



Trabajo Final

Carrera de Ingeniería Química

ANÁLISIS COMPARATIVO Y VALIDACIÓN OPERATIVA DE MÉTODOS DE CAMBIO DE ÁNODOS EN CELDAS ELECTROLÍTICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE ALUMINIO

Alumna: Nadia María Alderete Gobbato

**Tutor: Dr. Ing. Lucas Maximiliano
Machín Ferrero**

**Tutor Asociado: Ing. Miguela Hanna
Martinez Montivero**

2025



Trabajo Final de la carrera de Ingeniería Química presentada a la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, como requisito final para obtener el título de **Ingeniero Químico**.

Trabajo Final evaluado por el tribunal integrado por:

- Dr. Ing. Mario Rodolfo Cesca
- Ing. Nancy Alves
- Dra. Ing. Adriana Patricia del Milagro Chaile

y presentado oralmente en el día de la fecha.

San Miguel de Tucumán, *06 de Agosto de 2025*

**Dr. Ing. Mario Rodolfo
Cesca**

Ing. Nancy Alves

**Dra. Ing. Adriana Patricia
del Milagro Chaile**

RESUMEN

La electrólisis de alúmina constituye el método industrial más utilizado para la obtención de aluminio metálico, a través del proceso Hall-Hérault. Este proceso se lleva a cabo en celdas electrolíticas donde, bajo condiciones de alta temperatura (alrededor de 960 °C), una corriente continua de elevada intensidad (entre 180 y 220 kA) atraviesa el electrolito, generando aluminio líquido en el cátodo y liberando gases desde el ánodo, el cual se consume progresivamente.

La operación del cambio de ánodos en estas celdas es una tarea crítica tanto desde el punto de vista operativo como de seguridad. Un procedimiento ineficiente puede derivar en tiempos improductivos, desvíos operativos y mayor exposición al riesgo del personal.

Se desarrollaron ensayos experimentales para comparar la precisión, repetibilidad y dispersión de ambos métodos de medición de la posición del ánodo en la cuba electrolítica: DIANA y CALIBRE, evaluando además su aplicabilidad en campo. A partir de los ensayos, se identificó el método que presentaba mayor dispersión y se analizaron los beneficios operativos de implementar el método DIANA como alternativa de medición.

Asimismo, se realizó un estudio de redefinición de los límites de control y su posterior validación, a partir de la comparación entre las bases de datos obtenidas en dos etapas del proceso (mediciones de comparación y de validación). Además, se verificaron estos resultados con la base de datos histórica, con el objetivo de evaluar el comportamiento de las mediciones a lo largo de un período más amplio.

Se evaluó así la sensibilidad de la medición anódica frente a otras variables del sistema, como el voltaje de marcha y la corriente, aplicando la ley de Ohm para interpretar las mediciones y su vinculación con la resistencia eléctrica en la celda, considerando que la caída de tensión anódica representa una fracción significativa de dicha resistencia total. En este contexto, se confirmó que la medición anódica no guarda relación directamente proporcional con el voltaje de marcha ni con la corriente, lo cual refuerza el conocimiento del proceso para vincular otras variables ante algún problema operativo.

Las mejoras operativas mejoran la seguridad y eficiencia del procedimiento, reduciendo tanto el tiempo efectivo de cambio como los riesgos asociados. Entre las mejoras sugeridas se destacan la incorporación de límites de control de las mediciones anódicas y la capacitación técnica del personal involucrado.

Palabras claves: Electrólisis – Ánodos de carbono – Automatización – Validación

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá y a mi papá, por su apoyo incondicional de cada día, que me permitió alcanzar esta gran etapa de mi vida. Me llena de felicidad poder compartir este logro con ambos.

A mi compañero de tantos años, por ser una parte importante de mi camino, que me acompañó y alentó en todo momento.

A mis amigas, hermanas de la vida, por creer en mí y estar siempre cuando las necesité.

A los amigos que la facultad puso en mi camino, por estar presentes con su apoyo, consejos y compañía en cada etapa de este recorrido.

A mi familia y familia política, por brindarme siempre palabras de aliento.

A mi tutor, Dr. Lucas Machín, por su excelente predisposición en todo momento y su guía para poder concluir este trabajo.

A mi cotutora, Ing. Miguela Martínez, por su colaboración durante el desarrollo de este trabajo.

A los profesores de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET), por sus enseñanzas y dedicación a lo largo de estos años de estudio.

Gracias a todos los que, de una u otra forma, me ayudaron a concretar la realización de este trabajo y poder así, culminar esta etapa.

INDICE

RESUMEN	3
AGRADECIMIENTOS	4
INDICE	5
PRÓLOGO	7
1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 MATERIAS PRIMAS	8
Alúmina	8
Energía	9
Ánodos	9
1.2 PRODUCTO	11
Aluminio	11
1.3 CELDAS ELECTROLÍTICAS	13
Características	13
Corriente	14
Alimentación	16
1.4 OPERACIONES	18
Colada	18
Proceso	19
Cambio de Ánodos	20
Cobertura	21
1.5 OBJETIVOS	21
2 ANÁLISIS COMPARATIVO	22
2.1 SITUACIÓN ACTUAL	22
2.2 DEFINICIÓN DEL PROYECTO	22
2.3 ORGANIZACIÓN	23
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.5 MEDICIONES	25
Mediciones de prueba	25
Mediciones de comparación	26
2.6 ANALISIS COMPARATIVO	28
Mediciones útiles	28

Comparación CALIBRE y DIANA	29
Límites de Control	30
2.7 CONCLUSIONES.....	31
3 VALIDACIÓN DE LÍMITES DE CONTROL.....	32
3.1 PROBLEMATICA HALLADA.....	32
3.2 CALCULOS ESTADÍSTICOS.....	32
Selección de mediciones.....	32
Ecuaciones Estadísticas.....	33
Resultados Estadísticos	33
3.3 COMPARACIÓN ENTRE MEDICIONES Y LÍMITES PROPUESTOS	34
3.4 MEDICIONES DE VALIDACIÓN	37
Comparación de los resultados con los límites Calculados	37
Comparación de mediciones y límites	37
3.5 MEDICIONES HISTÓRICAS.....	40
3.6 CONCLUSIONES.....	41
4 ANÁLISIS DE MEJORAS.....	43
4.1 DIAGRAMA DE GANTT	43
5 RELACIÓN ENTRE VARIABLES	45
5.1 ANÁLISIS.....	45
5.2 CONCLUSIONES.....	46
6 CONCLUSIONES FINALES.....	47
7 Bibliografía	48
8 ANEXO I	49

PRÓLOGO

El presente trabajo está dividido en seis capítulos.

El primero consiste en una introducción a las materias primas utilizadas, las cubas electrolíticas donde se desarrolla el proceso y las operaciones involucradas, detallando cada etapa con énfasis en la operación de cambio de ánodos.

En el capítulo 2 se expone la motivación del trabajo final y se desarrolla experimentalmente el problema planteado, incluyendo las mediciones realizadas en sala y los análisis correspondientes.

El capítulo 3 presenta una problemática identificada durante el desarrollo del proyecto y una propuesta de mejora, basada en el recálculo de los límites de control mediante herramientas estadísticas y su posterior validación a partir de nuevas mediciones realizadas en sala.

En el Capítulo 4 se analizan los ahorros de tiempo logrados en las distintas tareas mediante un diagrama de Gantt, junto con los beneficios en seguridad que trae la incorporación del nuevo sistema de medición automatizado.

El capítulo 5 aborda un análisis de las variables directas que inciden en la medición anódica.

Finalmente, el capítulo 6 presenta las conclusiones alcanzadas a partir del desarrollo de este trabajo final.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MATERIAS PRIMAS

Alúmina

La alúmina es un material de color blanco tiza y de consistencia similar a la arena fina. La alúmina es una materia prima esencial para la producción de aluminio requiriéndose aproximadamente dos toneladas de alúmina para producir una tonelada de metal (The Aluminium Story (2023), Consulta: Mayo 2025).

La bauxita es la mena de aluminio más importante, pero sólo contiene entre un 30 y un 54 % de aluminio, siendo el resto una mezcla de sílice, óxidos de hierro y dióxido de titanio (Enciclopedia Química (2025), s.f.). El aluminio de la bauxita se encuentra normalmente formando hidróxidos – $\text{Al}(\text{OH})_3$ – u óxidos hidratados – $\text{AlO}(\text{OH})$ –. La industria emplea el proceso Bayer para producir alúmina a partir de la bauxita. El proceso de obtención de la alúmina se describe en la Figura 1.1 y se lo describe a continuación.

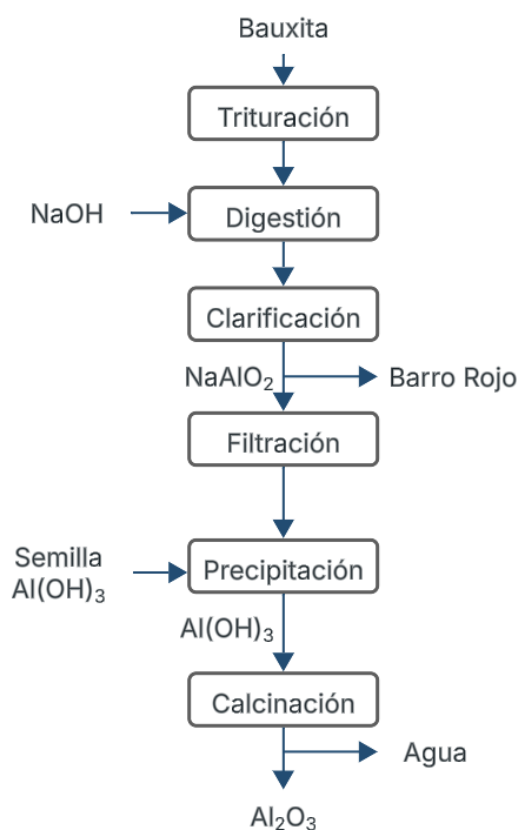


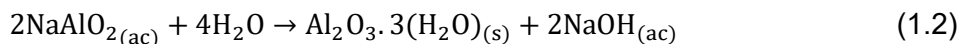
Figura 1.1 Proceso Bayer. Adaptación de la fuente (Grjotheim & Kvande, 1993)

La bauxita debe tratarse químicamente para producir alúmina. La primera etapa del proceso es la trituración de la bauxita, con el fin de reducir su tamaño y aumentar la superficie de contacto. La siguiente etapa es la digestión y se expresa mediante la Ecuación 1.1. La alúmina se separa de los óxidos insolubles mediante su disolución en una solución concentrada de hidróxido de sodio (NaOH), a altas temperaturas y presiones elevadas (cinéticamente, se favorece la disolución en una solución NaOH en estas condiciones), formando un licor de aluminato de sodio (J.P Sancho Martinez, 1994).

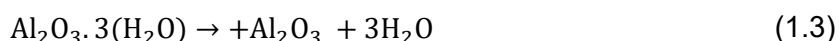


Los óxidos insolubles, que se denominan “barro rojo”, se separan del licor de aluminato sódico formado mediante clarificación. A continuación, el licor es filtrado para eliminar cualquier residuo sólido restante (J.P Sancho Martínez, 1994). El barro rojo es separado y tratado como un subproducto, mientras que el licor filtrado se destina a la siguiente etapa.

La etapa siguiente es la precipitación del aluminio de la solución. Comienza con el enfriamiento del licor de aluminato sódico y luego, para favorecer su precipitación, se utiliza una semilla de hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), siguiendo la Ecuación 1.2.



El hidrato que precipita siempre es trihidratado, independientemente como se encuentra el aluminio en la bauxita. El producto que precipita se lo denomina “bayerita”. Finalmente, una vez separada la bayerita, se seca y se calcina según la Ecuación 1.3.



Criolita

En el proceso Hall-Héroult, la criolita (Na_3AlF_6) cumple un rol esencial como componente del electrolito fundido en el cual se disuelve Al_2O_3 para llevar a cabo la electrólisis. Dado que la Al_2O_3 pura presenta un punto de fusión elevado, alrededor de 2070°C , el uso de Na_3AlF_6 permite reducir significativamente la temperatura operativa del sistema hasta aproximadamente 950°C , lo que disminuye el consumo energético y hace viable el proceso a escala industrial. Además de su función como disolvente, la Na_3AlF_6 proporciona un medio con buena conductividad iónica, necesaria para el transporte eficiente de iones durante la electrólisis, y contribuye a mantener la estabilidad físico-química del baño (Grjotheim & Kvande, 1993). La correcta formulación del baño electrolítico es determinante para garantizar la eficiencia del proceso y la calidad del aluminio obtenido.

Energía

La producción de aluminio primario requiere, además de Al_2O_3 , una altísima demanda de energía eléctrica, siendo este uno de los insumos críticos del proceso. La electrólisis de la Al_2O_3 , llevada a cabo mediante el proceso Hall-Héroult, consume grandes cantidades de electricidad, lo que convierte al suministro energético en un factor estratégico tanto desde el punto de vista técnico como económico. Por este motivo, asegurar un abastecimiento eléctrico confiable y sostenido es esencial para mantener la operación continua de las celdas electrolíticas. Las plantas suelen estar conectadas a redes eléctricas regionales e interconectadas a sistemas nacionales, permitiendo flexibilidad en el suministro. El proceso es altamente intensivo en energía eléctrica, representando entre un 30 y un 40 % del costo total de producción del aluminio (The Aluminium Story (2023), Consulta: Mayo 2025). Cualquier corte o inestabilidad en el suministro puede provocar solidificación del aluminio en las cubas, afectando gravemente la eficiencia del proceso y generando pérdidas significativas.

Ánodos

Características

En el proceso Hall-Héroult con ánodos precocidos, los ánodos se fabrican, moldean y calcinan previamente en una planta específica antes de ser instalados en las cubas. Los ánodos presentan dimensiones de 895 mm de largo, 858 mm de ancho y 605 mm de alto.

Los ánodos son una materia prima del proceso de obtención del aluminio. Los mismos están formados, principalmente, por una mezcla precocida de Brea (que actúa como aglutinante) y Coque del petróleo (material carbonoso, derivado del petróleo, con alta conductividad y baja reactividad) junto con una proporción de ánodos que fueron rechazados por parámetros de calidad por el sector de ánodos o de reducción (J.P Sancho Martínez, 1994).

Se requiere una infraestructura adicional para su fabricación y recambio continuo. En este sistema, los ánodos son fabricados y cocidos externamente antes de ser instalados en la celda, lo cual asegura una mayor uniformidad estructural, menor contenido de impurezas y propiedades eléctricas más estables (Grjotheim & Kvande, 1993). El circuito de los ánodos dentro de la planta puede observarse en la Figura 1.2 y se detalla su procedimiento en la Sección “Procedimiento” a continuación.

Procedimiento

El proceso comienza con la alimentación de coque a la molienda para reducir su tamaño, permitiendo una distribución granulométrica adecuada para mejorar la densidad del empaquetamiento. Para realizar la masa cruda y homogénea de los ánodos, se combinan el coque molido y la brea caliente en proporciones definidas, en la mezcladora. Esta mezcla se realiza a temperaturas elevadas para que la brea fluya correctamente entre las partículas de coque, dando como resultado una masa plástica y uniforme, fundamental para la conformación del ánodo (ALUAR SAIC, 2025).

Luego, la masa cruda se moldea en bloques mediante prensas hidráulicas, definiendo la geometría de los ánodos y asegurando una alta densidad y una baja porosidad. Posteriormente, se introducen en los hornos de cocción, donde son tratados térmicamente a temperaturas superiores a los 1100°C en atmósfera controlada. En esta etapa, la brea se carboniza, se eliminan los compuestos volátiles y se desarrollan las propiedades mecánicas y eléctricas del ánodo.

Una vez cocidos, cada ánodo es unido a una varilla metálica conductora, mediante el proceso de llamado “varillado”. Estas varillas permiten la conexión eléctrica entre el ánodo y el sistema de alimentación de corriente en la celda electrolítica. Finalmente, los ánodos ensamblados se instalan en las cubas electrolíticas, donde cumplen su función como electrodos consumibles en el proceso de electrólisis para la producción de aluminio (Grjotheim & Kvande, 1993). Tras esta etapa, los ánodos nuevos se destinan a las celdas electrolíticas donde se utilizan como electrodo consumible y a medida que éstos se consumen, se retiran y pueden ser descartados o parcialmente reciclados, dependiendo del estado y de los criterios de calidad de la planta.

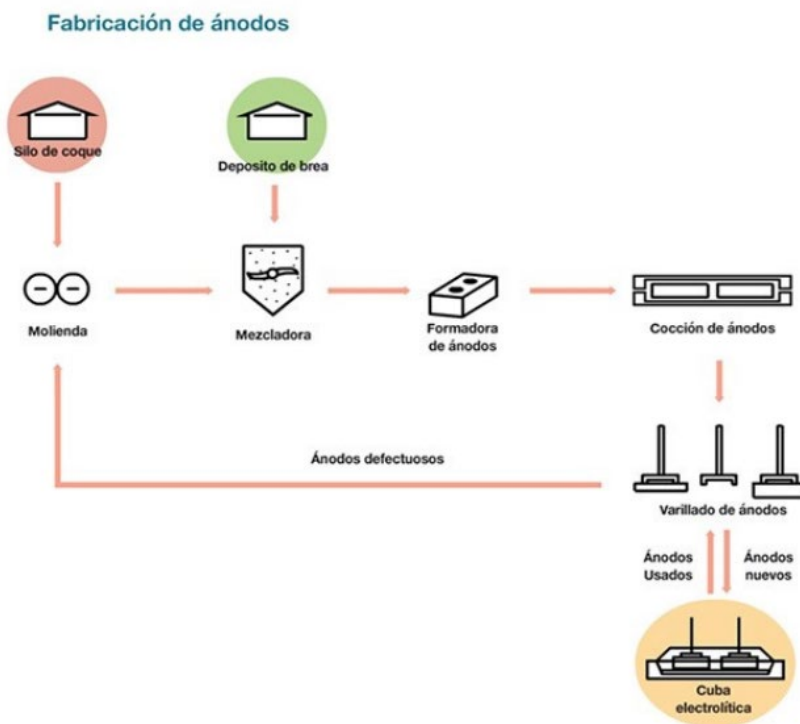


Figura 1.2 Circuito de los ánodos. Fuente: (ALUAR SAIC, 2025)

1.2 PRODUCTO

Aluminio

Descripción

El aluminio es un metal no ferroso ligero, de color plateado y alta ductilidad, que posee una serie de propiedades físicas, químicas y mecánicas que lo hacen altamente versátil para diversas aplicaciones industriales. El aluminio es químicamente reactivo, pero se protege naturalmente gracias a una delgada capa de óxido que lo hace resistente a la corrosión, incluso en ambientes húmedos o ligeramente ácidos. No es inflamable, no es magnético y reacciona con bases fuertes formando aluminatos. Mecánicamente, el aluminio puro es blando y con baja resistencia, pero al alearlo con metales (como Cu, Mg, Zn o Si) mejora notablemente su dureza, resistencia y capacidad estructural, adaptándose a múltiples usos industriales.

Los usos del aluminio son diversos. En la industria del transporte, se utiliza ampliamente en vehículos como automóviles, aviones y trenes debido a su ligereza y resistencia. En la construcción, se emplea para ventanas, puertas, estructuras ligeras y materiales de recubrimiento gracias a su resistencia a la corrosión. En la electrónica, se usa para fabricar sustratos, cables y componentes electrónicos debido a su alta conductividad eléctrica. Además, en la industria de envases, se usa para producir latas de bebidas y empaques debido a sus propiedades de barrera, ligereza y durabilidad. También es clave en la industria energética, donde se utiliza en componentes de generación de energía y distribución eléctrica (J.P Sancho Martinez, 1994).

Proceso de obtención: Método Hall-Hérout

Historia

Antes de este nuevo método, la única manera de obtener el metal era mediante la compleja y costosa reacción del sodio metálico con cloruro de aluminio. Sin embargo, se necesitaban métodos económicos para extraer el aluminio de sus abundantes minerales (Production of aluminum: The Hall-Hérout process). A finales del siglo XIX, el estadounidense Hall y el francés Hérout desarrollaron por separado un proceso comercialmente viable para la extracción de aluminio a partir de Al_2O_3 . El proceso Hall-Hérout redujo el precio del aluminio 200 veces y transformó esta rareza en un producto básico (Paul Hérout and Charles Hall – Turning a rarity into a commodity., Consulta: Mayo 2025). Ambos descubrieron, con pequeñas diferencias en los procesos, que, al pasar una corriente eléctrica a través de una solución de alúmina disuelta en criolita fundida, se podía descomponer la alúmina en aluminio y oxígeno.

