según las ecuaciones 9 y 10. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4

Factores de corrección para el ajuste de aplicaciones

Factor de corrección	Multiplicativo	Aditivo
Factor obtenido	1,2857	-0,0012
Factor vigente	1,0230	-0,0015
Factor combinado	1,3153	-0,0031

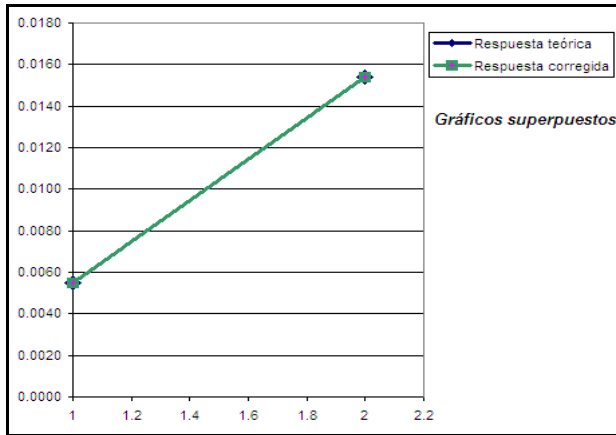
Fuente: Elaboración propia.

Nótese que los resultados del ensayo de control muestran que, para contenidos altos de nitrógeno, los resultados obtenidos eran inferiores al valor certificado para el Material de Referencia IMZ-117. Por eso el valor del Factor Multiplicativo combinado es mayor que el que estaba vigente, realizando una corrección en la pendiente del modelo matemático que describe la relación resultado-valor de referencia. El Factor Aditivo nos indica que además existía un desajuste por traslación, aunque no tan significativo como la rotación.

Con ayuda de la aplicación de MS Excel podemos realizar una evaluación de la corrección obtenida, antes de introducir los datos en el software del Cuantómetro. La figura 3 muestra como la gráfica de los resultados obtenidos coincide con la respuesta teórica esperada (gráficos superpuestos). Si bien no es una evaluación concluyente, si permite determinar con prontitud la aparición de errores groseros antes de modificar los datos en el ajuste del sistema analítico.

Figura 3

Evaluación de la corrección



Fuente: Elaboración propia.

La evaluación final de la efectividad de la corrección se realiza mediante ensayos de control con Materiales de Referencia apropiados. En este estudio se utilizaron cuatro Materiales de Referencia Certificados:

- IARM 194A (Analytical Reference Materials International, 2004).
- BS 4820A (Brammer Standard Company, Inc., 2011).
- BS 1030 (Brammer Standard Company, Inc., 2011).
- IMZ-117 (Instytut Metalurgii Źelaza, 2018).

Los resultados se evaluaron a partir del error estandarizado de las determinaciones. Este estadígrafo evalúa el nivel de significación del error absoluto de las mediciones, como componente de sesgo, respecto a la incertidumbre asociada a las mismas como factor de variabilidad (Botero, Santa Chaves y Mendoza, 2009). Esta relación se expresa mediante la Ecuación 11.

$$\mathcal{E} = \frac{x_{ref} - x_{med}}{\sqrt{u_{ref}^2 + u_{med}^2}} \quad (11)$$

Donde:

x_{ref} : Valor certificado del Material de Referencia.

x_{med} : Resultado de ensayo de control.

u_{ref} : Incertidumbre del Material de Referencia Certificado.

u_{med} : Incertidumbre asociada al resultado de ensayo

Cuando la diferencia entre el resultado de ensayo y el valor de referencia (numerador de la Ecuación 11) no supera la combinación de las incertidumbres asociadas al valor certificado del Material de Referencia y al resultado del ensayo de control (denominador de la Ecuación 11), este estadígrafo toma valores menores o igual que uno.

Esto significa que los componentes de sesgo en la determinación no son significativos con un nivel de confianza adecuado. El resultado del ensayo de control es satisfactorio y puede afirmarse que el sistema analítico está adecuadamente ajustado. El criterio de aceptación de esta prueba estadística se aplica utilizando la Ecuación 12.

$$|\varepsilon| \leq 1 \quad (12)$$

La Tabla 5 muestra los resultados del ensayo de control. Nótese que los valores obtenidos para el error estandarizado son menores que uno para cada determinación, por lo que podemos plantear que la corrección de la respuesta analítica, utilizando el Ajuste de Aplicaciones, es satisfactoria.

Tabla 5

Comprobación de la efectividad de la corrección

Material de referencia	Valor Certificado (% m/m)	Resultado de Ensayo (% m/m)	$ \varepsilon $	Evaluación
IARM 194A	0,0055 ± 0,0002	0,0054 ± 0,0003	0,3	Satisfactorio
BS 4820A	0,0076 ± 0,0004	0,0074 ± 0,0005	0,3	Satisfactorio
BS 1030	0,0107 ± 0,0008	0,0109 ± 0,0004	0,2	Satisfactorio
IMZ-117	0,0154 ± 0,0005	0,0155 ± 0,0006	0,1	Satisfactorio

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El Ajuste de Aplicaciones en el Cuantómetro OBLF QSG 750-II es una opción para la corrección de deriva basado en el denominado método de dos puntos. Relaciona los resultados obtenidos con los respectivos valores de referencia, mediante la aplicación de un modelo matemático lineal (función lineal). Esto permite utilizarla para corregir desajustes que reflejen rotación, traslación (o ambos), respecto a la respuesta teórica.

