

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES CIANURADOS POR OXIDACIÓN DEL ION CIANURO CON AIRE Y CARBÓN ACTIVADO MODIFICADO CON COBRE Y PLATA

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO**

HUGO EDUARDO CASTILLO VITERI
hugocastilloviteri@gmail.com

DIRECTOR: ING. ERNESTO DE LA TORRE CH. MSc.
ernesto.delatorre@epn.edu.ec

Quito, Noviembre 2013

© Escuela Politécnica Nacional 2013
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Hugo Eduardo Castillo Viteri, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Hugo Eduardo Castillo Viteri

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Hugo Eduardo Castillo Viteri, bajo mi supervisión.

Ing. Ernesto de la Torre Ch.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto Semilla – EPN PIS 01-2010 “Evaluación del comportamiento en la pirolisis e incineración de materiales sólidos de desecho mediante hornos de atmósfera controlada”, que se ejecuta en el Departamento de Metalurgia Extractiva, de la Facultad e Ingeniería Química y Agroindustria.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo no habría podido terminarse sin la intervención de muchas personas que me ayudaron de muchas maneras, todos ellos han aportado su granito de arena o una verdadera montaña y por eso merecen que se los mencione.

En primer lugar debo agradecer a mi madre por haber estado siempre conmigo durante toda mi carrera universitaria, ella siempre me brindo su amor y comprensión, es una mujer maravillosa por quien yo guardo la más profunda admiración.

También tengo que agradecerle a mi padre por sus consejos y su apoyo incondicional, ha sido además de padre un buen amigo que siempre estuvo pendiente de mí.

A mi hermana Karen que me ha dado un gran ejemplo de estudio y dedicación, ella se merece todo lo mejor por lo buena hermana que es.

A mi abuelito Hugo quien ha sido como un segundo padre para mí, siempre dispuesto ayudarme y ver que nunca me faltara nada. Estaré eternamente agradecido por su bondad y generosidad.

A Narcí que siempre me ha cuidado desde que yo era un niño. Ella al igual que todos los de mi casa quienes quieren siempre que yo esté bien y que crezca como persona y profesional.

No puedo dejar de mencionar a la gente que trabaja en el lugar que fue como mi segunda casa mientras yo realizaba este trabajo. Ellos son todo el personal del DEMEX, conformado por el Ingeniero Ernesto de la Torre, la Ingeniera Alicia Guevara, Doña Magy, el Ingeniero Lozada, Evelyn, Doña Vero y Don Klever. Muchas gracias a ustedes por toda la ayuda brindada desde que yo era un estudiante. Ustedes son una familia, y yo los aprecio mucho; pasé muy agradables momentos mientras trabajaba junto a ustedes.

Finalmente no puedo dejar de mencionar a grandes mis amigos de la facultad: Pépe Lucho, Santiago, Nelson, Vivi, Rody, Carly, Danilo, Fidel, Tefi, Oveja, Toper y espero no olvidarme de nadie. A todos ustedes gracias por tantas horas que hemos compartido juntos. Sepan que me hace muy contento ser su amigo y que espero seguir manteniendo esta gran amistad, todos han demostrado ser grandes amigos.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado:

A todas esas personas que creen en sus sueños y luchan por alcanzarlos.

A todos los que no tienen miedo de dar su opinión y saben respetar la de los demás.

A todos quienes están dispuestos a ofrecer una amistad sincera y duradera.

A todos quienes estén para servir a los demás y no para servirse de los demás.

“Puede que lo que hacemos no traiga siempre la felicidad, pero si no hacemos nada, no habrá felicidad.”

Albert Camus

ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA
RESUMEN	xvii
INTRODUCCIÓN	xix
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Química del cianuro	1
1.1.1 Cianuro	1
1.1.1.1 Cianuro de hidrógeno	2
1.1.1.2 Cianuro libre	3
1.1.1.3 Cianuro total	4
1.1.2 Compuestos simples de cianuro	4
1.1.3 Complejos metálicos de cianuro	5
1.1.3.1 Complejos de cianuro débiles y moderadamente fuertes	6
1.1.3.2 Complejos de cianuro fuertes	7
1.1.4 Tiocianato	8
1.2 Métodos de tratamiento de efluentes cianurados	9
1.2.1 Métodos físicos	9
1.2.1.1 Dilución	10
1.2.1.2 Membranas	10
1.2.1.3 Electrowinning	10
1.2.1.4 Hidrólisis y destilación	11
1.2.2 Métodos de formación de complejos cianurados	12
1.2.2.1 Acidificación y volatilización	12
1.2.2.2 Adición de metales	13
1.2.2.3 Extracción por solventes	14
1.2.3 Métodos de adsorción	15
1.2.3.1 Adsorción con minerales	15
1.2.3.2 Adsorción con carbón activado	16
1.2.3.3 Adsorción con resinas	17
1.2.4 Métodos oxidativos	18
1.2.4.1 Catálisis	18
1.2.4.2 Electrólisis	19
1.2.4.3 Bio-oxidación	20
1.2.4.4 Oxígeno	22
1.2.4.5 Ozono	23
1.2.4.6 Peróxido de hidrógeno	24
1.2.4.7 Ácido peroximonosulfúrico o ácido de Caro	25
1.2.4.8 Cloración alcalina	26
1.2.4.9 Dióxido de azufre y aire	28
1.2.5 Fotólisis	29
1.3 Influencia del carbón activado, cobre y plata en la oxidación del cianuro	30
1.3.1 Carbón activado en la oxidación del cianuro	30
1.3.2 Cobre en la oxidación del cianuro	32
1.3.3 Plata en la oxidación del cianuro	34