Método

El proceso Hall-Hérout constituye la etapa electrolítica en la producción de aluminio metálico. El Al_2O_3 , previamente obtenido mediante el proceso Bayer, se disuelve en un baño fundido de Na_3AlF_6 y, al hacer pasar corriente eléctrica, se reduce a aluminio metálico, que se deposita en el fondo de la celda (J.P Sancho Martinez, 1994).

En condiciones industriales, el electrolito se compone mayoritariamente de criolita (80–90 %), con un contenido de alúmina del 5–10 %, y suele incluir aditivos (CaF_2 ; AlF_3 ; NaF) para optimizar propiedades como la densidad, la viscosidad, temperatura de operación y la tensión superficial (Grjotheim & Kvande, 1993).

La alúmina, obtenida previamente por el proceso Bayer, se introduce de forma dosificada (alimentadores en la parte superior) en el electrolito fundido. La concentración de alúmina en el baño debe mantenerse dentro de un rango óptimo (usualmente 2–4 %) para evitar problemas operativos, detallado en la Sección 1.3 “Control de la Alimentación” (J.P Sancho Martinez, 1994).

Una vez disuelta en el baño, la alúmina se descompone por medio de una corriente continua de alta intensidad. El revestimiento de carbono del fondo de la celda actúa como cátodo, mientras que los ánodos, de carbono consumibles (ubicados en la parte superior), sirven como electrodos positivos (Grjotheim & Kvande, 1993). La reacción global es la de la Ecuación 1.4.

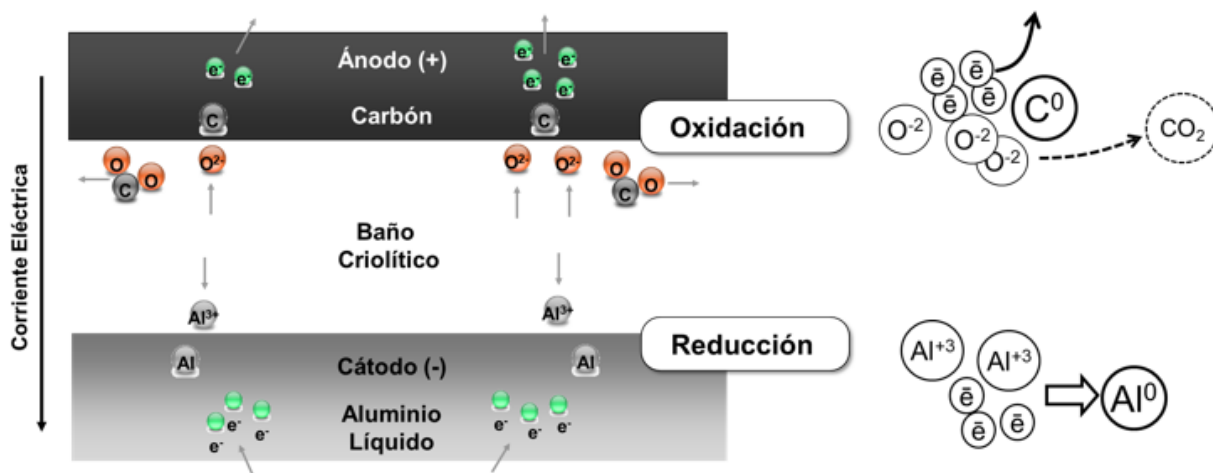
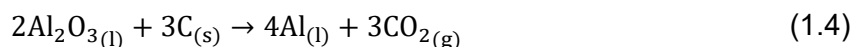
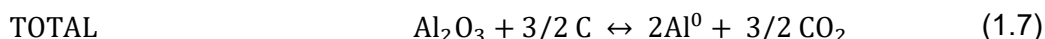
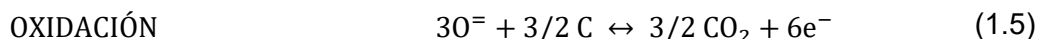


Figura 1.3 Representación esquemática de los procesos de oxidación y reducción que ocurren durante la electrólisis del Al_2O_3 disuelto en Na_3AlF_6 . Fuente: (ALUAR SAIC, 2025)

Se puede observar en la Figura 1.3 que, en el cátodo, los Al^{3+} se reducen y forman Al^0 líquido, que se acumula en el fondo de la celda. Además, los O^{2-} se oxidan, formando CO_2 , que se liberan al interior de la celda, lo que conlleva el consumo gradual del ánodo, que deben ser reemplazados periódicamente (Grjotheim & Kvande, 1993). Las Ecuaciones 1.5, 1.6 y 1.7 son las hemi-reacciones de oxidación, reducción y la reacción total de esta etapa, respectivamente.



El proceso requiere un monitoreo continuo de la concentración de alúmina, temperatura, voltaje, corriente y otros parámetros. Los ánodos de carbono se consumen a medida que reaccionan y deben ser reemplazados regularmente. La vida útil de una celda depende del estado del revestimiento catódico, el cual debe mantenerse intacto para evitar pérdidas de eficiencia, cortocircuitos o contaminación del aluminio con fluoruro o carbono (J.P Sancho Martinez, 1994).

Productos Elaborados

Luego de la obtención del aluminio líquido, el metal fundido es extraído de las celdas electrolíticas y transferido mediante cucharas, térmicamente aisladas, hacia las áreas de colada y moldeo de la planta. En este punto, el aluminio puede ser sometido a procesos de refinado, donde se eliminan impurezas residuales mediante técnicas como la inyección de gases inertes (generalmente Ar o Cl_2) y la eliminación de escorias. Una vez refinado, el aluminio se procesa en diferentes líneas de producción, dependiendo del producto final deseado (J.P Sancho Martinez, 1994).

En plantas de producción primaria de gran escala, como la que se encuentra en el sur de Argentina, se elaboran distintos productos semielaborados que se destinan a la industria

automotriz, de la construcción, eléctrica, de envases y otras aplicaciones industriales (ALUAR SAIC, 2023-2024). Entre los principales productos que se obtienen se destacan los *lingotes* de aleación (Figura 1.4-i), que se vierten en moldes de colada directa y luego se solidifican, se cortan y se apilan para su posterior distribución. También se fabrican *barrotes* (Figura 1.4-ii), que luego se utilizan como materia prima para procesos de extrusión. Otro producto clave es el *alambrón* (Figura 1.4-iii), obtenido mediante colada continua y laminación en caliente, destinado principalmente a la fabricación de conductores eléctricos.

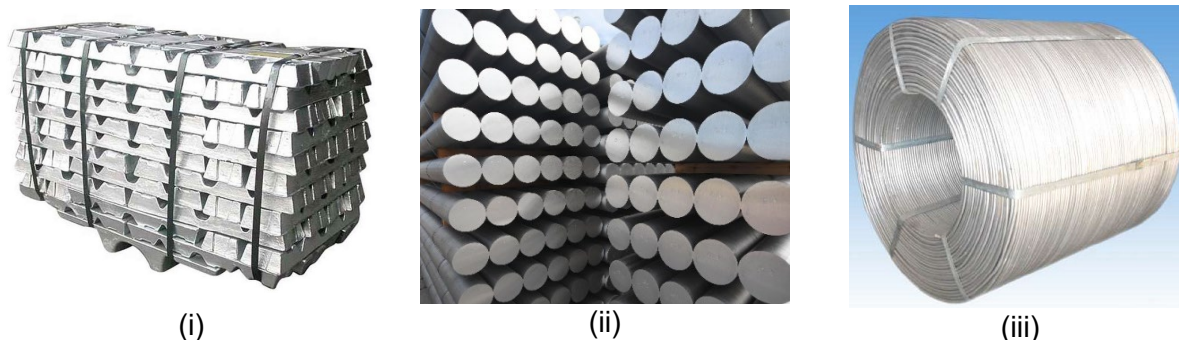


Figura 1.4 Productos Elaborados: i) Lingote; ii) Barrote; iii) Alambrón. Fuente: (ALUAR SAIC, 2025)

1.3 CELDAS ELECTROLÍTICAS

Características

Las celdas electrolíticas que operan con ánodos precocidos presentan un diseño optimizado que permite un mayor control del proceso, una reducción en las emisiones de gases fluorados y partículas, y una mayor vida útil de los ánodos. Estas características contribuyen a disminuir costos y mejorar el desempeño ambiental del proceso. La configuración con ánodos precocidos reduce el consumo específico de carbono, mejora la eficiencia de corriente y minimiza la ocurrencia de condiciones operativas no deseadas que afectan la estabilidad de la cuba (Grjotheim & Kvande, 1993). Además, permite una captación más eficiente de los gases generados durante la electrólisis, permitiendo su tratamiento en una etapa posterior, y reduciendo significativamente el impacto ambiental.

Desde el punto de vista industrial, esta tecnología posibilita la automatización de tareas críticas como la alimentación de alúmina, disminuye los costos de mantenimiento y prolonga la vida útil de los componentes de la celda (Grjotheim & Kvande, 1993). En plantas de gran escala, este enfoque permite alcanzar elevados niveles de eficiencia operativa y energética, cumpliendo con normativas ambientales cada vez más estrictas (ALUAR SAIC, 2023-2024).

En la Figura 1.5 se muestra un esquema con corte transversal de una cuba, que permite identificar con mayor claridad sus componentes. Cada celda posee una numeración única, y tanto los ánodos como los cátodos están numerados de manera individual, siguiendo una secuencia estandarizada.

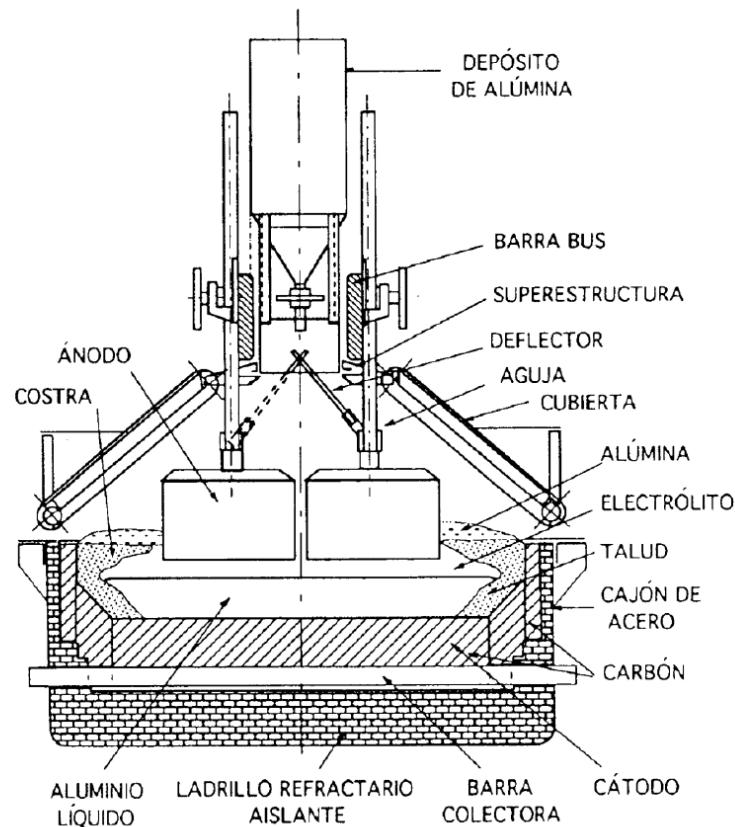


Figura 1.5 Corte transversal de una cuba con ánodos precocidos. Fuente: (J.P Sancho Martinez, 1994).

Corriente

Circulación de la corriente

La corriente eléctrica que alimenta cada celda ingresa desde la cuba anterior, según se muestra en la Figura 1.6. Las flechas que suben hacia las varillas se conectan en la travesa, estructura metálica que sirve de soporte y conexión eléctrica para las varillas anódicas y luego la corriente continua hacia la siguiente cuba.

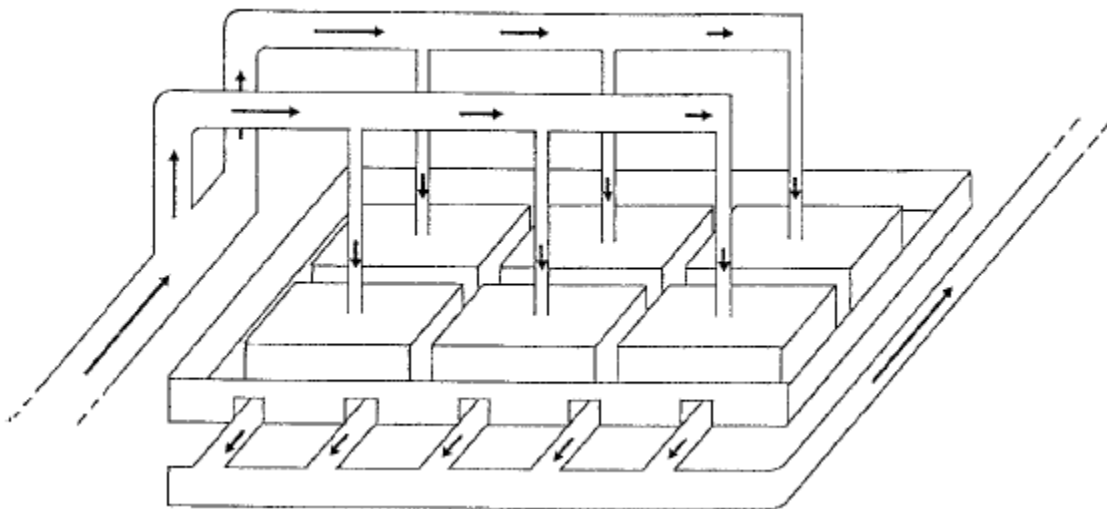


Figura 1.6 Esquema del ingreso de corriente a las celdas. Fuente: (B. J Welch y co-autores, 2001)

La Figura 1.7 muestra un esquema general de una caba, detallando los puntos donde se generan resistencias internas al paso de la corriente. La corriente fluye desde la travesa (1) hacia las varillas (2), que a su vez están unidas mecánica y eléctricamente a los bloques de ánodo de carbono mediante las patas (3). Desde los ánodos (4), la corriente atraviesa el baño electrolítico de criolita fundida (5) y la capa de aluminio líquido (6), pasando luego al sistema catódico compuesto por bloques de cátodo de carbono (7). Finalmente, la corriente sale de la caba a través de las barras colectoras (8), que la derivan hacia la siguiente celda o la dirigen hacia el sistema de retorno, cerrando así el circuito eléctrico de todo el conjunto (ALUAR SAIC, 2025). Así, cada uno de esos contactos genera una resistencia al paso de la corriente dentro de la caba.

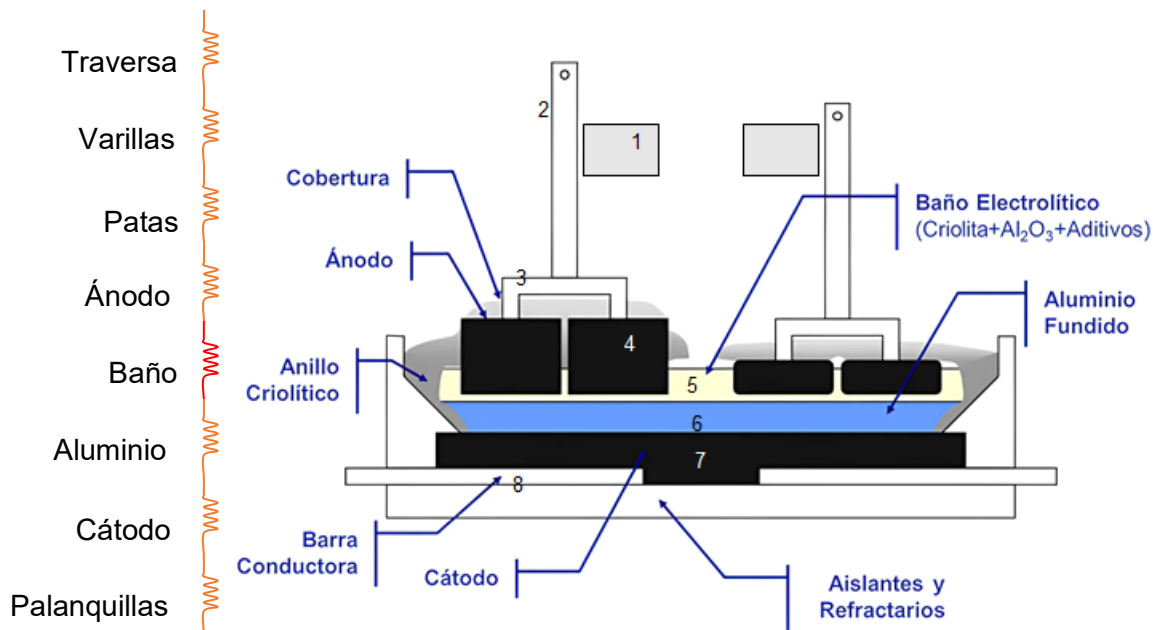


Figura 1.7 Esquema de una caba junto con las resistencias al paso de la corriente. Fuente: (ALUAR SAIC, 2025)

En el diseño en serie típico de las salas de electrólisis, conocido como “*side by side*” (lado a lado), la corriente circula a lo largo de una fila de cubas, de izquierda a derecha. Al llegar al final de la línea, retorna por una conexión para continuar por la fila de cubas que se encuentra al frente, en sentido opuesto, asegurando un flujo continuo a lo largo de toda la sala. La Figura 1.8 muestra este recorrido en vista de arriba de la sala.

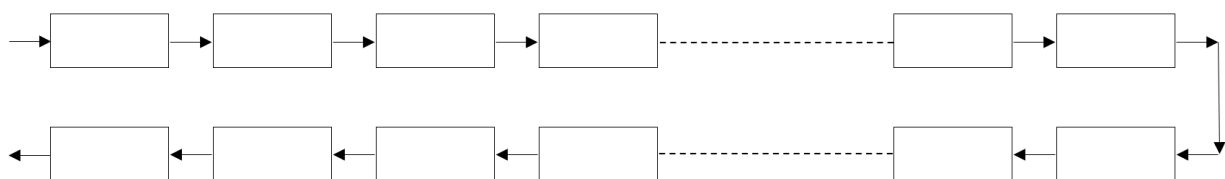


Figura 1.8 Circulación de la corriente “*side by side*”

Principio Fundamental

La Ley de Ohm (Ecuación 1.8) es un principio fundamental de la electricidad que describe la relación lineal entre la diferencia de potencial (V [voltios]), la corriente eléctrica (I [amperio]) y la resistencia eléctrica (R [ohmio]) en un conductor.

$$V = I * R \quad (1.8)$$

En sistemas industriales como las celdas electrolíticas para la producción de aluminio, esta relación permite diagnosticar el estado de los contactos eléctricos y detectar anomalías en la

caída de tensión, asociadas a resistencias elevadas provocadas por desgaste, suciedad o fallas en el montaje (J.P Sancho Martinez, 1994). Así, la Ley de Ohm se constituye una herramienta esencial para el control y diagnóstico de las condiciones operativas en procesos electroquímicos.

La medición anódica puede comprenderse como un componente específico y representativo de la resistencia total que ofrece la celda electrolítica al paso de la corriente eléctrica. En particular, esta medición refleja principalmente la resistencia de contacto entre el ánodo y la varilla conductora. Esta medición de caída de tensión localizada permite obtener información sobre las condiciones particulares del ánodo (como desgaste, mala conexión o acumulación de residuos), que no siempre se evidencian en los parámetros eléctricos globales como el voltaje de marcha o la corriente de celda, los cuales tienden a mantenerse regulados (J.P Sancho Martinez, 1994). Por ello, la medición anódica constituye una herramienta clave para el diagnóstico preciso del rendimiento individual de los ánodos dentro del sistema.

Por ello, en el Capítulo 5 se desarrolla un análisis específico de la relación entre las variables definidas por la Ley de Ohm, utilizando los datos de medición anódica, voltaje de marcha y corriente. El objetivo es identificar posibles correlaciones o patrones que permitan mejorar la interpretación de las condiciones de operación de las celdas y la gestión de mantenimiento del sistema anódico.