Esta opción de ajuste permite realizar correcciones para todo o parte del dominio de valores de un determinado canal analítico, dentro de un grupo de trabajo específico, con un adecuado nivel de confianza, sin tener que realizar una operación de Recalibración para todo el sistema analítico. Esto es muy útil cuando se dispone de poco tiempo para emitir un resultado de ensayo.

El Ajuste de Aplicaciones permite realizar ajustes en la respuesta del sistema analítico partiendo del análisis de los resultados obtenidos, no a partir del análisis de la señal física primaria que se relaciona con los valores del mensurando. El abuso de esta opción de ajuste puede influir entonces negativamente en alguno de los parámetros de desempeño del método analítico.

Referencias bibliográficas

- American Society for Testing Materials (2017). *Standard Test Method for Optical Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel, E415-17*. West Conshohocken: ASTM.
- Analytical Reference Materials International (2004). *Certificate of Analysis Certified Reference Material*. Certificado No. 194A-06011994-ARM-F.
- Aranda, D., Tapia, A. y Millán, P. (2022). Calibración y caracterización de sensores capacitivos de bajo coste para la monitorización de humedad de suelo. *Modelado, Simulación y Optimización*. Simposio llevado a cabo en la XLIII Jornadas de Automática, Universidad Loyola, España. <http://dx.doi.org/10.17979/spudc.9788497498418.0479>
- Argota, H. y Fernández, Á. (2012). Evaluación de la precisión intralaboratorio para la determinación simultánea de ocho elementos en muestras geológicas aplicando la espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado. *Revista Cubana de Química, XXIV(3)*, 224-230. <http://dx.doi.org/10.46480/esj.5.4.176>
- Ávila, W. (2019) *Fundamentos del Ajuste de Aplicaciones en el Cuantómetro OBLF QSG 750-II*. Las Tunas: Empresa de Aceros Inoxidables ACINOX.
- Ávila, W., Arada, M. y Hechavarría, A. (2018) Estimación de la Incertidumbre de medida en ensayos por Espectrometría de Emisión Óptica en aceros al carbono y de baja aleación. *Afinidad, LXXV(584)*, 290-295. <http://dx.doi.org/10.21754/tecnia.v23i1.65>
- Botero, M., Santa Chaves, J. J. y Mendoza, J. (2009). Procedimiento de comparación entre laboratorios de calibración basado en el criterio del error normalizado. *Scientia et Technica, XV(42)*, 226-229. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84916714042>
- Brammer Standard Company, Inc. (2011). *Certificate of Analysis*. Certificado No. 4820A-022211.
- Brammer Standard Company, Inc. (2011). *Certificate of Analysis*. Certificado No. 1030-080511.
- Cárdenas, V. M., Núñez, M., y Núñez, G. (2019). Ajustes alternativos sobre la distribución de datos en ELISAs comerciales. *Bioanálisis, (96)*, 24-29. <https://revistabioanálisis.com/index.php/11-edicion-digital/110-revista-96>

- Castillo, Y. y Gamboa, M. E. (2020). Tratamiento didáctico interdisciplinario de funciones Matemáticas. *Didasc@lia: Didáctica y Educación*, XI(3), 299-324. <https://revistas.ult.edu.cu/index.php/didascalía/article/view/1007>
- Coedo, A. G., Dorado, Ma. T. y Padilla, I. (1998). El análisis químico en el control de procesos metalúrgicos. *Revista de Metalurgia*, 34(Mayo), 16-21. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.iextra.700>
- Gómez, C. R., Ortiz, A., Gallego, C. P. y Echeverri, L. F. (2021) Curvas de calibración NIRS para la predicción de compuestos químicos de café verde almendra. *Cenicafé*, 72(2), 50-61. <http://dx.doi.org/10.38141/10778/72204>
- González, M. A. y Montaña, L. M. (2015). La espectroscopía y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo XXI. *Latin American Journal Physical Education*, 9(4), 1-14. https://lajpe.org>dec15>4602_Gonzalez
- Instituto Metalurgii Želaza (2018). *Certificate of Analysis IMZ-117*. Certificado No. 1115.
- Llovet, N. F. (2017). Deterioro de un acero bajo aleado en medio sulfuroso y elevadas temperaturas. *Revista Cubana de Química*, 29(2), 199-211. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212017000200003
- Peña, J. Y. (2012). *La espectroscopía y su desarrollo como una herramienta didáctica para comprender la estructura de la materia*. [Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá]. <http://dx.doi.org/10.36443/10259/6958>
- Ramírez, J. A., Gil, J. M., Corrales, J. L. y Cruz, A. (2021). Desoxidación primaria del metal líquido durante el vertido del Horno de Arco Eléctrico a la cuchara y proceso de ajuste y afino de Horno Cuchara. *Innovación Tecnológica*, 27(1), 1-10. <http://dx.doi.org/10.36443/10259/5127>
- Ramírez, S., Cruzata, R., Zorrilla, M., Jiménez, Y., Pérez, M. M., Cruz, Y. y Morera, L. E. (2018). Cuantificación de los contenidos de nitrato en aguas de pozo y aguas residuales con el empleo de electrodos selectivos. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 131-142. <http://dx.doi.org/10.24275/uami.pz50gw25s>
- Wyclslik, A. (2019). Acceptable errors in chemical analyses of products made from Steel and metal alloys. *MPT International*, 4(septiembre), 48-50. <https://issuu.com/stahleisen/stacks/d77d67491ed44334a4b10ca2687836ac>

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Los autores participaron en la búsqueda y análisis de la información para el artículo, así como en su diseño y redacción.