1.4	Electrodeposición de cobre	36
1.4.1	Deposición electroquímica	36
1.4.2	Celda electrolítica	36
1.4.3	Proceso de electrodeposición	37
1.4.4	Efecto de la forma geométrica del objeto sometido a electrodeposición	39
1.4.5	Carbón como sustrato para electrodeposición	39
2.	METODOLOGÍA	42
2.1	Impregnación de nitrato de cobre y nitrato de plata en carbón activado	44
2.1.1	Lavado del carbón activado	44
2.1.2	Impregnación de nitrato cúprico y nitrato de plata	45
2.2	Electrodeposición de cobre sobre carbón activado	46
2.2.1	Electrodos para electrodeposición de cobre sobre carbón activado	46
2.2.2	Ensayos de electrodeposición de cobre sobre carbón activado	50
2.2.3	Obtención de resultados de los ensayos de electrodeposición	51
2.3	Oxidación de cianuro en soluciones y efluentes cianurados con carbón activado modificado, a nivel laboratorio y planta piloto	52
2.3.1	Ensayos en planta piloto de oxidación de cianuro con aire y carbón activado sin modificar y carbón activado impregnado	52
2.3.2	Medición de la concentración de cianuro libre con el electrodo selectivo para cianuro	55
2.3.3	Ensayos en laboratorio de oxidación de cianuro con aire y carbón activado con cobre electrodepositado	56
2.4	Diseño de un proceso para la oxidación de cianuro en los efluentes tratados	57
2.5	Evaluación de costos de implementación de la planta diseñada	59
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
3.1	Oxidación de cianuro libre presente en soluciones sintéticas a escala piloto	60
3.1.1	Carbón activado en la oxidación de cianuro en soluciones sintéticas a escala piloto	60
3.1.2	Carbón activado impregnado con nitrato cúprico en la oxidación de cianuro en soluciones sintéticas a escala piloto	64
3.1.2.1	Efecto de la concentración de carbón activado impregnado con nitrato cúprico	65
3.1.2.2	Reutilización de carbón activado impregnado con nitrato cúprico	67
3.1.3	Carbón activado impregnado con nitrato de plata en la oxidación de cianuro en soluciones sintéticas a escala piloto	70
3.1.3.1	Comparación del uso de carbón activado impregnado con nitrato cúprico y carbón activado impregnado con nitrato de plata	71