Alimentación

Control de la alimentación

La alimentación de alúmina y fluoruro en las cubas se realiza mediante sistemas automatizados que garantizan una dosificación precisa, continua y adaptada a las condiciones del proceso (J.P Sancho Martinez, 1994). Las cubas están equipadas con orificios de alimentación distribuidos entre los ánodos, por donde se inyecta el material utilizando mecanismos neumáticos. En la Figura 1.9 se presenta un esquema representativo del sistema de alimentación. Este diseño favorece una distribución uniforme del material en el baño, facilitando su disolución y reduciendo la formación de costras superficiales, las cuales afectan la eficiencia del proceso.



Figura 1.9 Esquema de la alimentación de la cuba. Fuente: Planta de Producción de Aluminio.

La relación entre la alimentación de alúmina y la resistencia eléctrica de la cuba es directa y crítica, por lo que requiere un control preciso. Una concentración insuficiente de alúmina en el baño incrementa su resistividad eléctrica al disminuir la disponibilidad de iones para el transporte de corriente. Esto se traduce en un aumento de la caída de tensión, un mayor consumo de energía específica y un incremento en la formación de gases contaminantes. Esta condición puede derivar en la aparición del denominado “efecto anódico”, comprometiendo la estabilidad del proceso (J.P Sancho Martinez, 1994). Por el contrario, una alimentación excesiva o mal distribuida puede generar sobresaturación, dificultar la disolución de alúmina y provocar precipitados en el fondo de la cuba, afectando también la resistencia del sistema.

En la Figura 1.10 se muestra la relación entre la resistencia eléctrica y el porcentaje de alúmina disuelta en el baño electrolítico, dividida en cuatro zonas diferenciadas. Esta representación permite visualizar cómo varía la resistencia en función de la concentración de alúmina, información clave para definir condiciones óptimas de operación.

En la zona 1 se observa un aumento pronunciado de la resistencia ante pequeñas disminuciones en la concentración de alúmina, lo que puede afectar significativamente la estabilidad operativa de la celda. Este comportamiento se asocia con una baja disponibilidad de alimentación de alúmina, incrementando el riesgo de la aparición del efecto anódico, y, por lo tanto, genera condiciones favorables para que se produzca la reacción inversa a la Ecuación 1.7 (formación de alúmina a partir del aluminio que hay en la celda) o aumento del voltaje de celda.

En la zona 2, la resistencia presenta un comportamiento más estable y menos sensible a las variaciones en la concentración. Esta franja se considera óptima para la operación, ya que asegura buena conductividad sin riesgos de deficiencia ni sobresaturación, lo que favorece la estabilidad del sistema.

La zona 3 se caracteriza por un valor mínimo de resistencia, que se mantiene prácticamente constante, indicando una baja sensibilidad del sistema en esta región.

Finalmente, en la zona 4 comienza a observarse un nuevo incremento en la resistencia ante concentraciones elevadas de alúmina, aunque con menor sensibilidad.

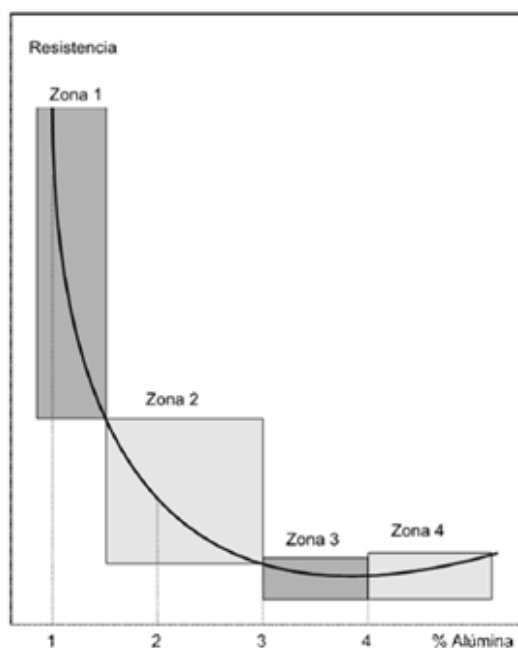


Figura 1.10 Gráfica Resistencia en función del % alúmina. Gráfica que explica la zona de trabajo del control de la alimentación. Fuente: (ALUAR SAIC, 2025)

El control de la alimentación se basa en generar variaciones controladas de la concentración de alúmina, estimando la resistencia de la cuba a partir de las mediciones de V e I , y calculando la pendiente de la resistencia en función del tiempo (dR/dt) (ALUAR SAIC, 2025). Cuando la concentración desciende por debajo de cierto umbral, se activa automáticamente un nuevo pulso de alimentación para reponer el material, evitando la aparición del efecto anódico, una condición indeseada que reduce la eficiencia de la celda y genera emisiones contaminantes.

Este mecanismo opera de forma cíclica: una vez alimentada la cuba, la alúmina se consume progresivamente hasta alcanzar nuevamente un valor crítico, momento en el cual se repite el ciclo de alimentación. Este comportamiento se puede observar en la Figura 1.11, donde se representa gráficamente el patrón de funcionamiento del sistema, secuencia de pulsos que caracterizan la lógica de control del proceso. Este ciclo repetitivo asegura un suministro medio constante de material reactivo, manteniendo la celda dentro de parámetros operativos óptimos.

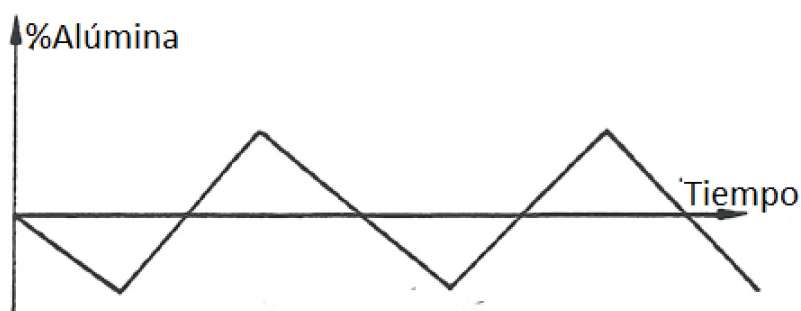


Figura 1.11 Ciclo del control de alimentación en una cuba. Fuentes: (Grjotheim & Kvande, 1993)

La resistencia eléctrica se calcula mediante la Ecuación 1.9:

$$R = \frac{(V - V_D)}{I} \quad (1.9)$$

Donde:

- V_D es el voltaje de descomposición (1,65 V) (Grjotheim & Kvande, 1993)
- V es el voltaje de marcha
- I es la corriente

Por todo lo anterior, el control preciso de la alimentación no solo garantiza una concentración adecuada de alúmina disuelta, sino que también permite operar con una menor resistencia de celda, optimizando el consumo energético, minimizando las emisiones y prolongando la vida útil de los componentes de la cuba.

1.4 OPERACIONES

Colada

La operación de colada del aluminio líquido permite la extracción del metal producido en las cubas sin interrumpir su funcionamiento continuo. Este procedimiento asegura la continuidad del proceso, una adecuada calidad metalúrgica del producto y la estabilidad térmica e hidrodinámica dentro de la celda. La correcta ejecución de la colada impacta directamente sobre la eficiencia general del sistema de electrólisis y en la integridad del aluminio obtenido.

Esta extracción del metal se realiza mediante un sistema de vacío, que emplea un tubo de colada diseñado para resistir las condiciones térmicas y químicas del medio. Este tubo se introduce cuidadosamente hasta el fondo de la cuba, en contacto directo con el aluminio líquido. Al aplicar vacío, se genera una diferencia de presión que posibilita el ascenso del

metal fundido hacia una cuchara de colada suspendida por un puente grúa. La cuchara se encuentra térmicamente aislada con el fin de conservar la temperatura del aluminio durante su transporte hacia el sector de solidificación, evitando pérdidas térmicas significativas y reacciones no deseadas.

La operación se realiza de manera controlada, evitando turbulencias que puedan provocar el arrastre de impurezas del baño electrolítico o escorias superficiales. La Figura 1.12 muestra la cuchara en suspensión por el puente grúa, en la sala en el momento de la operación.

Posteriormente, se traslada a hornos de refinación, donde se eliminan impurezas y si es necesario, se ajusta la composición química antes de su colado en productos semielaborados según las exigencias del cliente (ALUAR SAIC, 2025).



Figura 1.12 Operación de Colada. Se pueden observar las cucharas. Fuente: Planta de Producción de Aluminio.

Proceso

Esta operación en una planta de electrólisis de aluminio es fundamental para garantizar la estabilidad operativa de las cubas electrolíticas y la calidad del producto final. En esta fase, se realiza un seguimiento sistemático de distintas variables de proceso y se ejecutan muestreos y mediciones regulares que permiten conocer el estado térmico, químico y electroquímico de cada celda. La Figura 1.13 muestra el equipo que utiliza el operador para la realización de esta operación.



Figura 1.13 Herramientas para la operación de Proceso. Fuente: Planta de Producción de Aluminio

Cambio de Ánodos

Debido a que los ánodos de carbono se consumen progresivamente por la reacción de oxidación (la cual libera oxígeno en el ánodo y forma dióxido de carbono) es necesario reemplazarlos antes de que su desgaste afecte la eficiencia eléctrica y para la estabilidad de la cuba.

Cada cuba posee 16 ánodos dispuestos de modo tal que respetan el plano anódico, es decir, la superficie inferior de todos los ánodos se encuentra alineada a un mismo nivel dentro de la cuba (J.P Sancho Martinez, 1994). Este aspecto resulta fundamental al momento de realizar la medición del ánodo usado, ya que, si su superficie inferior queda por debajo del plano anódico, la corriente tenderá a circular por el camino de menor resistencia, dirigiéndose hacia aquel ánodo más cercano al metal líquido. Esta desviación genera una distribución no uniforme de la corriente, lo cual puede provocar un desgaste desigual de los ánodos e inestabilidad eléctrica en la cuba.

Cada ánodo tiene una vida útil de aproximadamente 72 turnos (equivalente a unos 24 días dentro de la cuba). Sin embargo, el proceso de recambio es continuo: se reemplaza un ánodo por cuba cada 32 horas, lo que significa que en cada ciclo de cambio se sustituye un ánodo diferente de los múltiples que componen la celda. Esta operación es realizada por un operador, que maneja el puente grúa con un control remoto y asistido por un ayudante, que realiza otro tipo de tareas.

El procedimiento manual (CALIBRE) puede describirse en las siguientes etapas:

1. Preparación de materiales: Junto a la cuba se posiciona una bandeja porta-ánodo que contiene el ánodo nuevo y un espacio reservado para alojar el resto (ánodo a retirar). Además, se ubica un recipiente adicional para depositar los residuos sólidos extraídos durante el proceso.
2. Picado de costra: Se utiliza una herramienta conocida como picador para romper la costra solidificada que rodea al resto. Esta operación se realiza con el objetivo de liberar el resto para su posterior extracción, ya que la costra impide su remoción directa. La costra está formada por materiales solidificados del baño y cumple una función de aislamiento térmico y protección frente a la oxidación, pero debe ser removida cuidadosamente.
3. Desconexión eléctrica: Se procede a desatornillar el morseto que une la varilla del resto con la travesa, interrumpiendo temporalmente el circuito eléctrico de esa posición.
4. Medición y referencia: Se mide la altura del resto dentro de la cuba utilizando un CALIBRE (Figura 1.14-i), y esa misma referencia se transfiere al ánodo nuevo. Esta operación es fundamental para garantizar que el nuevo ánodo quede correctamente posicionado, respetando el plano anódico de los demás ánodos, dentro del baño electrolítico (Figura 1.14-ii), manteniendo así la estabilidad del proceso.
5. Extracción del resto: El resto es retirado cuidadosamente con el puente grúa y colocado en la bandeja porta-ánodo en el espacio asignado, asegurando su disposición segura y ordenada para su posterior traslado.
6. Limpieza del baño: Utilizando una herramienta denominada almeja, se remueven cuidadosamente residuos sólidos del baño, especialmente restos de carbonilla y posibles fragmentos de costra. Esta limpieza es esencial para evitar que estos materiales floten o se acumulen, ya que podrían generar inestabilidades térmicas o eléctricas en la cuba, como desvíos en el nivel del baño o alteraciones en la distribución de corriente.
7. Instalación del ánodo nuevo: El ánodo nuevo se introduce con precisión en la cuba mediante el puente grúa, posicionándolo según la medida tomada previamente, lo que garantiza una correcta profundidad de inmersión y una buena continuidad eléctrica. (Figura 1.14-iii).

8. Reconexión eléctrica: Finalmente, se fija el morseto que une la varilla del ánodo nuevo con la travesa, restableciendo el circuito eléctrico y completando así el proceso de cambio.

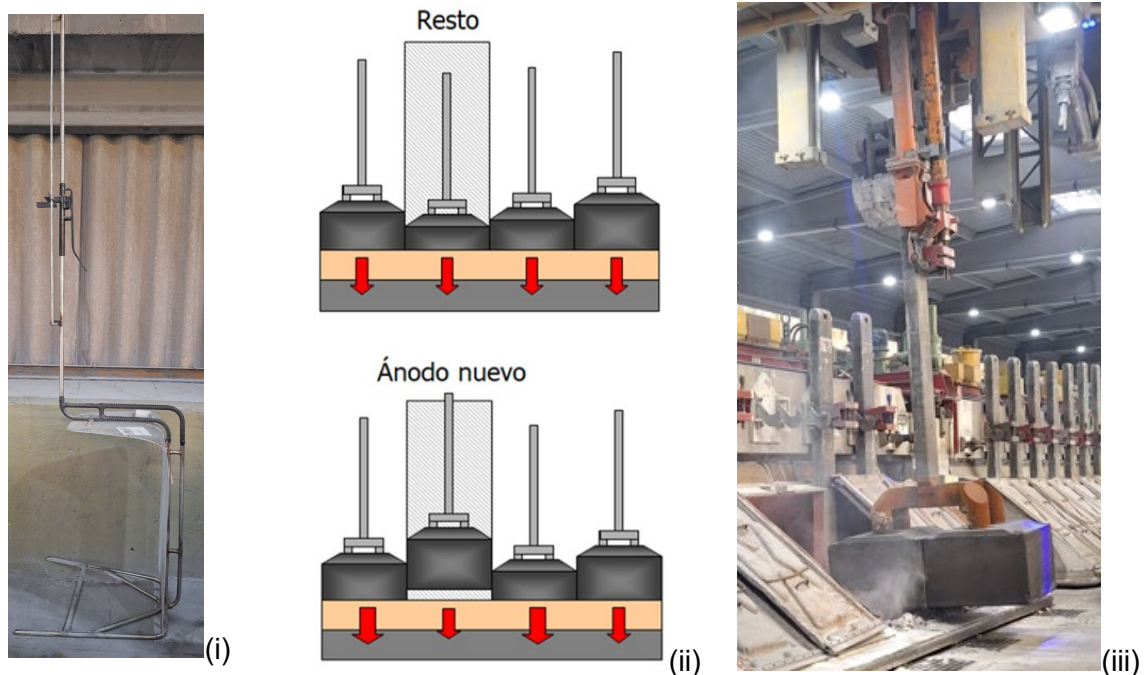


Figura 1.14 Operación Cambio de Ánodos: i) CALIBRE; ii) Esquema posicionamiento; iii) Ánodo nuevo por ingresar a la cuba. Referencia: Planta de Producción de Aluminio.

Cobertura

Luego de realizar el cambio de ánodos, se procede a la fase de cobertura. En esta etapa, un camión con alúmina recorre las salas para llegar a las cubas y realizar la cobertura en las posiciones donde se ha reemplazado el ánodo.

La principal función de esta cobertura es evitar que el ánodo de carbono entre en contacto con el aire, lo que podría provocar su oxidación y generar un consumo adicional de carbono. Además, la capa de cobertura contribuye al mantenimiento del equilibrio térmico dentro de la cuba, al funcionar como aislante térmico (J.P Sancho Martinez, 1994). Es importante que la capa no sea ni demasiado fina, para evitar que no cumpla su función protectora, ni demasiado gruesa, para evitar restricciones en la transferencia de calor dentro de la cuba. El objetivo es lograr una capa óptima que garantice la conservación del ánodo y el correcto desempeño de la cuba.

1.5 OBJETIVOS

El control de la carga anódica es fundamental para garantizar la eficiencia y estabilidad del proceso de electrólisis en la producción de aluminio. Evaluar la curva de carga anódica permite monitorear el desgaste uniforme de los ánodos y la distribución adecuada de la corriente eléctrica dentro de las cubas, aspectos claves para mantener la continuidad y calidad del proceso.

Este trabajo se centra en comparar y validar el comportamiento de la curva de carga utilizando dos métodos: CALIBRE y DIANA. A través de muestreos sistemáticos, análisis estadísticos y comparación de resultados, se busca determinar la precisión, estabilidad y reproducibilidad del sistema DIANA, contribuyendo así a optimizar el control y operación de las cubas electrolíticas.

2 ANÁLISIS COMPARATIVO

2.1 SITUACIÓN ACTUAL

Luego de entender las fases del proceso de producción del aluminio, se buscó reducir la exposición del operador ayudante, que realiza la medición del resto que se retira de la cuba, el cual se encuentra caliente (recién salido de la cuba a 970°C) y en suspensión (porque al cambio se lo realiza con un puente grúa), explicado en la sección 1.4, en el Cambio de Ánodos, en los pasos 4 y 5. Para ello se implementó, en el puente grúa, un sistema automatizado para realizar medición del resto y trasladarla al ánodo nuevo, llamado “DIANA” (Dispositivo Integral Automático Nivelador de Ánodos). Este sistema permite relevar la posición del resto mediante sensores y algoritmos de control previamente programados, reduciendo el contacto del operador con el ánodo caliente. Con esta modificación, los pasos descritos en la sección 1.4 - Cambio de Ánodos son los mismos excepto el paso de la medición, nombrado “Medición y referencia”, en el que se reemplaza la utilización del CALIBRE por la medición desde el puente grúa: DIANA.

El sistema DIANA es programado e instalado por el personal de planta, en la computadora del puente grúa, y se opera mediante su control remoto. Este sistema vino incorporado originalmente, de fábrica, en los puentes grúa del otro grupo de cubas, correspondientes a una tecnología más moderna. Allí fue analizado durante su operación y a partir de los resultados obtenidos, se propuso su implementación en los puentes grúa de la tecnología anterior.

Esta medición es clave en esta tarea para determinar la altura exacta a la que debería colocarse el nuevo ánodo dentro de la cuba, garantizando así que el contacto eléctrico y las condiciones de operación se mantuvieran dentro de los parámetros deseados. Esta evolución tecnológica reemplaza el paso manual de medición (CALIBRE) por una operación más segura, eficiente y estandarizada (DIANA), reduciendo los errores de medición por fatiga del operador o condiciones adversas del entorno, como la presencia de polvo, calor o movimiento. Además, al eliminar la variabilidad humana, se mejora la estabilidad del sistema electrolítico al asegurar una colocación uniforme de los ánodos, lo cual incide directamente en la calidad del proceso y la vida útil de los componentes involucrados. Esta mejora forma parte de un proceso más amplio de modernización y digitalización de operaciones críticas dentro de la planta de producción de aluminio.

2.2 DEFINICIÓN DEL PROYECTO

Con el objetivo de validar el correcto funcionamiento del nuevo sistema automatizado de cambio de ánodos (DIANA), se llevó a cabo un estudio comparativo entre dicho método y el procedimiento manual utilizado (CALIBRE). Para ello, se realizaron mediciones anódicas en distintas cubas en cuyas posiciones se habían recibido nuevos ánodos durante el último turno operativo, registrando datos durante cuatro días consecutivos. Estas mediciones permitieron analizar la evolución de la curva de carga del ánodo y el comportamiento del proceso en las primeras etapas de su funcionamiento.

Además, se utilizó información proveniente de la base de datos de la planta para evaluar y comparar el desempeño de ambos métodos de operación. A partir de este análisis se buscó confirmar que el sistema DIANA cumple con los mismos criterios técnicos que el método CALIBRE, garantizando así la continuidad y estabilidad del proceso electrolítico.

Durante el análisis comparativo, también se realizó un estudio preliminar de la relación entre diversas variables operativas del proceso (como la corriente eléctrica, el voltaje de marcha y los indicadores de inestabilidad) con las mediciones anódicas registradas. Este análisis permitió explorar posibles correlaciones entre el comportamiento del ánodo recientemente

instalado y las condiciones de operación de la cuba, con el objetivo de identificar patrones que pudieran anticipar desvíos en el desempeño electroquímico o estructural del sistema.

Posteriormente, durante el análisis comparativo, surgió la posibilidad de recalcular los límites de control utilizando herramientas estadísticas, con el fin de ajustar los valores de referencia a las condiciones actuales del proceso y mejorar la sensibilidad del sistema ante posibles desvíos.

2.3 ORGANIZACIÓN

Con el objetivo de planificar y distribuir de manera eficiente las tareas durante el desarrollo del estudio, se elaboró un diagrama de Gantt (Figura 2.1), que refleja la planificación detallada y la ejecución del trabajo en la sala a lo largo de ocho semanas, organizando las actividades por tipo, duración y horario dentro de cada día laboral, de lunes a viernes, en un horario comprendido entre las 8:00 y las 17:00 horas. Este cronograma permitió establecer prioridades, coordinar recursos y asegurar el cumplimiento de los plazos establecidos.

El diagrama de Gantt también permitió coordinar entre las distintas fases operativas que se encontraban las salas de electrólisis durante el período de medición para planificar la toma de datos en el turno mañana y tarde, abarcando así una mayor diversidad de condiciones de operación y posibles variaciones del proceso. Cada fila representa una tarea específica dentro de una semana temática, como inducción, prueba, toma de mediciones, análisis y validación. Las columnas horarias corresponden a bloques de una hora para cada día hábil, y las celdas coloreadas indican los horarios en los que se llevó a cabo cada tarea. Los colores diferencian la naturaleza de las actividades y muestran la secuencia lógica del trabajo. Este diagrama evidencia una planificación equilibrada y un desarrollo sistemático del trabajo, facilitando la trazabilidad y el control de las actividades, lo cual es fundamental para asegurar la rigurosidad metodológica del estudio.

En el diagrama de Gantt presentado, las denominaciones “Toma 1” y “Toma 2” hacen referencia al momento de la semana en que se iniciaron las mediciones. La Toma 1 corresponde a la serie de mediciones iniciada el día lunes, mientras que la Toma 2 se refiere a aquellas comenzadas el día martes.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo las mediciones requeridas en este proyecto, fue necesario utilizar ciertos instrumentos y recursos.

El equipamiento utilizado para realizar las mediciones se muestra en la Figura 2.2 y es el siguiente: Pinche anódico y Multímetro digital Fluke 175 True-RMS.



Figura 2.2 Herramientas utilizadas para las mediciones (izquierda: pinche anódico; derecha: Multímetro)

2.5 MEDICIONES

Mediciones de prueba

El objetivo de esta etapa fue el aprendizaje del método de medición y la determinación del período de tiempo, más adecuado, para llevarlas a cabo posteriormente. Por este motivo, se llevaron a cabo de forma previa a la realización sistemática de las mediciones.

Para ello, se seleccionó aleatoriamente un conjunto de cubas en las que se había efectuado el cambio de ánodo durante el turno correspondiente. Sobre estas cubas, se realizaron mediciones anódicas a las 8:00, 12:00 y 16:00 horas durante cuatro días consecutivos. Los valores obtenidos fueron registrados en una planilla y utilizados posteriormente para la elaboración del gráfico de dispersión con una línea de tendencia de medias, que permite visualizar el comportamiento general de las mediciones en el período analizado (Figura 2.3).

A partir de los resultados obtenidos, y en concordancia con resultados de investigaciones previas en la planta sobre el tema, se determinó que el período más adecuado para realizar las mediciones y comparar ambos métodos es cada 24 horas.

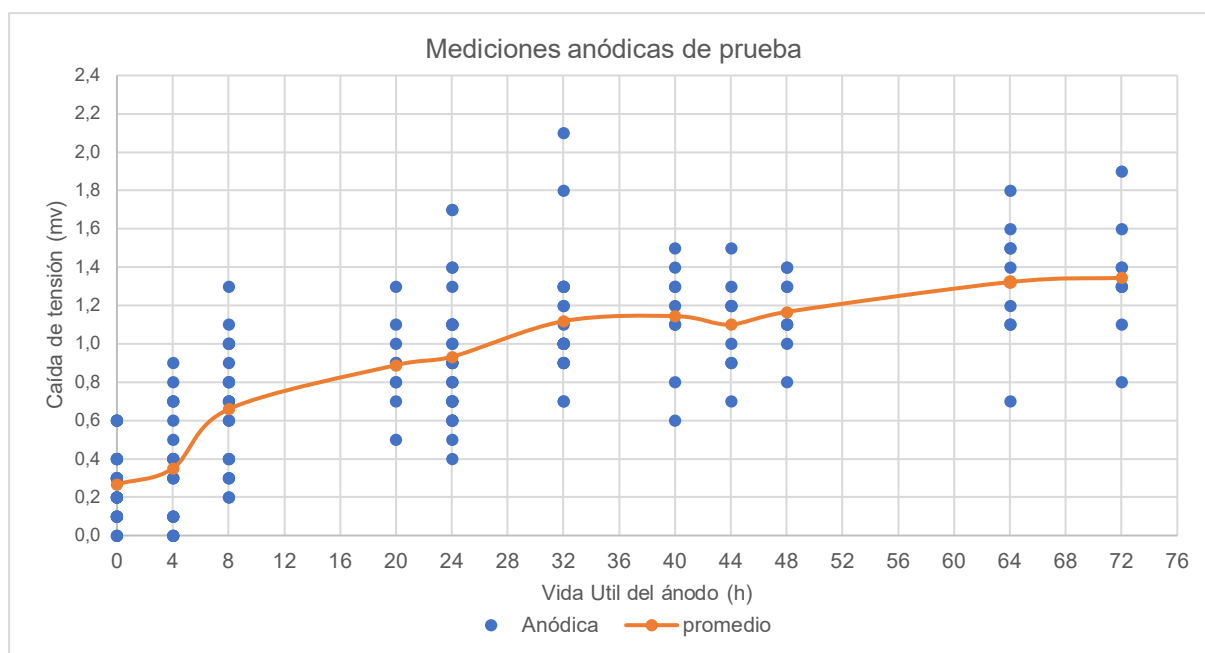


Figura 2.3 Mediciones anódicas de prueba en función de la vida útil del ánodo. Los puntos representan mediciones anódicas y la línea representa la tendencia de los datos obtenidos.

Mediciones de comparación

Una vez definido el período de medición, se realizaron un total de 1349 mediciones, de las cuales 1019 fueron seleccionadas para el estudio comparativo. Las 330 mediciones restantes fueron descartadas del análisis debido a criterios operativos, ya que los operadores únicamente monitorean el comportamiento del ánodo durante las primeras 72 horas de su vida útil. Estas mediciones excluidas corresponden a un grupo de ánodos que se encontraban entre los 50 y 70 turnos (400 hs y 560 hs respectivamente) de vida útil dentro de la cuba, que sería la etapa final de uso, y si bien se tomaron con el objetivo de observar su comportamiento hacia el final del ciclo, no resultaron relevantes para los fines del estudio.

Los resultados obtenidos incluyendo las mediciones de los últimos turnos de vida útil del ánodo se observan en el gráfico de dispersión con una línea de tendencia de medias (Figura 2.4). Se denominó esta base de datos como "Mediciones para comparación".

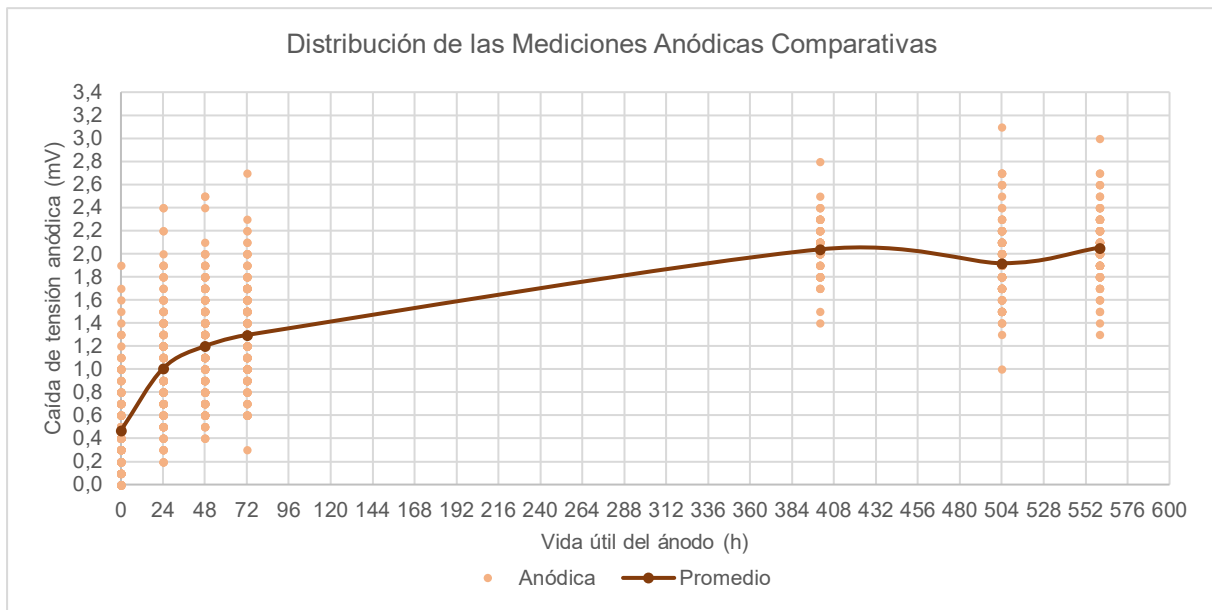


Figura 2.4 Distribución de las mediciones anódicas (Datos Comparativos) en función de la vida útil del ánodo. Los puntos representan mediciones anódicas y la línea es la tendencia de medias de los datos obtenidos.

Eliminando los datos correspondientes a los turnos 50 y 70, que no serán considerados en este análisis, y reordenando la información para facilitar su interpretación, se confeccionó la gráfica (Figura 2.5). Esta corresponde a un gráfico de dispersión con línea de tendencia de medias, que permite observar el comportamiento general de las mediciones luego del filtrado de datos.

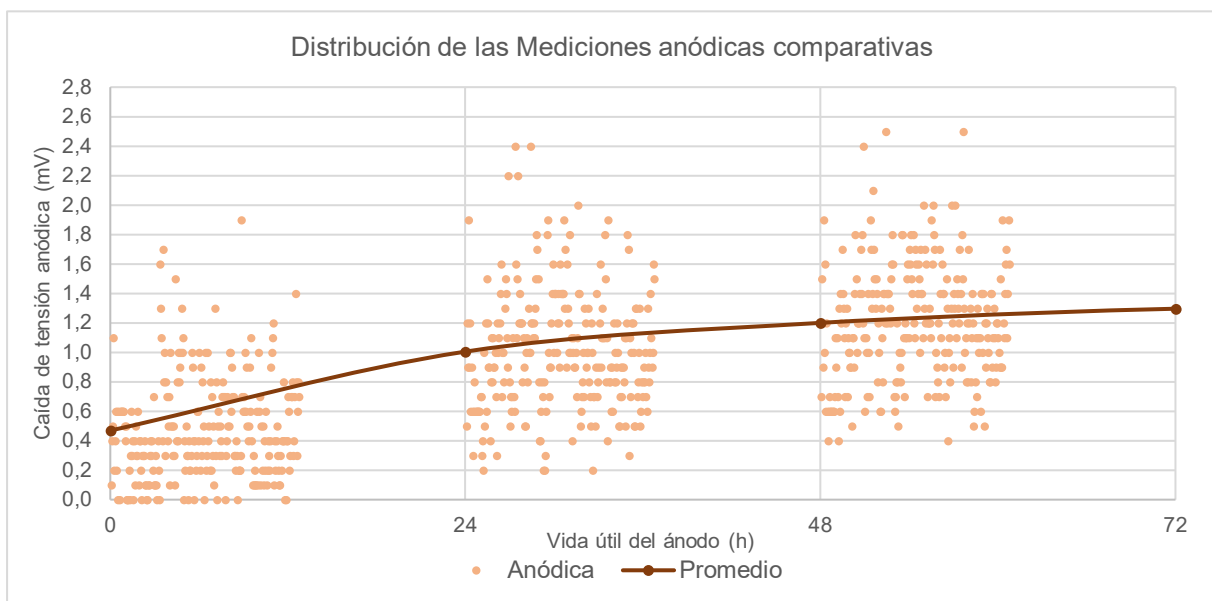


Figura 2.5 Nube de mediciones anódicas (Datos Comparativos) en función de la vida útil del ánodo. Los puntos representan las mediciones anódicas y la línea representa la tendencia de medias de los datos obtenidos.

2.6 ANALISIS COMPARATIVO

Mediciones útiles

Una vez obtenida la gráfica con la totalidad de las mediciones anódicas realizadas, fue necesario filtrar los datos en función del método de medición empleado, diferenciando entre aquellas efectuadas mediante el sistema automatizado DIANA y las realizadas con el método manual CALIBRE. Como resultado, se elaboró un gráfico de dispersión que permite visualizar esta diferenciación: las mediciones efectuadas con CALIBRE se representan en color azul, mientras que aquellas realizadas con el sistema DIANA se indican en color verde en función de la vida útil del ánodo (Figura 2.6).

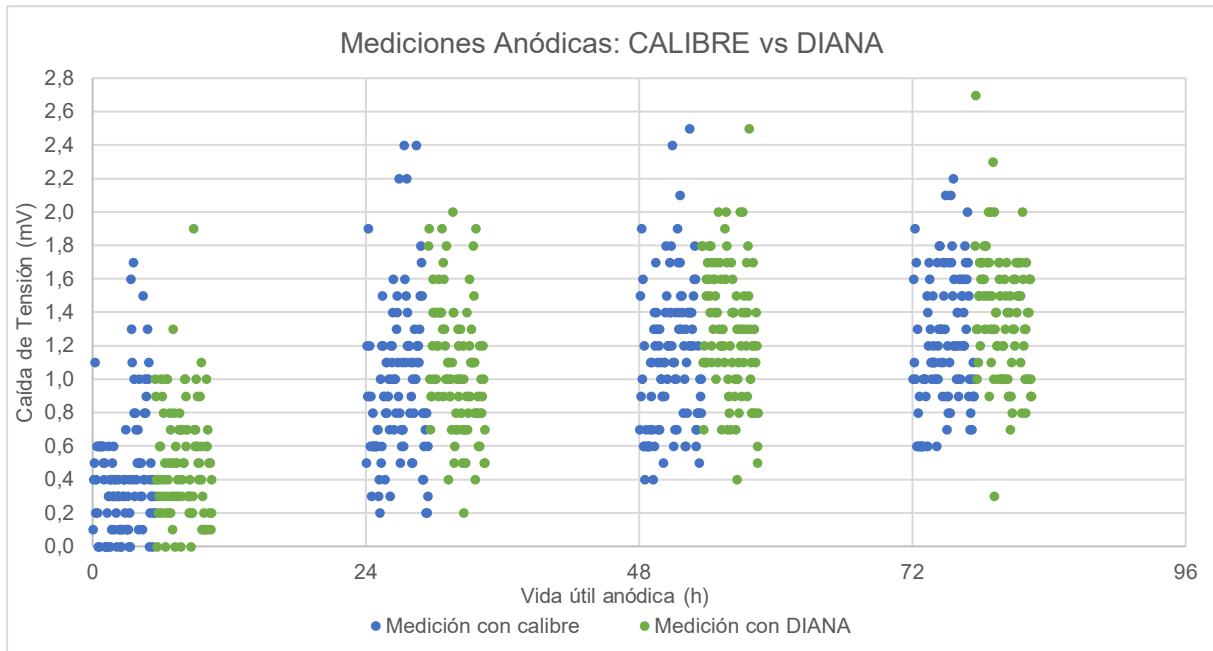


Figura 2.6 Distribución de las mediciones anódicas utilizando: DIANA y CALIBRE en función de la vida útil del ánodo. Los puntos representan las mediciones anódicas.

Por lo tanto, del total de 1019 mediciones realizadas en esta etapa relevantes, solo 835 mediciones son consideradas válidas para el análisis, ya que en las 184 mediciones restantes no se pudo identificar con certeza el método utilizado para el posicionamiento anódico. De estas 835 mediciones, 436 fueron efectuadas con CALIBRE y 399 mediante el sistema DIANA. Esta distribución puede observarse en el gráfico de tortas (Figura 2.7).

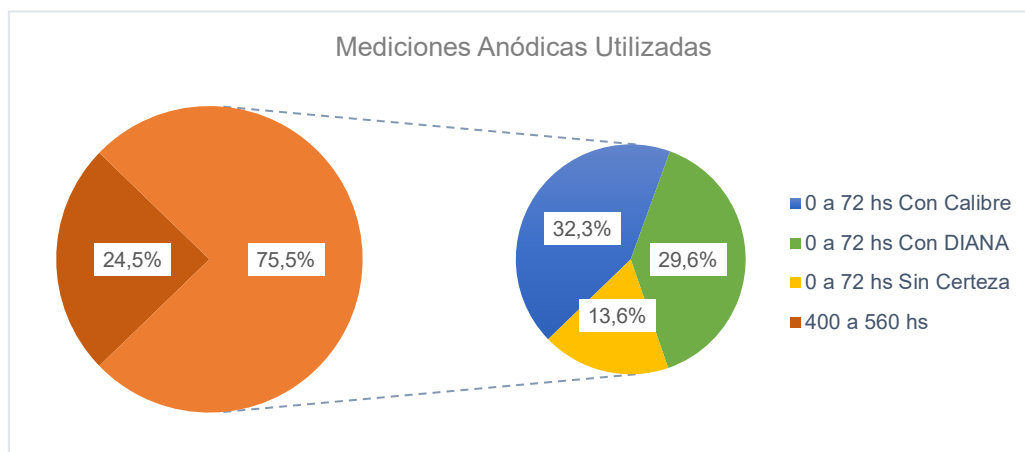


Figura 2.7 Porcentaje mediciones utilizadas para realizar los análisis correspondientes.

Comparación CALIBRE y DIANA

Una vez seleccionadas las mediciones útiles para realizar la comparación, se realizó el análisis utilizando gráficos de cajas y bigotes (Figura 2.8).

En el gráfico se muestra la comparación de la dispersión de la caída de tensión (mV) entre las mediciones anódicas realizadas mediante el método manual (CALIBRE) y el sistema automatizado (DIANA), en función de la vida útil del ánodo (0, 24, 48 y 72 horas). Se observa que, en general, las mediciones obtenidas con el sistema DIANA presentan una menor dispersión en las etapas más avanzadas del ciclo (48 y 72 horas), lo cual sugiere una mayor estabilidad del sistema automatizado en condiciones de operación prolongadas.

Asimismo, puede notarse que el método manual (CALIBRE) presenta un mayor número de valores atípicos en comparación con DIANA, particularmente en los puntos de 0 y 48 horas, lo cual podría estar asociado a la variabilidad introducida por la intervención humana durante la medición. Por otro lado, si bien las medianas y los promedios (indicados por la "X" en el medio de la caja) tienden a ser ligeramente mayores en el caso de DIANA, en casi todos los momentos analizados, estas diferencias se encuentran dentro de rangos comparables y no comprometen la confiabilidad del nuevo sistema.

En conjunto, estos resultados respaldan la hipótesis de que el sistema automatizado no solo reduce la dispersión de los datos, sino que también contribuye a mejorar la consistencia de las mediciones a lo largo del tiempo, manteniendo niveles de tensión acordes al comportamiento esperado del proceso.