3.1.3.2	Reutilización de carbón activado impregnado con nitrato de plata	72
3.2	Oxidación de cianuro libre en efluentes de cianuración a escala piloto	74
3.3	Electrodeposición de cobre en carbón activado	77
3.3.1	Electrodeposición con electrodo tipo escoba	78
3.3.1.1	Pruebas preliminares	78
3.3.1.2	Pruebas definitivas	79
3.3.2	Electrodeposición con electrodo tipo placa	81
3.3.2.1	Pruebas preliminares	81
3.3.2.2	Pruebas definitivas	84
3.4	Influencia del carbón activado con cobre electrodepositado en la oxidación de cianuro en soluciones sintéticas	85
3.4.1	Efecto de la concentración de carbón activado con cobre electrodepositado	86
3.4.2	Comparación entre carbón activado con cobre electrodepositado y otras variantes de carbón activado en la oxidación de cianuro	89
3.4.3	Reciclos de carbón activado con cobre electrodepositado	94
3.4.4	Oxidación de cianuro en efluentes reales con carbón activado con cobre electrodepositado	96
3.5	Cinéticas de remoción de cianuro	98
3.6	Diseño de una planta de tratamiento de efluentes cianurados	101
3.6.1	Funcionamiento de la planta	101
3.6.2	Diagrama de flujo de proceso (PFD)	104
3.6.3	Diagrama de instrumentación y tuberías (PID)	104
3.6.4	Equipos en planta y su distribución	105
3.6.5	Evaluación económica	111
3.6.5.1	Inversión	111
3.6.5.2	Costos de producción	113
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
4.1.	Conclusiones	115
4.2.	Recomendaciones	117
	BIBLIOGRAFÍA	118
	ANEXOS	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	Clasificación de los compuestos de cianuro presentes en solución	1
Tabla 1.2.	Propiedades de los compuestos simples de cianuro	5
Tabla 1.3.	Complejos cianuro-metálicos débiles y moderadamente fuertes en orden descendente de estabilidad en agua	6
Tabla 1.4.	Complejos cianuro-metálicos fuertes en orden descendente de estabilidad en agua	7
Tabla 1.5.	Efecto del tamaño de partícula en la adsorción de cianuro en carbón activado granular	17
Tabla 1.6.	Rutas de degradación del cianuro por bio-oxidación	21
Tabla 1.7.	Propiedades físicas del ácido de Caro	25
Tabla 3.1.	Resultados de los tratamientos oxidación de cianuro con carbón activado en soluciones sintéticas de NaCN	64
Tabla 3.2.	Resultados de los tratamientos oxidación de cianuro con carbón activado impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en soluciones sintéticas de NaCN	67
Tabla 3.3.	Resultados de los tratamientos de reutilización de carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en soluciones sintéticas de NaCN	69
Tabla 3.4.	Porcentaje de cobre en la superficie del carbón impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ después de cada ensayo de reutilización	69
Tabla 3.5.	Resultados de los tratamientos de reutilización de carbón activado impregnado con AgNO_3 en soluciones sintéticas de NaCN	73
Tabla 3.6.	Porcentaje de plata en la superficie del carbón impregnado con AgNO_3 después de cada ensayo de reutilización	73
Tabla 3.7.	Concentraciones de cianuro libre y metales en el efluente, al inicio y al final del tratamiento	74
Tabla 3.8.	Resumen de las pruebas preliminares de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo escoba y 10 cm de distancia entre electrodos	78
Tabla 3.9.	Resumen de las pruebas preliminares de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo escoba y 5 cm de distancia entre electrodos	79

Tabla 3.10.	Resumen de las pruebas definitivas de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo escoba y 5 cm de distancia entre electrodos	80
Tabla 3.11.	Resumen de las pruebas preliminares de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo placa y 10 cm de distancia entre electrodos	82
Tabla 3.12.	Resumen de las pruebas preliminares de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo placa y 5 cm de distancia entre electrodos	83
Tabla 3.13.	Resumen de las pruebas definitivas de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo placa y 5 cm de distancia entre electrodos	84
Tabla 3.14.	Resultados de los tratamientos de oxidación de cianuro en soluciones sintéticas a diferentes concentraciones de carbón activado con cobre electrodepositado	89
Tabla 3.15.	Resultados de los tratamientos de oxidación de cianuro en soluciones sintéticas con diversos tipos de catalizadores de carbón activado modificado	93
Tabla 3.16.	Resultados de los tratamientos de reutilización de carbón activado con cobre electrodepositado (C.A.E.) en soluciones sintéticas de NaCN	95
Tabla 3.17.	Pérdida de peso de carbón y porcentaje de cobre presente en el carbón activado con cobre electrodepositado (C.A.E.) después de cada ensayo de reutilización	96
Tabla 3.18.	Concentraciones de cianuro libre y metales en el efluente, al inicio y al final del tratamiento	97
Tabla 3.19.	Resultados de la cinética de primer orden para los ensayos de oxidación de cianuro en planta piloto	99
Tabla 3.20.	Resultados de la cinética de primer orden para los ensayos de oxidación de cianuro en pruebas de laboratorio	100
Tabla 3.21.	Resumen global del balance de masa del tratamiento de agua con 0,5 g/L de cianuro libre (1250 kg/batch)	102
Tabla 3.22.	Nomenclatura de equipos y áreas de la planta	109
Tabla 3.23.	Lista de equipos distribuidos por áreas	110
Tabla 3.24.	Datos generales de la planta	111

Tabla 3.25.	Inversión en equipos	112
Tabla 3.26.	Costos directos, costos indirectos, inversión fija y capital de trabajo	112
Tabla 3.27.	Costos de producción	114
Tabla 3.28.	Requerimiento de materias primas y servicios industriales	114
Tabla 3.29.	Fuerza laboral	114
Tabla AV.1.	Datos de intensidad de corriente para el ensayo de electrodeposición del ejemplo de cálculo	133
Tabla AVI.1.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 1	136
Tabla AVI.2.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 2	137
Tabla AVI.3.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 3	138
Tabla AVI.4.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 4	139
Tabla AVI.5.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 5	140
Tabla AVI.6.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 6	141
Tabla AVI.7.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 7	142
Tabla AVI.8.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 8	143
Tabla AVI.9.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 9	144
Tabla AVI.10.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 10	145
Tabla AVI.11.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 11	146
Tabla AVI.12.	Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 12	147