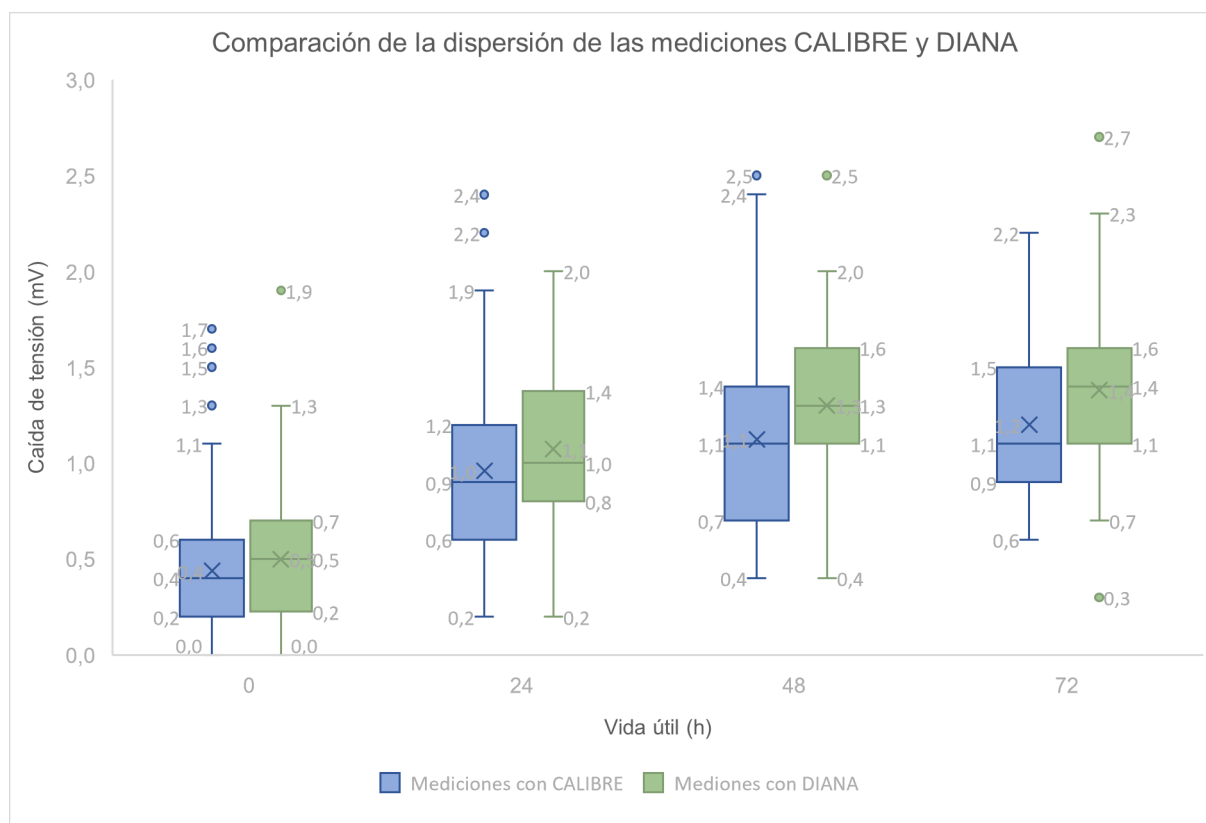


Figura 2.8 Comparación de la dispersión de la caída de tensión (mV) entre mediciones con CALIBRE y DIANA a lo largo de la vida útil. Los puntos aislados representan mediciones atípicas, las líneas representan los valores esperados, la caja representa el 50% de los datos y la cruz en el medio de la caja, la mediana de los datos.

Límites de Control

Los límites de control que están vigentes para controlar el proceso, los del instructivo de trabajo (IT), se los encuentra en archivos de la empresa. En la gráfica de dispersión (Figura 2.9) se compara los límites de IT con los datos de las mediciones para analizar la viabilidad del sistema automatizado para el posicionamiento del ánodo.

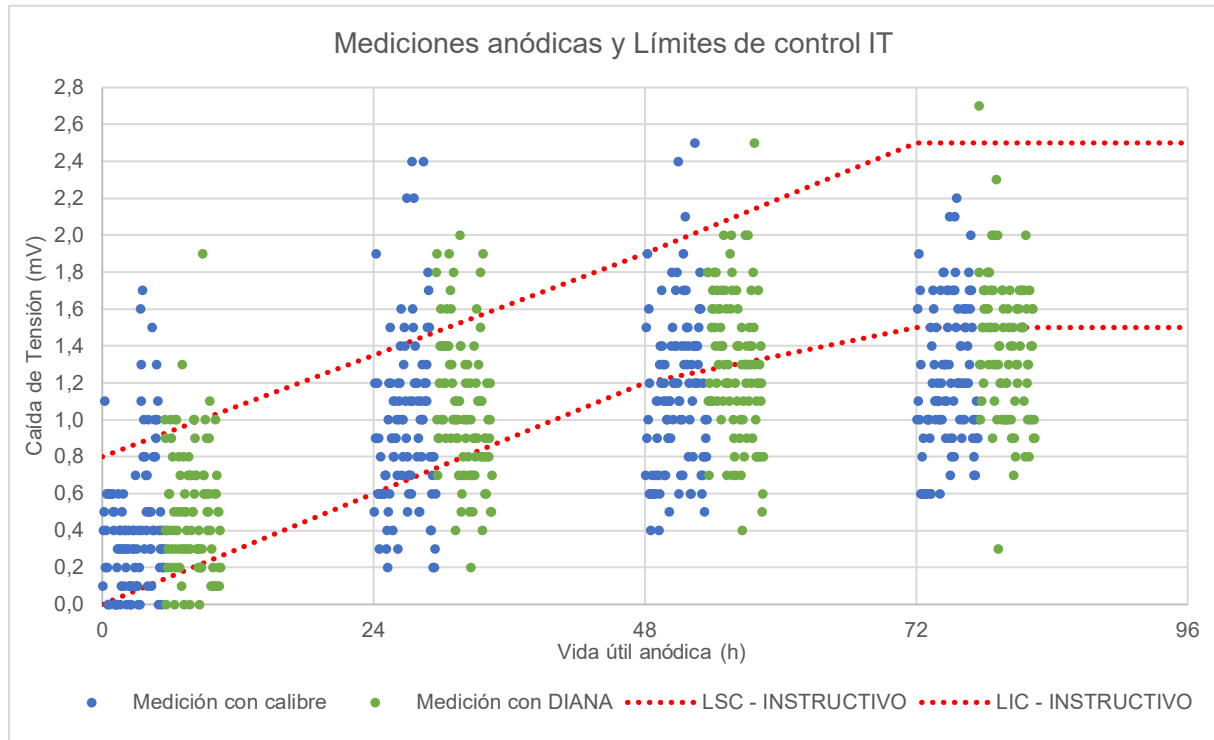


Figura 2.9 Distribución Mediciones con los límites del Instructivo de Trabajo. Los puntos representan las mediciones anódicas y las líneas punteadas representan los LIC y LSC.

En la Figura 2.10 se compara el porcentaje de mediciones anódicas que se encuentran por debajo, dentro y por encima de los límites de control definidos en el IT, diferenciando entre los métodos de medición (CALIBRE y DIANA) y según la vida útil del ánodo (0, 24, 48 y 72 horas).

Si bien en las primeras 24 horas se observa que el método con CALIBRE presenta un mayor porcentaje de mediciones dentro de los límites en comparación con DIANA, a partir de las 48 horas la tendencia de medias se revierte. En este punto, el sistema DIANA mejora notablemente la proporción de mediciones dentro de los límites (60,0 % y 45,5 % en las horas 48 y 72, respectivamente), mientras que las mediciones con CALIBRE muestran una disminución significativa (45,0 % y 29,4 %).

Además, es importante remarcar que con el uso de CALIBRE aumenta considerablemente el porcentaje de mediciones que quedan por debajo del límite de control en las horas 48 y 72 (52,3 % y 70,6 %, respectivamente), mientras que con DIANA este porcentaje se mantiene más bajo (16,0 % y 1,0 %). Esta diferencia es clave, ya que los operarios suelen intervenir cuando las mediciones superan los límites superiores, por lo que los valores por debajo no son corregidos, y pueden afectar negativamente el control del proceso sin ser detectados.

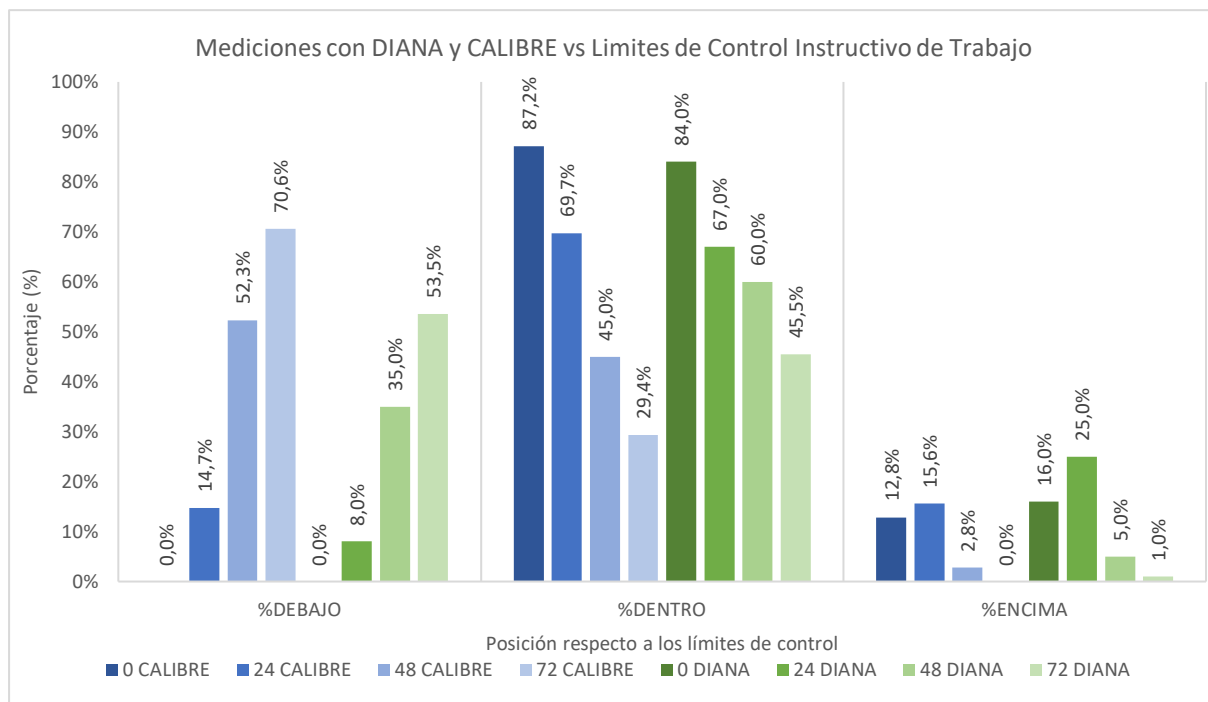


Figura 2.10 Porcentajes de distribución de las Mediciones con los límites del Instructivo de Trabajo. Las barras representan los porcentajes de las mediciones, en las distintas edades del ánodo, dentro o fuera de los límites de control del IT.

2.7 CONCLUSIONES

A partir de los gráficos y datos analizados, se puede concluir que el sistema DIANA presenta ventajas significativas frente al método con CALIBRE, en lo que respecta a la estabilidad de las mediciones y la representatividad de los datos a lo largo de la vida útil del ánodo.

Por un lado, el análisis de dispersión muestra que las mediciones con DIANA tienden a tener menor variabilidad en las horas críticas (48 y 72), reduciendo la cantidad de valores atípicos y mostrando una mayor consistencia en comparación con el CALIBRE. Esto es relevante considerando que esas horas coinciden con etapas donde la condición del ánodo comienza a estabilizarse.

Por otro lado, la comparación porcentual respecto a los límites de control demuestra que el sistema DIANA mantiene una proporción más equilibrada de mediciones dentro de los rangos establecidos, mientras que, con el uso del CALIBRE, aumentan significativamente los valores por debajo del límite a medida que se prolonga la vida útil del ánodo. Esta tendencia de medias suele subestimarse, comprometiendo el control operativo, ya que las acciones correctivas por parte de los operadores se aplican cuando los valores están por encima del límite superior.

En conclusión, se evidencia que el sistema DIANA ofrece un comportamiento más estable y consistente en la medición anódica, especialmente a medida que transcurre la vida útil del ánodo. Esta estabilidad se traduce en una menor tendencia de medias a subestimar los valores de caída de tensión, lo que permite un monitoreo más preciso y representativo del estado del ánodo. En consecuencia, su implementación incrementa la confiabilidad de las mediciones y mejora el seguimiento del proceso en las etapas más críticas del control operativo.

3 VALIDACIÓN DE LÍMITES DE CONTROL

3.1 PROBLEMÁTICA HALLADA

Con el objetivo de ajustar los límites de control a la situación operativa actual de la planta, se llevó a cabo un proceso de revisión y modificación, utilizando herramientas estadísticas aplicadas en el área de control del proceso. Esta iniciativa surgió a partir de la necesidad de que dichos límites representen con mayor precisión el comportamiento real del sistema bajo condiciones normales de operación, optimizando así la capacidad de detección de desvíos y mejorando la toma de decisiones operativas.

Luego, con el fin de validar la efectividad de los límites propuestos, se realizó una nueva ronda de mediciones, identificada en el cronograma de trabajo como etapa de “validación”. Esta segunda población de datos permitió verificar que los nuevos límites reflejaban de forma adecuada el comportamiento operativo del proceso, sin generar falsas alarmas ni dejar de detectar condiciones fuera de control.

Finalmente, se comparó los límites propuestos con las mediciones históricas con el objetivo de analizar el impacto que tendría la aplicación de los nuevos límites en términos de control del proceso y desempeño operativo.

Este enfoque permitió reforzar la consistencia y fiabilidad de los parámetros de control, sino que también aseguró la continuidad del monitoreo eficiente del sistema, alineando los indicadores de desempeño con la realidad actual de la planta.

3.2 CALCULOS ESTADÍSTICOS

Selección de mediciones

Para realizar el cálculo de los límites de control, fue necesario seleccionar el conjunto de datos, provenientes de mediciones anódicas previamente identificadas como “mediciones para comparación”, obtenidos sin el uso del sistema DIANA, ya que el objetivo es validar dicho método. Por lo tanto, se utilizaron exclusivamente las mediciones realizadas con CALIBRE. En el Figura 3.1 se puede observar la distribución porcentual de las mediciones realizadas según la edad del ánodo al momento del control. Se observa que el 76 % de las mediciones se efectúan en las primeras 72 horas de uso, mientras que solo el 24 % corresponde a ánodos con entre 400 y 560 horas de vida.

Mediciones Anódicas Utilizadas Con CALIBRE

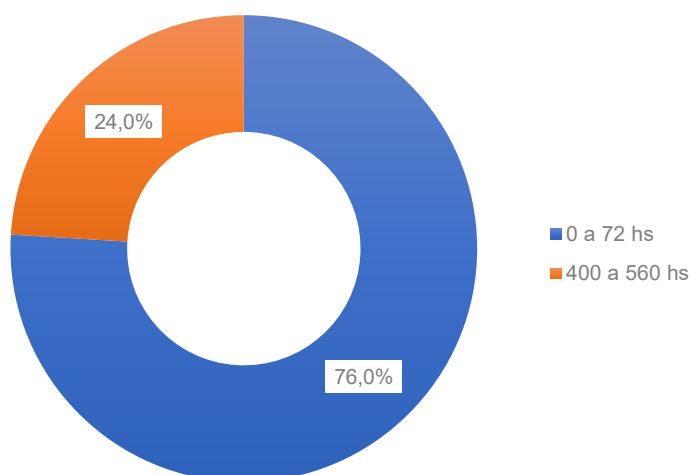


Figura 3.1 Porcentaje Mediciones Usadas para los cálculos estadísticos, utilizando las mediciones que se realizaron con CALIBRE.

Ecuaciones Estadísticas

Luego de seleccionar los datos para el análisis, se procede a seleccionar las ecuaciones necesarias para este caso de estudio. A continuación, las Ecuaciones (3.1, 3.2 y 3.3) necesarias para realizar los cálculos y las gráficas de medias, para su respectivo control estadístico.

$$LSC = \mu + A * \sigma \quad (3.1)$$

$$LIC = \mu - A * \sigma \quad (3.2)$$

$$LC = \mu \quad (3.3)$$

Donde:

- LSC es el límite superior de control
- LIC es el límite inferior de control
- LC es el límite de control
- μ es el promedio
- σ es la desviación estándar
- A es el coeficiente en función del tamaño de la población

Para determinar el coeficiente A, se utilizó la Tabla 1 (Anexo I), cuyo valor es 2,121 (Ruiz-Falco Rojas, 2006). Para ello se consideró el caso más desfavorable desde el punto de vista estadístico, correspondiente a un tamaño de muestra igual a 2.

Resultados Estadísticos

La Figura 3.2 es un gráfico que se presentan los resultados obtenidos a partir del cálculo de los límites de control mediante el gráfico de medias. La línea amarilla representa la evolución de la media de la caída de tensión (mV) en función de la vida útil del ánodo, en cuatro momentos: 0, 24, 48 y 72 horas.

Las líneas punteadas rojas indican el límite superior de control (LSC) y el límite inferior de control (LIC) calculados estadísticamente, considerando la variabilidad natural del proceso y utilizando los coeficientes adecuados para el tamaño muestral.

Se puede observar que, a medida que avanza la vida útil del ánodo, la media de la caída de tensión aumenta gradualmente, lo cual es coherente con el comportamiento esperado del sistema. Al mismo tiempo, los límites de control se amplían ligeramente, reflejando una mayor dispersión aceptada en las etapas posteriores del ciclo del ánodo. Este gráfico sirve como referencia para validar si las mediciones futuras se encuentran dentro del rango normal de operación del proceso.

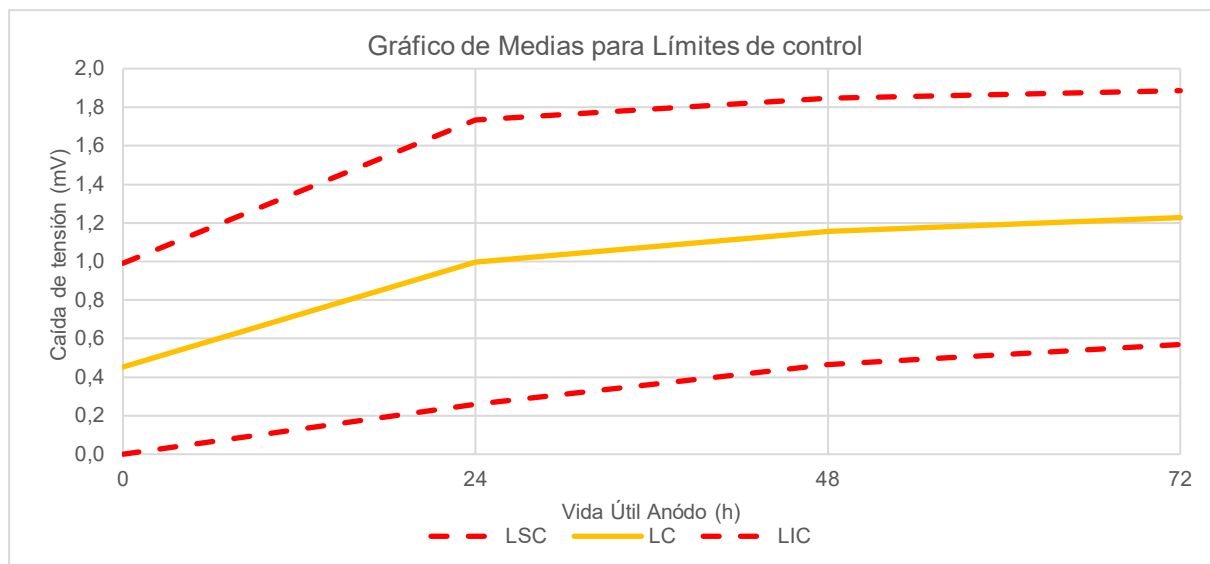


Figura 3.2 Límites de Control Propuestos. Las líneas segmentadas representan LSC y LIC y la línea representa LC.

3.3 COMPARACIÓN ENTRE MEDICIONES Y LÍMITES PROPUESTOS

Para analizar el comportamiento de las mediciones en relación con los límites de control propuestos, se elaboró el gráfico de dispersión (Figura 3.3), incluyendo las mediciones realizadas con CALIBRE (en color azul) y aquellas obtenidas mediante el sistema automatizado DIANA (en color verde). En el mismo gráfico se representan los LSC e LIC (líneas rojas segmentadas), calculados en la sección 3.2. Esta representación permite evaluar si ambos métodos de medición se ajustan a los rangos definidos y, por lo tanto, verificar la consistencia y confiabilidad del nuevo sistema en comparación con el procedimiento manual.