Tabla AVI.13. Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 13	148
Tabla AVI.14. Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 14	149
Tabla AVI.15. Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 15	150
Tabla AVI.16. Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 16	151
Tabla AVI.17. Datos de potencial y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 17	152
Tabla AVI.18. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 1	153
Tabla AVI.19. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 2	153
Tabla AVI.20. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 3	154
Tabla AVI.21. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 4	154
Tabla AVI.22. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°5	155
Tabla AVI.23. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°6	155
Tabla AVI.24. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°7	156
Tabla AVI.25. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°8	156
Tabla AVI.26. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°9	157
Tabla AVI.27. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°10	157
Tabla AVI.28. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°11	158

Tabla AVI.29. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°12	158
Tabla AVI.30. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°13	159
Tabla AVI.31. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°14	159
Tabla AVI.32. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°15	160
Tabla AVI.33. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°16	160
Tabla AVI.34. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°17	161
Tabla AVI.35. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°18	161
Tabla AVI.36. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°19	162
Tabla AVI.37. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°20	162
Tabla AVI.38. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°21	163
Tabla AVI.39. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 18	164
Tabla AVI.40. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 19	165
Tabla AVI.41. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 20	166
Tabla AVI.42. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 21	167
Tabla AVI.43. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 22	168
Tabla AVI.44. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 23	169

Tabla AVI.45. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 24	170
Tabla AVI.46. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 25	171
Tabla AVI.47. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 26	172
Tabla AVI.48. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 27	173
Tabla AVI.49. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 28	174
Tabla AVI.50. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 29	175
Tabla AVI.51. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 30	176
Tabla AVI.52. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 31	177
Tabla AVI.53. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 32	178
Tabla AVI.54. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 33	179
Tabla AVII.1. Especificaciones técnicas de los tanques de oxidación (del R-101 al R-112)	180
Tabla AVII.2. Especificaciones técnicas de los tanques de tratamiento de agua por tratar y agua tratada (TK-101 y TK-102)	181
Tabla AVII.3. Especificaciones técnicas del tanque de almacenamiento de agua tratada (TK-201)	181
Tabla AVIII.1. Factores para cálculo de costos sobre la inversión de equipos	182
Tabla AIX.1. Consideraciones del diseño de equipos	186
Tabla AIX.2. Especificaciones de los tubos para las patas de los tanques	191

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Diagrama de la dependencia del pH en el equilibrio entre el ion cianuro y el cianuro de hidrógeno	3
Figura 1.2.	Diagrama potencial – pH (E_h -pH) para el sistema CN^- - H_2O a 25 °C	22
Figura 1.3.	Representación de la cinética de la oxidación de cianuro con aire y catalizada con carbón activado.	32
Figura 1.4.	Remoción de cianuro de una solución utilizando carbón activado impregnado con cobre (AC – Cu) a concentraciones desde 0,2 a 4,5 g/L	34
Figura 1.5.	Remoción de cianuro de una solución utilizando carbón activado impregnado con plata (AC – Ag) a concentraciones desde 0,2 a 4,5 g/L	35
Figura 1.6.	Esquema de una celda electrolítica	37
Figura 1.7.	Diagrama de la estructura del diamante que muestra la disposición de los átomos de carbono	40
Figura 1.8.	Diagrama de la estructura del grafito que muestra la disposición de los átomos de carbono	41
Figura 2.1.	Diagrama general de la metodología seguida en el proyecto	43
Figura 2.2.	Lavado y selección del carbón activado para impregnación	44
Figura 2.3.	Impregnación del carbón activado con nitrato cúprico o nitrato de plata	46
Figura 2.4.	Electrodo tipo escoba utilizado en las pruebas de electrodeposición	47
Figura 2.5.	Electrodo tipo placa utilizado en las pruebas de electrodeposición	48
Figura 2.6.	Cátodo para electrodeposición conformado por la placa de acero y el carbón activado en la funda de malla plástica	49
Figura 2.7.	Placa de cobre que constituyó el ánodo para la electrodeposición	49
Figura 2.8.	Esquema de la celda electrolítica usada para electrodeposición de cobre sobre carbón activado	51
Figura 2.9.	Difusor de aire elaborado para la base del tanque de oxidación	53

Figura 2.10.	Esquema de la oxidación de cianuro con aire y carbón activado a escala de planta piloto	54
Figura 2.11.	Medición de concentración de cianuro usando el electrodo selectivo	55
Figura 2.12.	Vista del interior del recipiente usado como reactor para la oxidación de cianuro a menor escala en el laboratorio	56
Figura 3.1.	Influencia de la concentración de carbón activado en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto $[\text{NaCN}]_0=1,0 \text{ g/L}$	60
Figura 3.2.	Influencia de la concentración de carbón activado en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto $[\text{NaCN}]_0=0,5 \text{ g/L}$	62
Figura 3.3.	Carbón activado impregnado con nitrato cúprico (2,4 – 4,7 mm)	64
Figura 3.4.	Influencia de la concentración de carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto $[\text{NaCN}]_0=1,0 \text{ g/L}$	65
Figura 3.5.	Influencia de la concentración de carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto $[\text{NaCN}]_0=0,5 \text{ g/L}$	66
Figura 3.6.	Efecto de la reutilización de carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto	68
Figura 3.7.	Carbón activado impregnado con nitrato de plata (2,4 – 4,7 mm)	70
Figura 3.8.	Diagrama comparativo del uso de C.A. impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y C.A. impregnado con AgNO_3	71
Figura 3.9.	Efecto de la reutilización de carbón activado impregnado con AgNO_3 en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto	72
Figura 3.10.	Oxidación de efluente real de cianuración con aire y carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ a escala planta piloto	75
Figura 3.11.	Continuación de la oxidación de efluente real de cianuración presentado en la Figura 3.7 con aire y nuevo carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ a escala planta piloto	75
Figura 3.12.	Carbón activado con cobre electrodepositado (2,4 – 4,7 mm)	85
Figura 3.13.	Influencia de la concentración de carbón activado con cobre electrodepositado en la oxidación de cianuro libre a escala de laboratorio $[\text{NaCN}]_0=1,0 \text{ g/L}$	86

Figura 3.14.	Influencia de la concentración de carbón activado con cobre electrodepositado en la oxidación de cianuro libre a escala de laboratorio $[\text{NaCN}]_0=0,5 \text{ g/L}$	88
Figura 3.15.	Influencia del uso de carbón activado (C.A.) y carbón activado con cobre electrodepositado (C.A.E.) en la oxidación de cianuro presente en soluciones sintéticas	90
Figura 3.16.	Influencia del uso de carbón activado impregnado (C.A.I.) con nitrato cúprico y carbón activado con cobre electrodepositado (C.A.E.) en la oxidación de cianuro presente en soluciones sintéticas	91
Figura 3.17.	Influencia del uso de carbón activado impregnado (C.A.I.) con nitrato de plata y carbón activado con cobre electrodepositado (C.A.E.) en la oxidación de cianuro presente en soluciones sintéticas	92
Figura 3.18.	Reutilización del carbón activado con cobre electrodepositado para la oxidación de cianuro presente en soluciones sintéticas de 265 ppm de concentración inicial	94
Figura 3.19.	Oxidación de cianuro en efluente real con aire y carbón activado con cobre electrodepositado a escala de laboratorio	97
Figura 3.20.	Comparación de la cinética de la oxidación de cianuro con carbón activado sin modificar (C.A.), carbón activado impregnado (C.A.I.) y electrodepositado (C.A.E.) al aplicar el modelo de primer orden	98
Figura 3.21.	Diagrama de bloques del proceso de oxidación de cianuro a realizarse en la planta propuesta	102
Figura 3.22.	Diagrama de flujo de proceso (PFD) de la planta de tratamiento de efluentes cianurados	106
Figura 3.23.	Diagrama de instrumentación y tuberías (PID) de la planta de tratamiento de efluentes cianurados	107
Figura 3.24.	Layout de la planta de tratamiento de efluentes cianurados	108
Figura AII.1.	Curva de calibración del electrodo selectivo de cianuro 9606BNWP IonPlus Cyanide Electrode	127
Figura AVI.1.	Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado (ensayo 1)	136
Figura AVI.2.	Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 80 g/L de carbón activado (ensayo 2)	137

Figura AVI.3. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, sin emplear ningún tipo de carbón activado, únicamente aire (ensayo 3)	138
Figura AVI.4. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado (ensayo 4)	139
Figura AVI.5. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 80 g/L de carbón activado (ensayo 5)	140
Figura AVI.6. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, sin emplear ningún tipo de carbón activado, únicamente aire (ensayo 6)	141
Figura AVI.7. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado impregnado con nitrato cúprico (ensayo 7)	142
Figura AVI.8. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 80 g/L de carbón activado impregnado con nitrato cúprico (ensayo 8)	143
Figura AVI.9. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado impregnado con nitrato cúprico (ensayo 9)	144
Figura AVI.10. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 80 g/L de carbón activado impregnado con nitrato cúprico (ensayo 10)	145
Figura AVI.11. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado impregnado con nitrato cúprico, 2do uso (ensayo 11)	146
Figura AVI.12. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado impregnado con nitrato cúprico, 3er uso (ensayo 12)	147
Figura AVI.13. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado impregnado con nitrato de plata, 1er uso (ensayo 13)	148
Figura AVI.14. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado impregnado con nitrato de plata, 2do uso (ensayo 14)	149
Figura AVI.15. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado impregnado con nitrato de plata, 3er uso (ensayo 15)	150