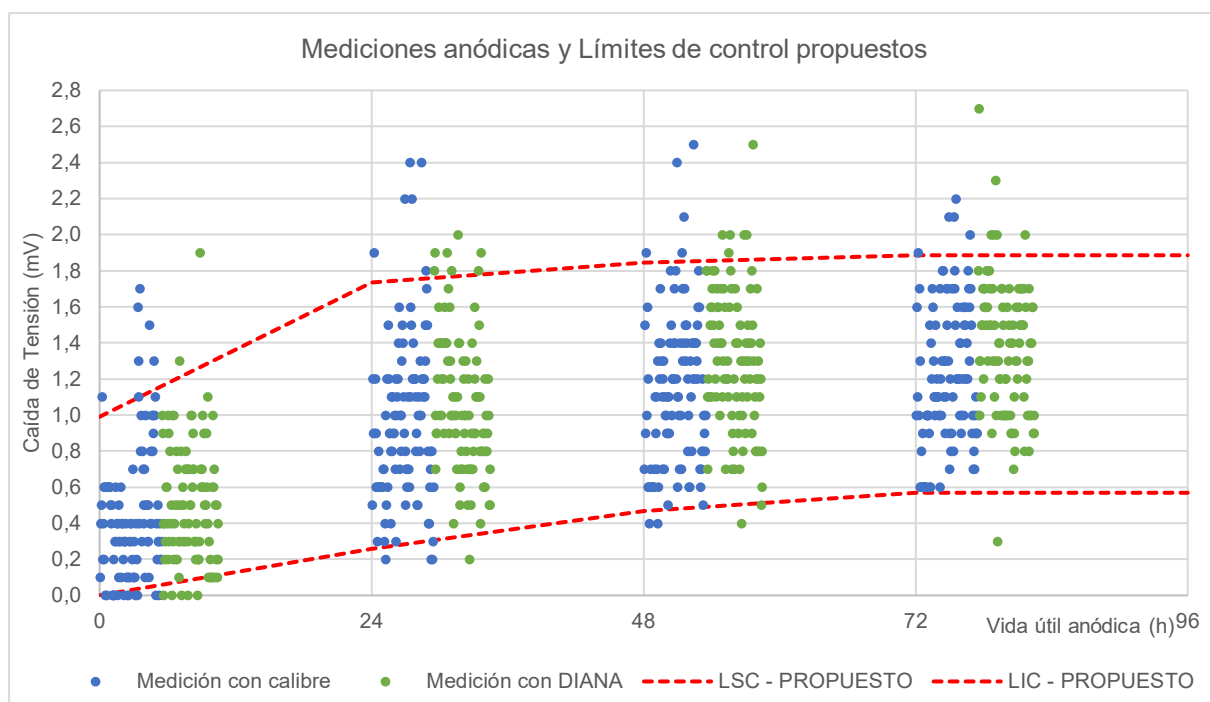


Figura 3.3 Distribución Mediciones Anódicas Comparativas con los límites Propuestos en función de la vida útil del ánodo. Las líneas segmentadas representan LSC y LIC y los puntos representan las mediciones anódicas realizadas.

Con el objetivo de establecer una base comparativa entre las distintas situaciones analizadas, se elaboró el gráfico de dispersión en función de la vida útil del ánodo (Figura 3.4), que superpone los límites de control definidos en el IT (líneas rojas punteadas) con los nuevos límites propuestos (líneas rojas segmentadas). En el mismo gráfico se representan también las mediciones realizadas con CALIBRE (en azul) y con el sistema DIANA (en verde), en función de la vida útil del ánodo.

Este enfoque permite observar de forma clara cómo se distribuyen los datos respecto a ambos conjuntos de límites. Se aprecia que los límites propuestos abarcan de manera más adecuada la variabilidad real del sistema, lo que podría contribuir a una mejor discriminación de valores anómalos sin generar rechazos innecesarios de mediciones válidas.

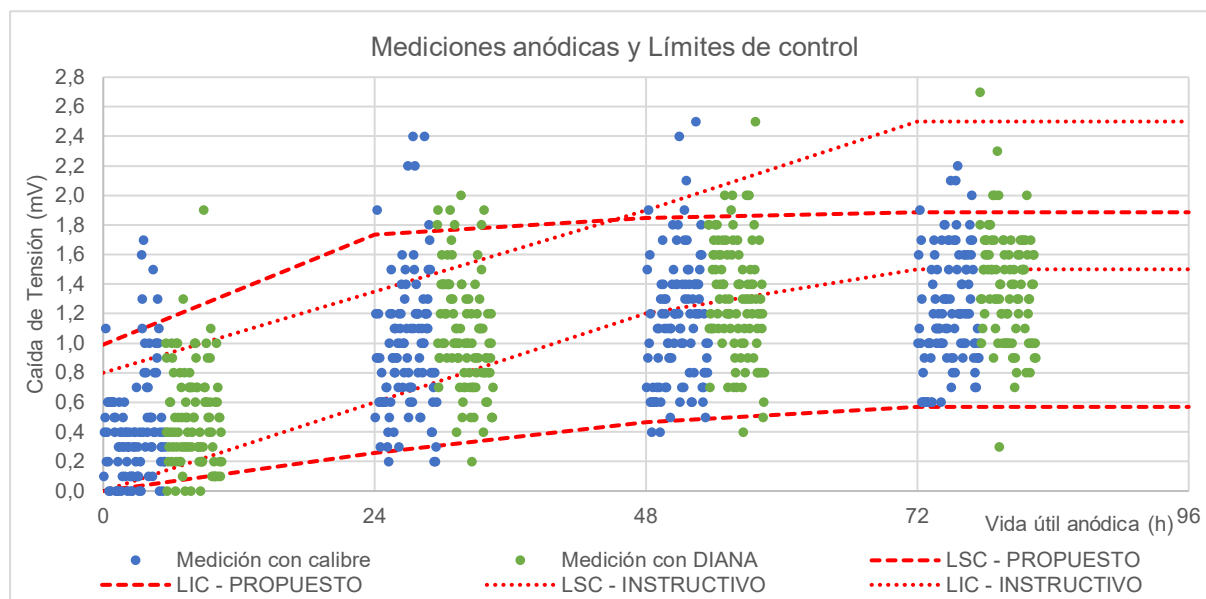


Figura 3.4 Comparación de la distribución de las mediciones con los límites de control del instructivo y los propuestos en función de la vida útil del ánodo. Las líneas punteadas representan los límites del IT, las líneas segmentadas los límites propuestos y los puntos representan las mediciones anódicas realizadas.

En las Figuras 3.5 y 3.6 se presentan los cálculos del porcentaje de mediciones que se encuentran por debajo, dentro y por encima de los límites de control establecidos en gráficos de barras. En particular, la Figura 3.5, correspondiente al sistema DIANA, evidencia que los límites propuestos permiten incluir un mayor porcentaje de valores dentro del rango de control, especialmente en los grupos de 24, 48 y 72 horas de vida útil. En el caso del grupo de 48 horas, se observa un aumento significativo en la proporción de datos dentro de los límites, pasando del 60,0 % (según el instructivo) al 93,0 % (según la propuesta), mientras que la cantidad de valores por encima de los límites se reduce considerablemente.

En el caso de la Figura 3.6, mediciones realizadas con CALIBRE, se observa nuevamente que una mayor proporción de valores queda contenida dentro de los límites propuestos, sugiriendo una mejor adaptación al comportamiento real de las mediciones. El grupo de 72 horas destaca en este análisis, mostrando una mejora sustancial en la cantidad de valores dentro del rango de control. Con los límites establecidos por el instructivo, sólo el 29,4 % de los datos se encuentra dentro de los límites, mientras que con los límites propuestos esta proporción aumenta drásticamente hasta alcanzar el 95,4 %. Además, la cantidad de valores fuera de los límites, tanto por debajo como por encima del intervalo de control, se reduce de manera significativa, lo que refuerza la utilidad de la nueva propuesta para evaluar la estabilidad anódica con mayor precisión.

Los resultados obtenidos permiten una caracterización más precisa del comportamiento de la caída de tensión a lo largo del ciclo de vida de los ánodos, demostrando que los límites de

control propuestos mejoran significativamente la distribución de los datos dentro del rango esperado. En comparación con los límites actuales, la nueva propuesta refleja una mejor adecuación estadística y una representación más fiel de la variabilidad en las mediciones, lo que sugiere una mayor precisión en la evaluación del sistema.

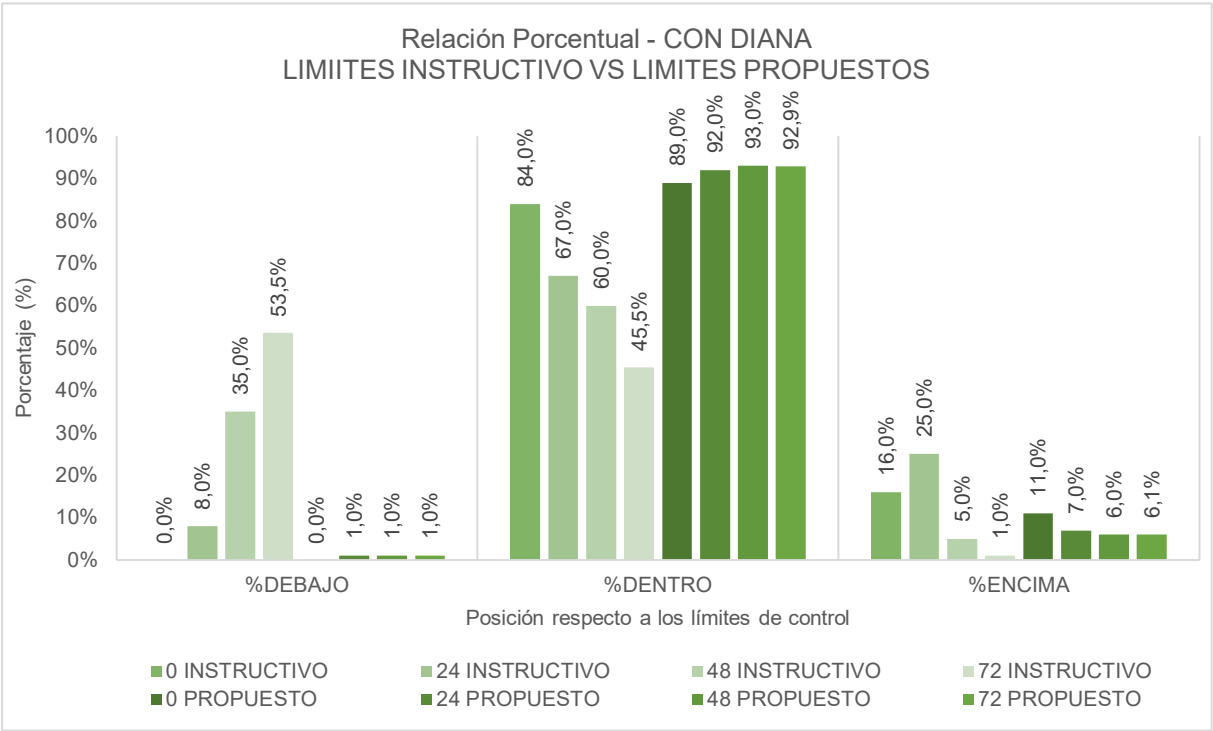


Figura 3.5 Porcentajes de distribución de las Mediciones que se realizaron con DIANA con los límites propuestos. Las barras representan los porcentajes de las mediciones, en las distintas edades del ánodo, dentro o fuera de los límites de control propuesto.

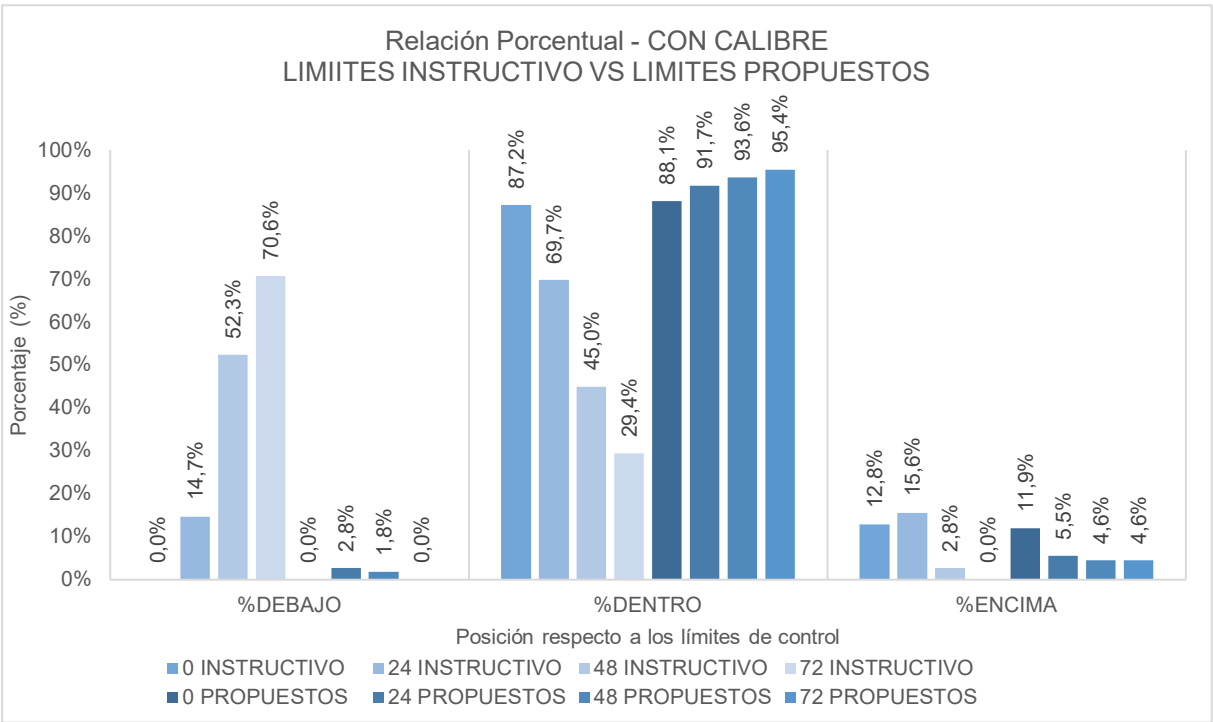


Figura 3.6 Porcentajes de distribución de las Mediciones que se realizaron con CALIBRE con los límites propuestos. Las barras representan los porcentajes de las mediciones, en las distintas edades del ánodo, dentro o fuera de los límites de control propuesto.

3.4 MEDICIONES DE VALIDACIÓN

Comparación de los resultados con los límites Calculados

Utilizando los valores de los límites de control propuestos (calculados en la Sección 3), se comparan con la nueva población de datos obtenida, llamada “mediciones de validación” y se analiza con una gráfica de dispersión (Figura 3.7).

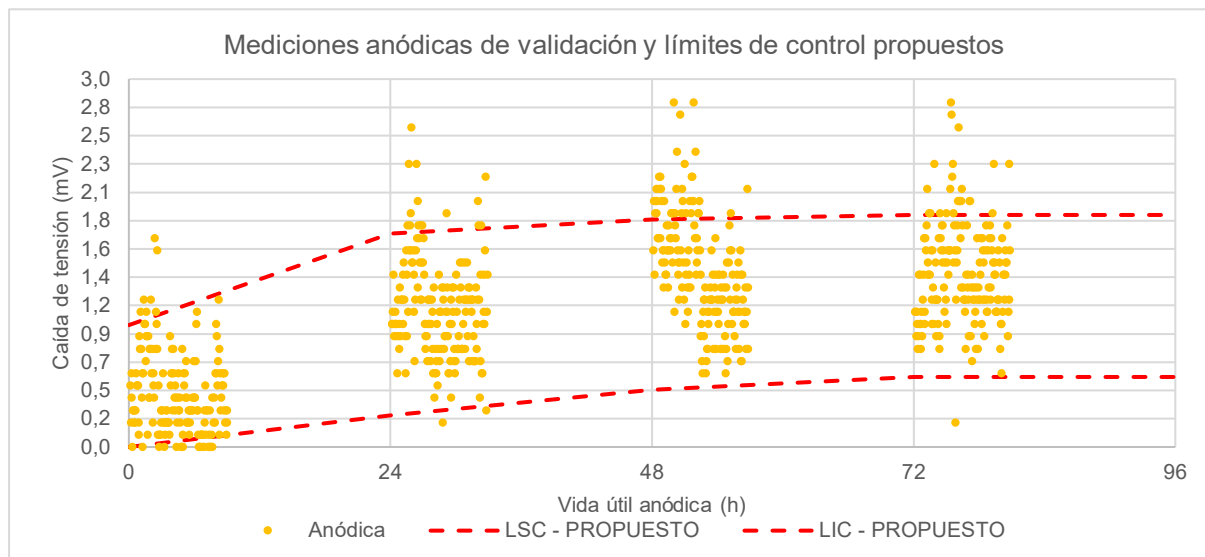


Figura 3.7 Distribución de las mediciones de validación con los límites de control propuestos en función de la vida útil del ánodo. Las líneas segmentadas representan los límites propuestos y los puntos representan las mediciones anódicas realizadas.

Comparación de mediciones y límites

En la Figura 3.8, se presenta un gráfico de dispersión con la distribución conjunta de las mediciones anódicas correspondientes a dos bases de datos: “mediciones de comparación”, en color naranja y “mediciones de validación”, en color amarillo. Estas mediciones se representan en función de la vida útil del ánodo, en intervalos de 0, 24, 48 y 72 horas, y permiten comparar el comportamiento real del sistema frente a los límites de control definidos.

Las líneas rojas segmentadas representan los límites propuestos, calculados estadísticamente a partir de los datos recolectados. Por otro lado, las líneas punteadas de color rojo corresponden a los límites establecidos actualmente en el IT.

Se puede observar que los límites propuestos se ajustan de manera más precisa al comportamiento de los datos, acompañando la dispersión natural de las mediciones en cada etapa del ciclo anódico. En cambio, los límites del IT muestran valores significativamente más altos, especialmente en el caso del LSC, que permite caídas de tensión que no se presentan con frecuencia en la realidad. Esta diferencia sugiere que los límites del IT podrían no reflejar adecuadamente el estado real del proceso y, en consecuencia, habilitar condiciones que afecten negativamente el rendimiento de la cuba si se toleran valores excesivamente altos.

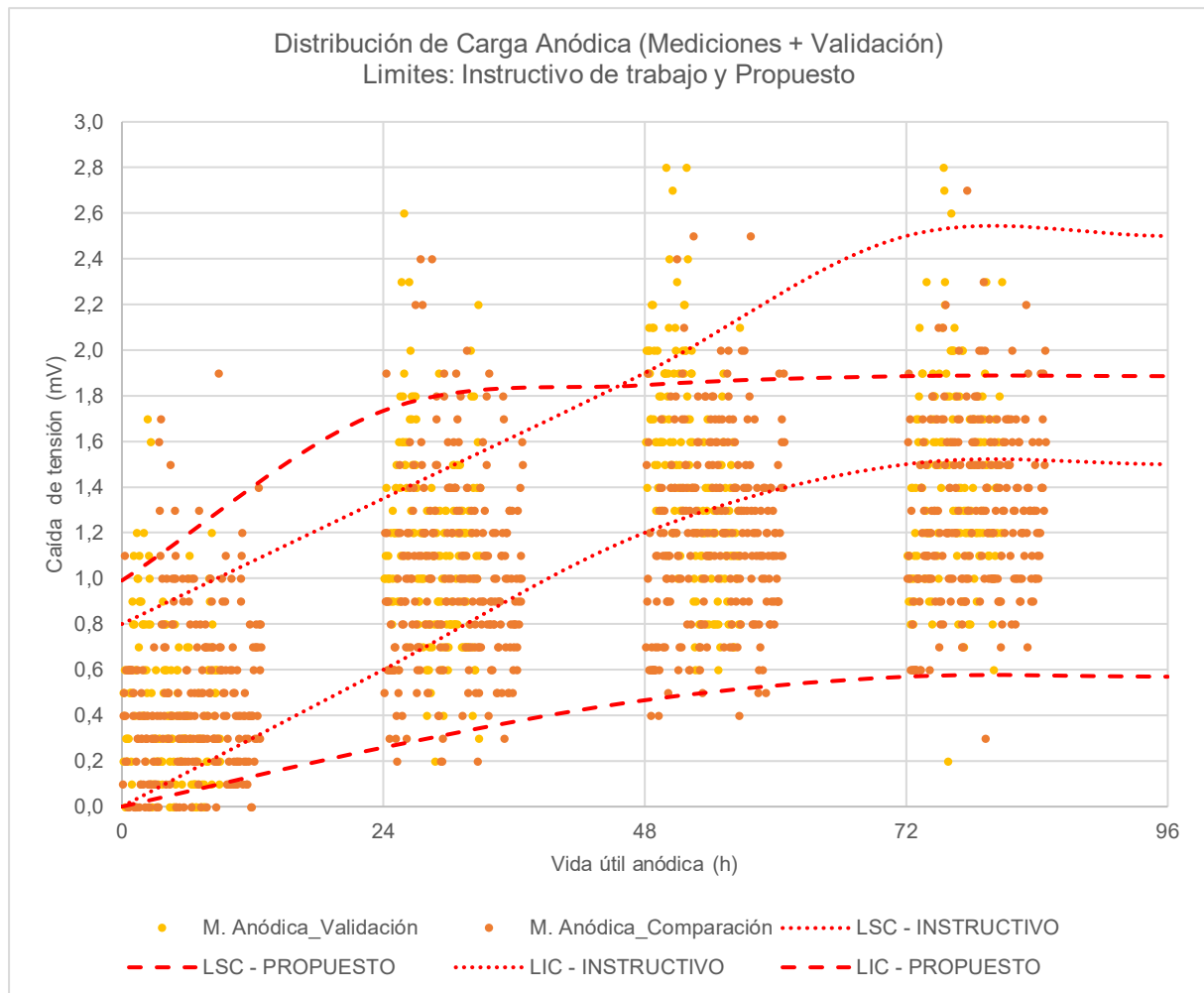


Figura 3.8 Comparación de la distribución de las mediciones de validación con los límites de control del instructivo y los propuestos en función de la vida útil del ánodo. Las líneas punteadas representan los límites del IT, las líneas segmentadas los límites propuestos y los puntos representan las mediciones anódicas realizadas.