Figura AVI.16. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de efluente real (ensayo 16)	151
Figura AVI.17. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de efluente real (continuación ensayo 16)	152
Figura AVI.18. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 25 g/L de carbón activado con cobre electrodepositado (ensayo 18)	164
Figura AVI.19. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado con cobre electrodepositado (ensayo 19)	165
Figura AVI.20. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 80 g/L de carbón activado con cobre electrodepositado (ensayo 20)	166
Figura AVI.21. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 25 g/L de carbón activado con cobre electrodepositado (ensayo 21)	167
Figura AVI.22. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado con cobre electrodepositado (ensayo 22)	168
Figura AVI.23. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 80 g/L de carbón activado con cobre electrodepositado (ensayo 23)	169
Figura AVI.24. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado con cobre electrodepositado (ensayo 24)	170
Figura AVI.25. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado (ensayo 25)	171
Figura AVI.26. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado impregnado con nitrato cúprico (ensayo 26)	172
Figura AVI.27. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado impregnado con nitrato cúprico (ensayo 27)	173

- Figura AVI.28.**Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado impregnado con nitrato de plata (ensayo 28) 174
- Figura AVI.29.**Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado impregnado con nitrato de plata (ensayo 29) 175
- Figura AVI.30.**Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado con cobre electrodepositado, 2do uso (ensayo 30) 176
- Figura AVI.31.**Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado con cobre electrodepositado, 3er uso (ensayo 31) 177
- Figura AVI.32.**Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g/L de carbón activado con cobre electrodepositado, 4to uso (ensayo 32) 178
- Figura AVI.33.**Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 g de carbón activado con cobre electrodepositado por litro de efluente real (ensayo 33) 179

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I Determinación del índice de yodo	124
ANEXO II Calibración del electrodo específico de cianuro	126
ANEXO III Determinación de cianuro libre por titulación	128
ANEXO IV Cálculo del contenido metálico del carbón activado a partir de los resultados de absorción atómica de las soluciones de disgregación ácida de las muestras calcinadas	131
ANEXO V Cálculo de la masa electrodepositada teórica y la eficiencia del proceso	133
ANEXO VI Fichas técnicas de los ensayos	136
ANEXO VII Especificaciones técnicas de los equipos	180
ANEXO VIII Factores correspondientes para cálculos de costos sobre la base de la inversión en equipos	182
ANEXO IX Memoria de cálculos de diseño de la planta	183

RESUMEN

Se desarrollaron carbones activados modificados con presencia de nitrato cúprico y nitrato de plata impregnados en su superficie, así como cobre metálico electrodepositado sobre la misma. El carbón activado base tuvo un índice de yodo de 310 mg I₂ / g carbón y un tamaño de partícula comprendido entre 0,25 y 0,47 mm.

Se estudió la influencia de los iones de cobre y plata en la oxidación del ion cianuro presente en soluciones sintéticas de cianuro de sodio y efluentes reales. La oxidación se efectuó en tanques con 100 litros de solución a los cuales se ingresó un flujo de aire y se les acondicionó con un lecho de carbón activado modificado. Se emplearon diferentes concentraciones de carbón activado modificado, manteniendo el valor del pH alrededor de 10,5 para que el cianuro permanezca en solución y estar acorde al pH típico de los efluentes cianurados. El flujo de aire se mantuvo constante y cumplió las funciones de proveer el oxígeno necesario para la oxidación y producir agitación en la solución y el lecho de carbón activado.

Luego de aplicar la metodología experimental para la oxidación del cianuro, se alcanzó un porcentaje de eliminación del cianuro de más del 98% para concentraciones iniciales de 0,5 y 1,0 g de cianuro de sodio por litro de solución en 6 horas utilizando carbón activado impregnado con nitrato cúprico que en promedio contuvo 0,45% de cobre. El carbón impregnado con nitrato de plata tuvo un contenido metálico de 0,27% lo que influyó en sus resultados. Siendo este comportamiento del carbón modificado superior al del carbón sin modificar que no superó el 70% de eliminación de cianuro bajo las mismas condiciones experimentales. Además se pudo reutilizar el carbón activado impregnado aunque con una reducción gradual en su capacidad de contribuir a la oxidación de cianuro debida principalmente a la pérdida de material impregnado por disolución.

A manera de alternativa que permita reducir la pérdida de sales de cobre impregnadas, se desarrolló carbón activado con cobre metálico electrodepositado, lográndose una concentración de cobre mayor al 25% del peso total del carbón modificado. Este nuevo tipo de carbón modificado fue empleado en pruebas de oxidación de cianuro a escala de laboratorio en las que luego de 6 horas se logró eliminar el 99% del cianuro presente en soluciones sintéticas de similares características a las utilizadas en las pruebas con carbón activado impregnado. Al reutilizar este carbón modificado se pudo mantener un porcentaje cercano al 98% cuando fue sometido a nuevos ciclos de uso. En un ensayo realizado con un efluente real de procesos de cianuración, se llegó a eliminar el 83% de cianuro libre.

INTRODUCCIÓN

El uso del cianuro está muy difundido a nivel mundial en el campo de la minería aurífera como un agente lixivante que se adapta de forma apropiada a diferentes condiciones de trabajo por su efectividad y selectividad para la lixiviación de oro y plata. Por otra parte, el cianuro es un potente tóxico que se debe aplicar con ciertas precauciones de manera que se reduzca el riesgo que su uso representa para la salud y el ambiente. Las disoluciones que contienen distintas formas de cianuro son consideradas residuos de alta peligrosidad por lo que la legislación ambiental en el Ecuador regula la concentración de cianuro libre en los efluentes.

Si bien el carbón activado viene siendo usado para la oxidación de cianuro por algunos años, durante ese tiempo se han estado descubriendo nuevos métodos para mejorar este proceso como lo es la modificación del carbón activado. En este proyecto se pretende acercar el método de oxidación de cianuro con aire y carbón activado modificado a un uso a mayor escala de manera parecida a lo que sería su aplicación en industrias mineras de oro como las que existen en el país.

En trabajos previos se demostró que el carbón activado sin modificar es capaz de mejorar las condiciones naturales de oxidación de cianuro. Posteriormente se utilizó la modificación del carbón activado por impregnación con diferentes sales de metales, lo que representó una definitiva mejoría pero con la persistencia del problema de la disminución en la concentración de metales en la superficie del carbón activado ocasionada por la disolución de las sales lo que tenía un efecto adverso en la reutilización de este carbón activado impregnado (Pilco, 2008, p.104; Pesántez, 2010, p. 88).

Ante el problema de la pérdida de material impregnado en la superficie del carbón activado, en un trabajo se propuso someter a atmósfera reductora al carbón impregnado con nitrato cúprico con lo cual se consiguió la formación de cobre metálico en la superficie del carbón activado a partir de la mencionada sal de cobre, obteniéndose un producto final que permitió alcanzar una eliminación de cianuro por oxidación mayor al 99% y además este catalizador demostró un gran

potencial para ser reutilizado sin mayor afectación a sus propiedades (Pesántez, 2010, p.88)

En el presente estudio se tomará en cuenta la ventaja que ofrece el cobre metálico sobre la superficie del carbón activado al no ser soluble pero se considerará una nueva metodología experimental para obtener carbón activado con cobre metálico adherido a su superficie. La electrodeposición de cobre sobre carbón activado aparece como una opción viable para obtener un catalizador para oxidación de cianuro en solución siendo un método que no implica altas temperaturas ni consumo alguno de combustible y que también posee el potencial de ser usado en la producción a gran escala de este tipo de catalizador.

Es de esta manera como la investigación efectuada para el presente estudio siguió dos caminos principales siendo el primero llevar el uso de carbón activado con sales metálicas impregnadas a una escala mayor a la planteada en otros estudios para estudiar su comportamiento en estas condiciones; y la segunda es la producción de un catalizador de carbón activado con cobre metálico por electrodeposición. Estos dos objetivos principales se unen en su propósito final que es permitir la eliminación del cianuro de efluentes en forma simple y económica. Es por esto que es muy importante evaluar el uso de los catalizadores producidos en distintas condiciones de efluentes a tratar.

Este estudio se complementa con el diseño de una planta de tratamiento de efluentes cianurados para eliminar el cianuro libre. Esta planta estará basada en la metodología experimental empleada lo largo del proyecto y será apta para integrarse al sistema de tratamiento de efluentes de industrias que utilicen el cianuro en sus procesos. Este diseño incluirá el diagrama de flujo y dimensionamiento de los equipos necesarios, siendo el punto de partida hacia la definitiva aplicación de este proceso formando parte del tratamiento integral de efluentes. Se tendrá un especial enfoque en la evaluación económica del proyecto. Todo destinado a cumplir las normativas ambientales y minimizar costos al mismo tiempo.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 QUÍMICA DEL CIANURO

1.1.1 CIANURO

El cianuro es un compuesto conformado por un átomo de carbono en el estado de oxidación +2 y un átomo de nitrógeno en el estado de oxidación -3, unidos mediante un enlace triple con carga total negativa de uno. (Baird, 2004, p. 502).