En la Figura 3.9 se presenta el gráfico del análisis porcentual de las mediciones anódicas realizadas, con los límites propuestos, con dos métodos distintos: CALIBRE y DIANA (cuántas mediciones se encuentran por debajo, dentro o por encima de dichos límites). La comparación se realiza en función de su posición respecto a los límites de control propuestos, en cuatro puntos de la vida útil anódica: 0, 24, 48 y 72 horas. Las barras indican el porcentaje de mediciones que se encuentran por debajo, dentro o por encima de los límites.

En ambos casos, no se registraron valores por debajo del límite inferior, lo que implica que las mediciones se concentran en el rango esperado o por encima del límite superior.

Se observa que las mediciones realizadas con el sistema DIANA presentan un mayor porcentaje de datos dentro del rango de control en los cuatro momentos analizados, superando el 93 % en todos los casos. Esto sugiere un comportamiento más controlado y alineado con los parámetros establecidos.

Por el contrario, las mediciones realizadas con CALIBRE muestran un comportamiento más disperso, especialmente a las 48 y 72 horas, donde sólo el 58,3 % y 79,2 % de los valores, respectivamente, se encuentran dentro del límite, y un porcentaje considerable excede el valor máximo permitido. Este exceso indica que en esas etapas la medición con CALIBRE tiende a registrar caídas de tensión más altas, lo cual podría reflejar un posicionamiento más bajo del plano anódico respecto al estándar buscado.

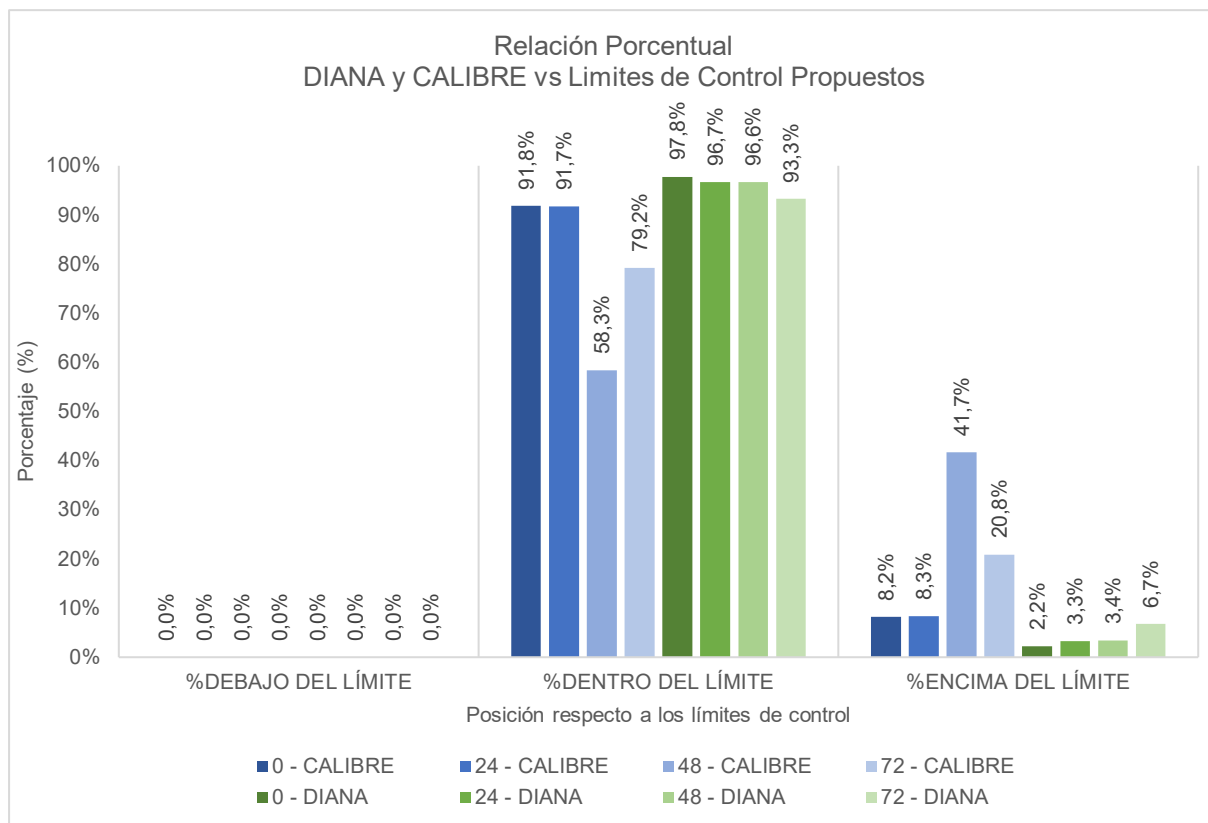


Figura 3.9 Porcentajes de distribución de las Mediciones que se realizaron con CALIBRE y DIANA con los límites propuestos. Las barras representan los porcentajes de las mediciones, en las distintas edades del ánodo, dentro o fuera de los límites de control propuesto.

En la Figura 3.10, se presenta la gráfica de cajas y bigotes de las mediciones obtenidas mediante los métodos DIANA y CALIBRE durante la etapa de validación. Para ello, se utilizó un gráfico de cajas y bigotes que permite visualizar la distribución, la mediana, los valores atípicos y la amplitud de las mediciones a lo largo del tiempo (0, 24, 48 y 72 horas).

En términos generales, se observa que las mediciones realizadas con el método DIANA presentan una menor dispersión en comparación con las obtenidas mediante CALIBRE, especialmente durante las primeras 24 horas, en las que los valores se mantienen más agrupados y con menor presencia de datos atípicos. Esto se refleja en el gráfico, donde el porcentaje de valores dentro del límite de control en las primeras 24 horas es considerablemente mayor en DIANA (79,2%) que en CALIBRE (58,3%), y el porcentaje encima del límite es notablemente menor (20,8% en CALIBRE frente a 2,2% en DIANA).

A medida que transcurre el tiempo, se incrementa la proporción de valores fuera del límite en ambos métodos. Sin embargo, el aumento es más pronunciado en CALIBRE, lo que evidencia una mayor inestabilidad y mayor presencia de valores atípicos en las mediciones de larga duración. En cambio, DIANA mantiene una proporción más baja y estable de valores por encima del límite incluso a las 72 horas (6,7%), lo que sugiere una mejor confiabilidad del sistema en el tiempo.

Por el contrario, las mediciones con CALIBRE muestran una mayor variabilidad, con cajas más amplias y presencia de valores atípicos en las horas 24, 48 y 72, lo que sugiere una menor precisión del instrumento. También se puede observar que, a partir de las 48 horas, la mediana y los rangos intercuartílicos se incrementan notoriamente, indicando una tendencia de medias a sobreestimar los valores con respecto a DIANA.

Este análisis de dispersión respalda la elección del método DIANA como herramienta más confiable para el seguimiento de la variable analizada, al ofrecer mediciones más consistentes y con menor variabilidad dentro del rango esperado de funcionamiento.

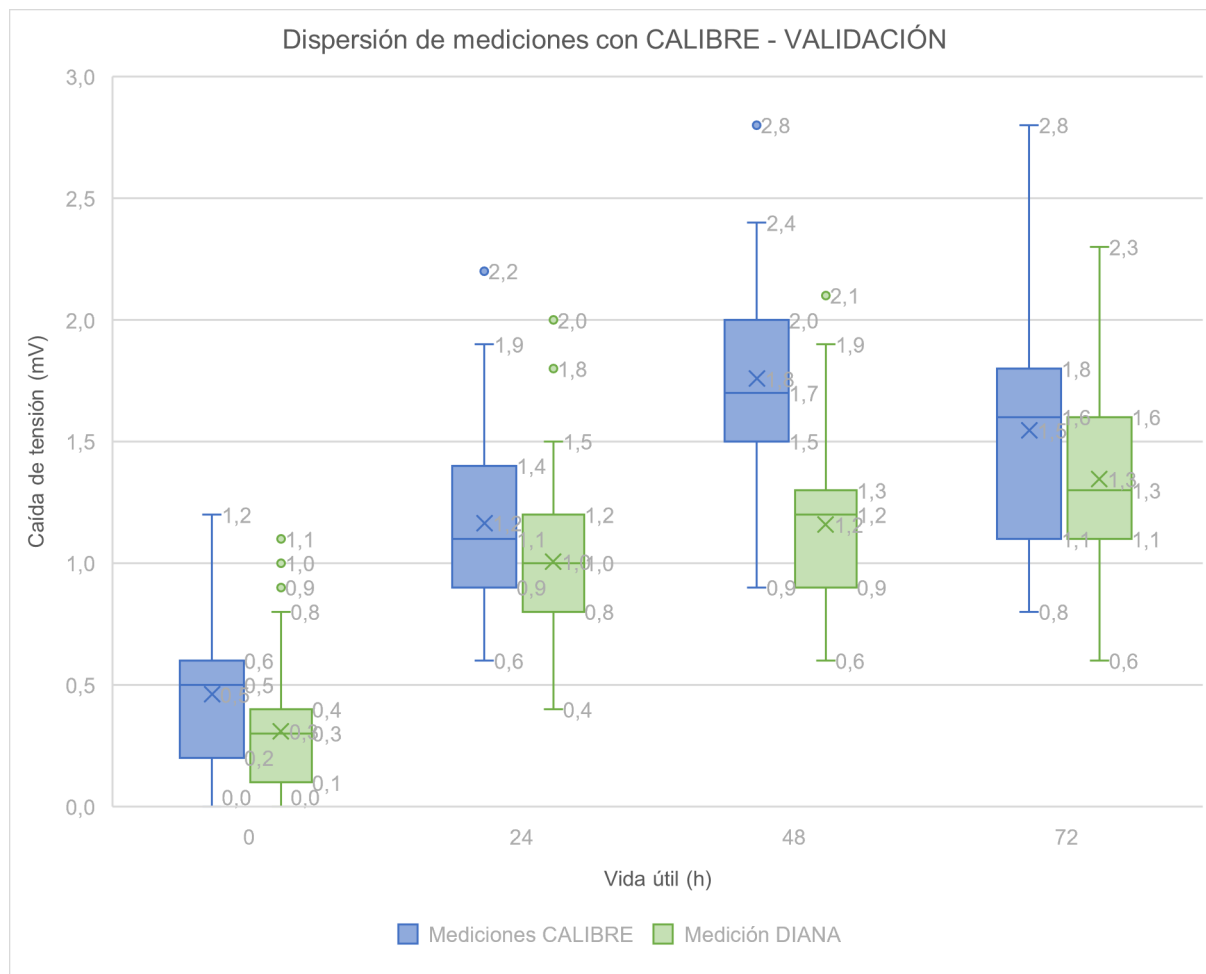


Figura 3.10 Comparación de la dispersión de la caída de tensión (mV) entre mediciones de validación con CALIBRE y DIANA a lo largo de la vida útil. Los puntos aislados representan mediciones atípicas, las líneas representan los valores esperados, la caja representa el 50% de los datos y la cruz en el medio de la caja, la mediana de los datos.

3.5 MEDICIONES HISTÓRICAS

Se utilizó la base de datos histórica de 3 meses anteriores para poder realizar una comparación con los nuevos límites propuestos y poder confirmar que realizar el cambio en los límites es correcto.

La Figura 3.11 presenta una gráfica del análisis comparativo porcentual de mediciones históricas realizadas sobre una variable de proceso, comparado con los dos límites de control: los límites propuestos y los establecidos por el IT.

El gráfico clasifica las mediciones en tres rangos: por debajo del límite inferior, dentro del rango de control y por encima del límite superior. Al observar los valores obtenidos, se destaca que con los límites propuestos solo el 0,08 % de las mediciones se encuentra por debajo del valor mínimo permitido, en comparación con el 6,47 % que cae fuera de rango bajo los límites del IT. Este dato refleja una reducción significativa de las desviaciones por defecto al usar los nuevos límites. Y como se dijo anteriormente, este porcentaje no es un valor que se pueda subestimar porque la corrección que realiza el operador es si el valor se encuentra por encima del límite.

En cuanto al porcentaje de mediciones que se encuentran dentro de los límites de los resultados con los límites propuestos, el 87,28 % de las mediciones se mantiene dentro del rango de control, mientras que con los límites actuales del instructivo esta proporción desciende al 51,09 %. Esto indica que la nueva propuesta no sólo se ajusta mejor al comportamiento real del proceso, sino que también ofrece una mayor estabilidad operativa y reduce la necesidad de intervenciones correctivas.

Por último, al analizar el porcentaje de valores que exceden el límite superior, se observa una disminución al pasar del 42,44 % con los límites del instructivo al 12,65 % con los límites propuestos. Esta diferencia representa una mejora considerable en el control de procesos, lo cual es fundamental para evitar desviaciones en la calidad del producto y prevenir condiciones operativas no deseadas.

Este análisis demuestra que la aplicación de los límites propuestos permitiría una gestión más eficiente del proceso, reduciendo los valores fuera de especificación tanto por defecto como por exceso, y aumentando significativamente la proporción de mediciones dentro del rango deseado.

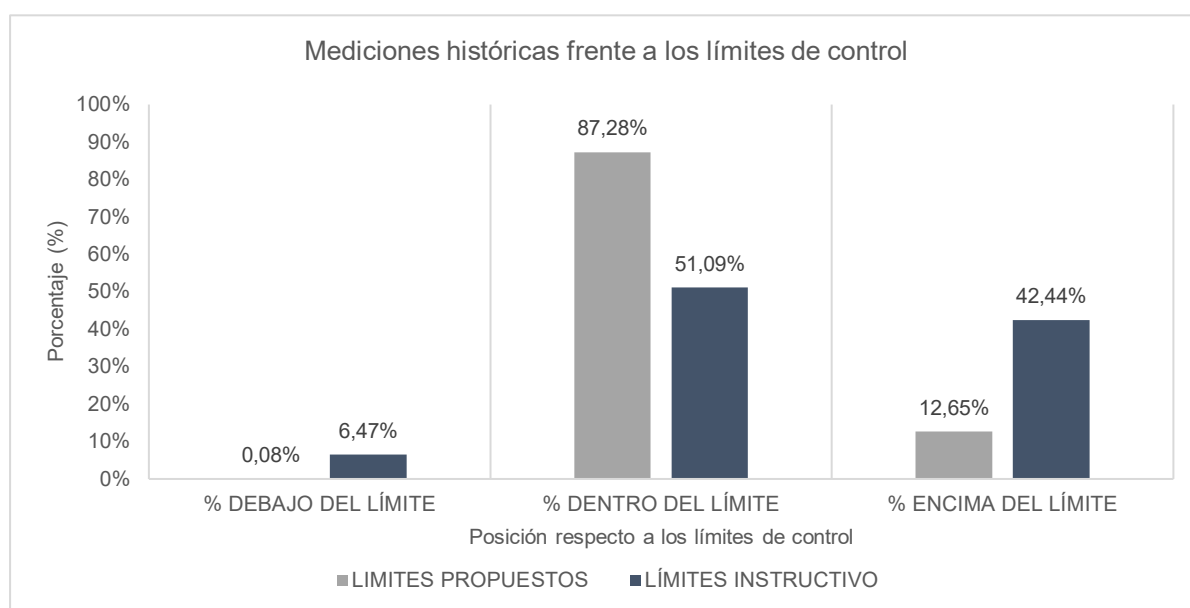


Figura 3.11 Comparación de mediciones históricas según se encuentren fuera o dentro del límite de control (propuesto). Las barras representan la cantidad de mediciones que cumplen con los límites de control

3.6 CONCLUSIONES

Durante la etapa de validación se evaluó el desempeño de los métodos de medición DIANA y CALIBRE, con foco en la precisión, estabilidad y conformidad de los datos respecto a los límites de control propuestos. Los resultados obtenidos permiten establecer una clara ventaja del método DIANA sobre CALIBRE.

El análisis porcentual de las mediciones respecto a los límites muestra que DIANA concentra una alta proporción de datos dentro del rango aceptable en todas las etapas de vida útil del ánodo. En contraste, CALIBRE presenta un notable mayor número de valores por encima del límite, especialmente a las 48 y 72 horas, lo que indica menor precisión y mayor desviación respecto del plano anódico de referencia.

Los gráficos de caja y bigotes refuerzan esta diferencia: DIANA evidencia una menor dispersión y evolución progresiva del comportamiento, sin valores atípicos significativos, mientras que CALIBRE exhibe mayor variabilidad e irregularidad en los datos.

Los resultados del análisis de las mediciones históricas confirman que los límites de control propuestos se ajustan de forma más precisa al comportamiento real del proceso, mejorando significativamente la estabilidad operativa.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que el método DIANA ofrece un mejor desempeño en términos de precisión, estabilidad y alineación con los parámetros del proceso. Su implementación en campo se valida no solo como técnicamente más adecuada, sino también como un aporte concreto a la eficiencia y confiabilidad operativa del sistema de medición.

4 ANÁLISIS DE MEJORAS

4.1 DIAGRAMA DE GANTT

Una forma de apreciar la mejora que genera este cambio, a nivel operativo, es mediante la realización de un diagrama de Gantt (Figura 4.1), en el cual se evalúan los tiempos requeridos para realizar la tarea del cambio de ánodos. En este gráfico se comparan las tareas secuenciales necesarias utilizando el método tradicional con CALIBRE frente a la implementación del sistema DIANA.

Se evidencia que, con el CALIBRE, además de las tareas propias del cambio de ánodo, se requiere un tiempo adicional previo para la búsqueda del instrumento y el registro manual de la información. Esto prolonga el inicio de la tarea y genera una duración total de aproximadamente 39 minutos. En cambio, con DIANA, la operación se inicia sin necesidad de preparación adicional y las tareas se encadenan de manera más eficiente, reduciendo el tiempo total a unos 35 minutos.

A pesar de que el ahorro de tiempo es mínimo, se elimina la necesidad de registrar información manualmente, lo cual disminuye el margen de error y simplifica el proceso. Esto no solo mejora la productividad operativa, sino que también estandariza las mediciones, aportando mayor confiabilidad al sistema de control.

Además, es importante destacar que la mejora que ofrece este sistema no se limita únicamente a la reducción del tiempo necesario para realizar la tarea. También tiene un impacto significativo en la seguridad del trabajador. En caso de que ocurra un accidente, los tiempos indirectos que se pierden son considerables. Por ejemplo, se ve afectado el tiempo del personal no accidentado, como supervisores y compañeros, quienes deben interrumpir sus tareas para atender la situación. A esto se suma el tiempo requerido para capacitar y adaptar a un reemplazo durante la licencia del operario lesionado, así como el tiempo administrativo que deben invertir supervisores y jefes en el análisis del incidente, la elaboración de informes y la posterior implementación de medidas correctivas. Todo esto repercute también en el retraso de las actividades habituales del turno, afectando la eficiencia general del proceso.

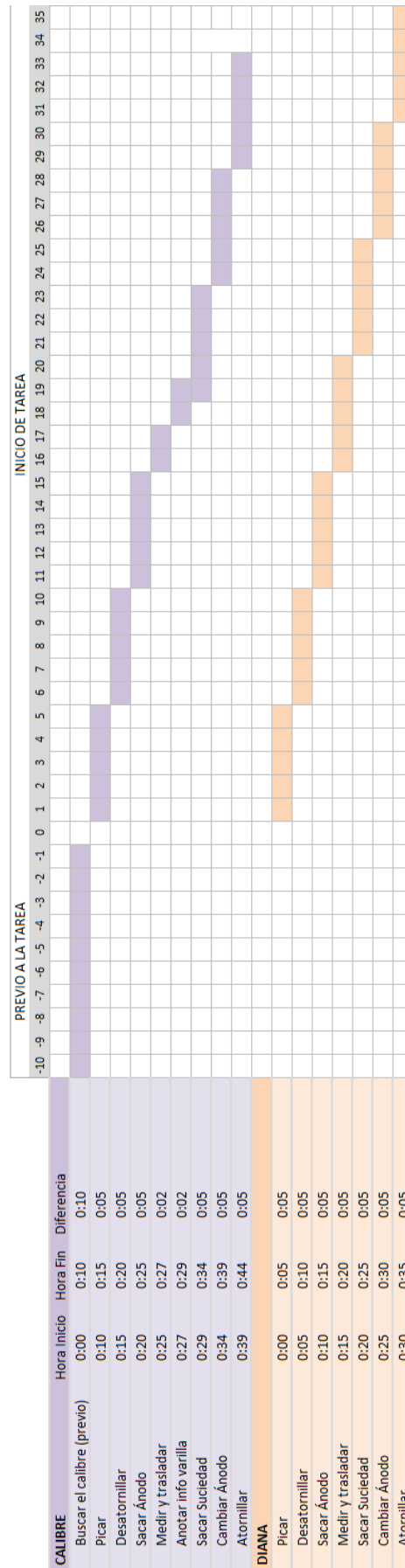


Figura 4.1 Diagrama de Gantt - Mejoras de tiempos

5 RELACIÓN ENTRE VARIABLES

5.1 ANÁLISIS

Se comparan dos gráficos construidos con las mismas variables: caída de tensión anódica, voltaje de marcha y corriente (Figura 5.1 y 5.2). La diferencia entre ambos radica en la base de datos utilizada: la Figura 5.1 presenta un gráfico titulado "Relación Medición Anódica, Voltaje de Marcha y Corriente" corresponde al conjunto a la base de datos "mediciones de comparación", mientras la Figura 5.2 presenta un gráfico titulado "Relación Medición Anódica, Voltaje de Marcha y Corriente - VALIDACIÓN" corresponde a las "mediciones de validación". Ambos gráficos muestran, para diferentes ubicaciones de celdas, tres variables claves: la caída de tensión anódica (en mV), el voltaje de marcha (en mV) y la corriente (en kA).

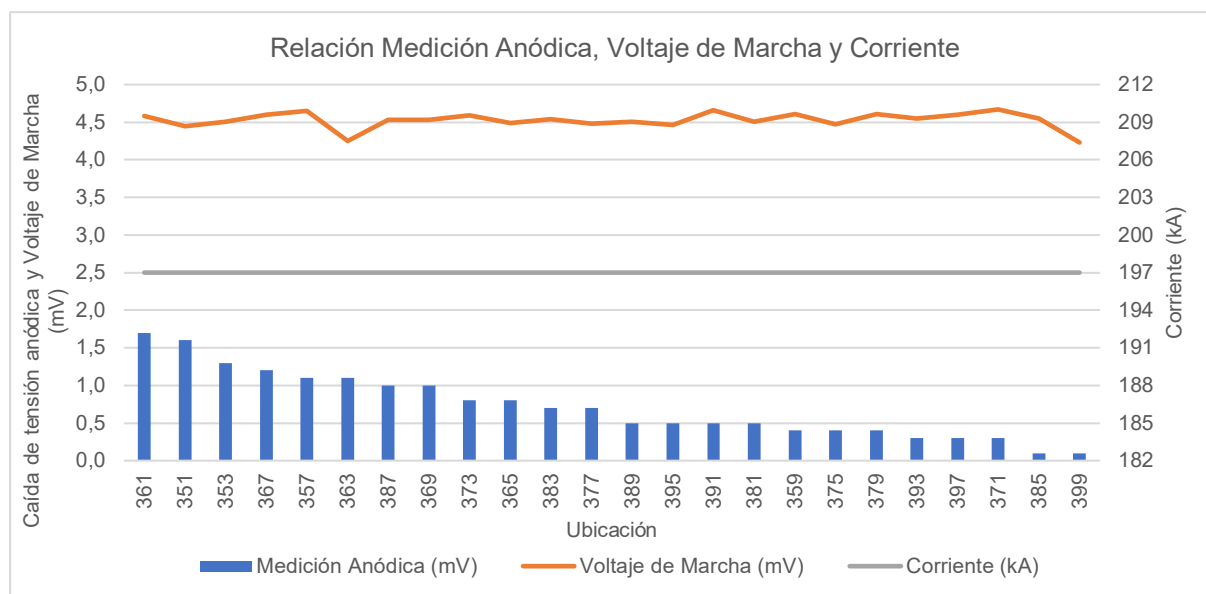


Figura 5.1 Relación entre variables utilizando las mediciones de comparación. La línea naranja representa el voltaje de marcha, la línea gris representa la corriente y las barras representan las mediciones anódicas realizadas.

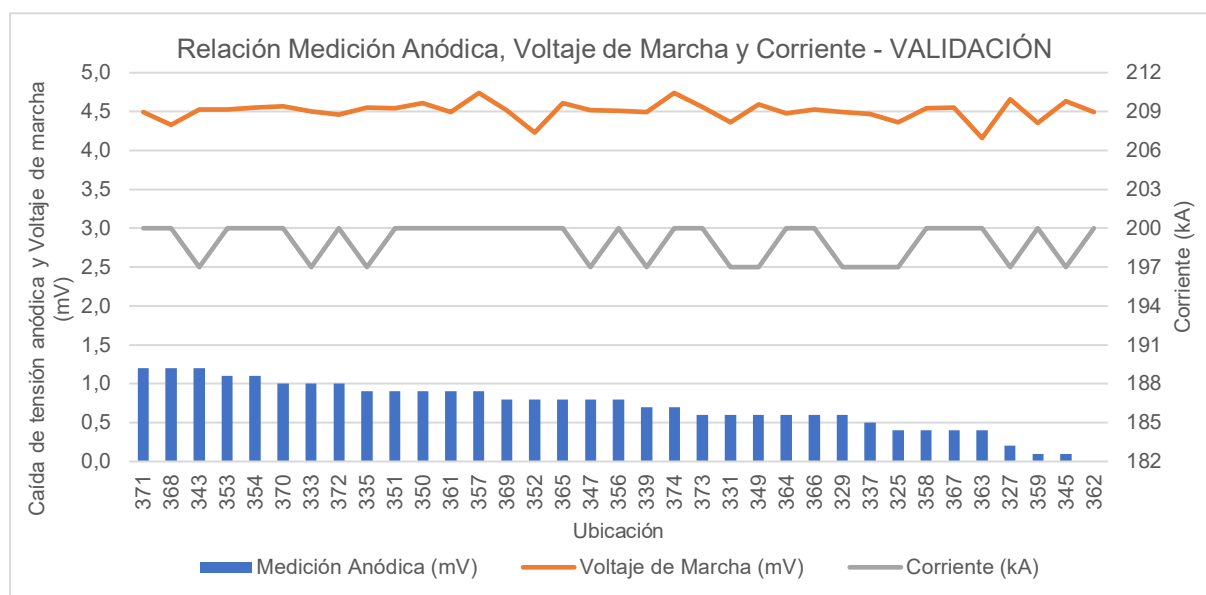


Figura 5.2 Relación entre variables utilizando las mediciones de validación. La línea naranja representa el voltaje de marcha, la línea gris representa la corriente y las barras representan las mediciones anódicas realizadas.

El análisis se centra en una misma sala de electrólisis, seleccionando el momento correspondiente a la hora 72, ya que se considera que, a partir de ese punto, la celda se encuentra estabilizada tras los cambios operativos aplicados. Esta comparación permite observar la reproducibilidad del comportamiento del sistema bajo condiciones estables, y verificar si las tendencias de medias identificadas en el análisis inicial se sostienen una vez implementado el método en condiciones reales. A continuación, se explican las relaciones que se analizaron a partir de las Figuras 5.1 y 5.2:

- Medición anódica vs. Voltaje de marcha (Figura 5.1): no se observa una relación proporcional. La caída de tensión anódica puede interpretarse como una componente específica del voltaje de marcha, relacionada principalmente con la resistencia de contacto del ánodo. Sin embargo, la relativa constancia del voltaje de marcha sugiere que el sistema compensa o mantiene estables las condiciones generales de operación.
- Medición anódica vs. Voltaje de marcha (Figura 5.2): no se evidencia una relación directamente proporcional. La caída de tensión anódica muestra una disminución progresiva en función de la ubicación, mientras que el voltaje de marcha permanece relativamente estable, con pequeñas oscilaciones. Esto sugiere que, si bien la medición anódica representa una porción del voltaje total de la celda, el sistema en su conjunto compensa dichas variaciones locales para mantener constante el voltaje de operación, lo que es coherente con un control robusto del proceso.
- Medición anódica vs. Corriente (Figura 5.1): La caída de tensión anódica no se ve afectada directamente por la corriente, ya que ésta se mantiene constante por determinaciones operativas. Pero las diferencias de voltaje reflejan condiciones particulares de operación o desgaste del ánodo o inconvenientes en la celda.
- Medición anódica vs. Corriente (Figura 5.2): La corriente se mantiene estable en torno a los 197 kA a lo largo de toda la muestra, sin verse afectada por las variaciones en la caída de tensión anódica. Esto confirma que la corriente en las celdas está regulada de forma independiente respecto a las condiciones puntuales de contacto del ánodo. Las variaciones observadas en la medición anódica reflejan diferencias en el estado físico del contacto eléctrico, pero no tienen un impacto directo sobre la magnitud de la corriente, como era de esperarse en una operación estabilizada.
- Voltaje de marcha vs. Corriente (Figura 5.1): Se observa un desacoplamiento claro entre estas variables. La corriente no fluctúa, mientras que el voltaje sí muestra pequeñas variaciones. Esto puede deberse a pequeños ajustes en la resistencia total de la celda (por contacto, temperatura, etc.), sin afectar la corriente global, que está regulada.
- Voltaje de marcha vs. Corriente (Figura 5.2): El voltaje de marcha presenta pequeñas fluctuaciones (en el rango de los 4,3 a 4,6 mV), mientras que la corriente se mantiene constante. Esta falta de correlación directa evidencia que el sistema está diseñado para absorber leves variaciones de resistencia sin alterar el régimen de corriente. Estas pequeñas diferencias en el voltaje de marcha pueden deberse a ajustes operativos menores, condiciones de temperatura local, o el desgaste de componentes, pero no comprometen la estabilidad del proceso electroquímico.

5.2 CONCLUSIONES

Se observa que no existe una dependencia directa entre las tres variables analizadas, lo que evidencia la influencia de otros factores sobre la medición anódica. Estas variables adicionales podrían ser objeto de estudio en futuros trabajos, con el fin de comprender más profundamente los fenómenos que afectan la caída de tensión en los ánodos.

6 CONCLUSIONES FINALES

En este trabajo se llevó a cabo un análisis comparativo entre el método tradicional de medición (CALIBRE) y el nuevo sistema automatizado (DIANA), con el objetivo de evaluar su validez, precisión y contribución a la eficiencia operativa en el proceso de cambio de ánodos. Mediante la validación experimental y el estudio estadístico de la dispersión de los datos, se comprobó que el DIANA no solo es técnicamente equivalente al CALIBRE, sino que también ofrece ventajas significativas en términos de repetibilidad y menor variabilidad, especialmente en mediciones prolongadas.

El análisis de los gráficos de cajas y bigotes evidenció que las mediciones obtenidas con DIANA presentan una menor dispersión en comparación con las realizadas con CALIBRE, particularmente cuando se considera que la cuba, luego del cambio, está estable operativamente (48 h y 72 h). Esto indica una mayor precisión en la estimación del desgaste del ánodo. Además, la identificación de valores atípicos mostró que el método con CALIBRE tiende a generar más desviaciones fuera del rango esperado, lo que sugiere la posible influencia de errores humanos o inconsistencias en la técnica de medición.

El análisis estadístico de los datos obtenidos, mediante el uso de CALIBRE, evidenció que los límites de control vigentes no representaban adecuadamente la situación operativa de la sala. Esta situación resulta crítica, considerando la relevancia del control realizado por los operadores tras el cambio de ánodos. En consecuencia, se propusieron nuevos límites de control más representativos del comportamiento real del proceso.

La validación de ambos métodos confirmó que DIANA proporciona resultados confiables, dentro de los márgenes adecuados para su implementación en campo. Su incorporación no solo reduce la necesidad de intervención directa del operador, disminuyendo la exposición a zonas de riesgo, sino que también mejora significativamente la seguridad del personal. Este impacto se visualiza claramente en el diagrama de Gantt, donde se evidencia la reducción del tiempo de permanencia en el área de trabajo y la minimización de riesgos asociados a tareas manuales repetitivas o de difícil acceso.

Por otro lado, el análisis gráfico histórico demuestra que los límites propuestos reflejan con mayor precisión el comportamiento real del proceso. Su aplicación permite un aumento en la proporción de mediciones dentro del rango de control y una reducción de las desviaciones, tanto por exceso como por defecto, validando su utilidad como una mejora operativa frente a los límites establecidos en el instructivo vigente.

Desde una perspectiva operativa, la adopción del sistema DIANA supone una mejora sustancial en la eficiencia del proceso. La reducción del tiempo de medición por celda, junto con la eliminación de tareas manuales adicionales como el registro o el transporte de herramientas, representa un beneficio tangible en términos de costos y productividad. Asimismo, ante la eventualidad de un accidente, la menor exposición al riesgo contribuye a mitigar los tiempos indirectos asociados a la gestión de incidentes, como la reestructuración del equipo o el análisis de causas.

En conclusión, la implementación de DIANA en sustitución del CALIBRE no solo se justifica desde un enfoque técnico y estadístico, sino que también representa una mejora concreta en la eficiencia operativa, la seguridad industrial y la modernización del proceso. Este estudio respalda la viabilidad del cambio con evidencia experimental y análisis sistemático, proponiendo una alternativa que optimiza el desempeño y acompaña la evolución tecnológica en la industria de producción de aluminio.

7 BIBLIOGRAFÍA

ALUAR SAIC. (2023-2024). *Informe Sostenibilidad*. Puerto Madryn.

ALUAR SAIC. (2025). *Capacitaciones*. Puerto Madryn.

ALUAR SAIC. (2025). *División Primario*. Obtenido de <https://www.aluar.com.ar/seccion/division-primario/4/8>

ALUAR SAIC. (2025). *Procesos Productivo*. Obtenido de <https://www.aluar.com.ar/seccion/proceso-productivo/43/63>

B. J Welch y co-autores. (2001). *Aluminium Smelter Technology – Theory and Practice*. Australia.

Enciclopedia Química (2025). (s.f.). Obtenido de https://www.quimica.es/enciclopedia/Proceso_Bayer.html

Grjotheim, K., & Kvande, H. (1993). *Introduction to Aluminium Electrolysis*. Aluminium - Verlag.

J.P Sancho Martinez, K. G. (1994). *La Metalurgia del Aluminio*. Aluminium-Verlag.

Paul Héroult and Charles Hall – Turning a rarity into a commodity. (Consulta: Mayo 2025). Obtenido de *The Chemical Engineer* (2013): <https://www.thechemicalengineer.com/features/cewctw-paul-h%C3%A9roult-and-charles-hall-turning-a-rarity-into-a-commodity/>

Production of aluminum: The Hall–Héroult process. (Consulta: Mayo 2025). Obtenido de American Chemical Society: <https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/aluminumprocess.html>

Ruiz-Falco Rojas, A. (2006). *Control de procesos estadísticos*. Universidad Pontificada de Madrid.

The Aluminium Story (2023). (Consulta: Mayo 2025). Obtenido de Production Process: Power Generation: <https://thealuminiumstory.com/primary-production/power-generation/>

The Aluminium Story (2023). (Consulta: Mayo 2025). Obtenido de Facts: Raw Materials: <https://thealuminiumstory.com/primary-production/raw-materials/>

8 ANEXO I

Tabla 1 Tabla de coeficientes en función de la población de datos. Fuente: (Ruiz-Falco Rojas, 2006)

TABLA DE COEFICIENTES																		
n	A	A ₁	A ₂	A ₃	c ₂	c ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	d ₂	d ₃	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
2	2.121	3.760	1.880	2.659	0.5642	0.7979	0	1.943	0	3.267	0	2.606	1.128	0.853	0	3.686	0	3.267
3	1.732	2.394	1.023	1.954	0.7236	0.8862	0	1.858	0	2.568	0	2.276	1.693	0.888	0	4.358	0	2.575
4	1.500	1.880	0.729	1.628	0.7979	0.9213	0	1.808	0	2.266	0	2.088	2.059	0.880	0	4.698	0	2.282
5	1.342	1.596	0.577	1.427	0.8407	0.9400	0	1.756	0	2.089	0	1.964	2.326	0.864	0	4.918	0	2.115
6	1.225	1.410	0.483	1.287	0.8686	0.9515	0.026	1.711	0.030	1.970	0.029	1.874	2.584	0.848	0	5.078	0	2.004
7	1.134	1.277	0.419	1.182	0.8882	0.9594	0.105	1.672	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.833	0.205	5.203	0.076	1.925
8	1.061	1.175	0.373	1.099	0.9027	0.9650	0.167	1.638	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.820	0.387	5.307	0.136	1.864
9	1.000	1.094	0.337	1.032	0.9139	0.9693	0.219	1.609	0.239	1.761	.232	1.707	2.970	0.808	0.546	5.394	0.184	1.816
10	0.949	1.028	0.308	0.975	0.9227	0.9727	0.262	1.584	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.797	0.687	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.973	0.285	0.927	0.9300	0.9754	0.299	1.561	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.787	0.812	5.534	0.256	1.744
12	0.866	0.925	0.266	0.886	0.9359	0.9776	0.332	1.541	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.778	0.924	5.592	0.284	1.716
13	0.832	0.884	0.249	0.850	0.9410	0.9794	0.359	1.523	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.770	1.026	5.646	0.308	1.692
14	0.802	0.848	0.235	0.817	0.9453	0.9810	0.384	1.507	0.406	1.594	0.399	1.563	3.407	0.762	1.121	5.693	0.329	1.671
15	0.775	0.816	0.223	0.789	0.9490	0.9823	0.406	1.492	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.755	1.207	5.737	0.348	1.652
16	0.750	0.788	0.212	0.763	0.9523	0.9835	0.427	1.478	0.448	1.552	0.440	1.526	3.532	0.749	1.285	5.779	0.364	1.636
17	0.728	0.762	0.203	0.739	0.9551	0.9845	0.445	1.465	0.466	1.534	0.458	1.511	3.588	0.743	1.359	5.817	0.379	1.621
18	0.707	0.738	0.194	0.718	0.9576	0.9854	0.461	1.454	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.738	1.426	5.854	0.392	1.608
19	0.688	0.717	0.187	0.698	0.9599	0.9862	0.477	1.443	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.733	1.490	5.888	0.404	1.596
20	0.671	0.697	0.180	0.680	0.9619	0.9869	0.491	1.433	0.510	1.490	0.504	1.470	3.735	0.729	1.548	5.922	0.414	1.586
21	0.655	0.679	0.173	0.663	0.9630	0.9876	0.504	1.424	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.724	1.606	5.950	0.425	1.575
22	0.640	0.662	0.167	0.647	0.9655	0.9882	0.516	1.415	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.720	1.659	5.979	0.434	1.566
23	0.626	0.647	0.162	0.633	0.9670	0.9887	0.527	1.407	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.716	1.710	6.006	0.443	1.557
24	0.612	0.632	0.157	0.619	0.9684	0.9892	0.538	1.399	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.712	1.759	6.031	0.452	1.548
25	0.600	0.619	0.153	0.606	0.9696	0.9896	0.548	1.392	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.709	1.804	6.058	0.459	1.541
>25	3/√n	3/√n	...	...	...	...	1-3/√2n	1+3/√2n	1-3/√2n	1+3/√2n	...	...	...	...	...	...	...	...