El cianuro tiene muchos usos a nivel industrial, a menudo se aprovecha su capacidad de enlazarse fuertemente con ciertos metales para extraerlos de sus mezclas por lo que es muy utilizado en minería y para la obtención de recubrimientos metálicos. Otros usos incluyen la elaboración de productos muy variados como las vitaminas, nylon, plexiglás, pinturas, cosméticos, y tantos otros. Se trata de un compuesto relativamente tóxico pero que debe manejarse con precaución para así evitar daños a las personas o al medio ambiente. Los compuestos del cianuro se pueden clasificar en las categorías que se presentan en la Tabla 1.1 (Eisler, 2007, p. 210; Baird, 2004, p. 502).

Tabla 1.1. Clasificación de los compuestos de cianuro presentes en solución

Cianuro libre	CN ⁻ , HCN
Compuestos simples a. Fácilmente solubles b. Sales neutras insolubles	NaCN, KCN, Ca(CN) ₂ , Hg(CN) ₂ Zn(CN) ₂ , Cd(CN) ₂ , CuCN, Ni(CN) ₂ , AgCN
Complejos débiles	Zn(CN) ₄ ⁻² , Cd(CN) ₃ ⁻¹ , Cd(CN) ₄ ⁻²
Complejos moderadamente fuertes	Cu(CN) ₂ ⁻¹ , CuZn(CN) ₃ ⁻² , Ni(CN) ₄ ⁻² , Ag(CN) ₂ ⁻¹
Complejos fuertes	Fe(CN) ₆ ⁻⁴ , Co(CN) ₆ ⁻⁴ , Au(CN) ₂ ⁻¹ , Fe(CN) ₆ ⁻³

(Smith y Mudder, 1991, p. 7)

1.1.1.1 Cianuro de hidrógeno

Este compuesto relacionado con el ion cianuro es un gas a condiciones ambientales, que alcanza una presión de vapor de 630 mm Hg a 20 °C y 750 mm Hg a 25°C. El cianuro de hidrógeno se caracteriza por su extremada toxicidad. Se debe evitar la inhalación de sus vapores así como el contacto con la piel. La exposición a una concentración de los vapores de entre 100 y 200 ppm puede ser fatal en un tiempo entre 30 a 60 minutos (National Research Council, 1995, p. 336).

Si se libera cianuro de hidrógeno en el agua hay que considerar que se mezcla fácilmente con ésta pero también es muy volátil y puede escapar del agua hacia la atmósfera creando problemas potenciales por inhalación a las personas que se encuentren en las proximidades del área donde esté presente. La velocidad de volatilización del cianuro de hidrógeno se ve favorecida por su relativamente alta presión de vapor y depende de su concentración que está en función del pH como se verá en la sección del cianuro libre. También tienen influencia el área de superficie, la profundidad del depósito, la temperatura e inclusive los fenómenos de transporte asociados con el mezclado. Los compuestos de cianuro se descomponen rápidamente en contacto con ácidos, lo que produce liberación de cianuro de hidrógeno que también ocurre de forma lenta cuando los mencionados compuestos están en contacto con humedad o dióxido de carbono (Shafer, 2006, p. 310; Marsden y House, 2006, p. 234).

El cianuro de hidrógeno es un ácido débil por lo que no se disocia por completo en el agua, siguiendo la ecuación 1.1, su constante de disociación tiene un valor de $4,8 \times 10^{-10}$ (pKa = 9,32) a 25°C (Hanrahan, 2011, p. 282).



1.1.1.2 Cianuro libre

Se considera cianuro libre tanto al ion cianuro como al cianuro de hidrógeno presentes en solución. Cabe señalar que es ésta la forma más tóxica en la que se presenta el cianuro. A un pH entre 9,3 y 9,5, el cianuro de hidrógeno (HCN) y el ion cianuro (CN⁻) se encuentran en equilibrio a concentraciones iguales. A pH por encima de 11, más del 99% permanece como CN⁻, en contraste, a pH de 7, más del 99% permanece como HCN que tiene gran solubilidad en agua, la cual decrece con el aumento de temperatura y bajo condiciones de salinidad elevada. Tanto en su forma acuosa como gaseosa el HCN no tiene color y posee un olor a almendras amargas que no puede ser detectado por todas las personas. La reacción entre el ion cianuro y el agua se expresa con la ecuación 1.2 (Smith y Mudder, 2002, p. 8; Eisler, 2007, p. 204).



A un valor en particular de pH y temperatura, el sistema está en equilibrio. Las cantidades de cianuro y cianuro de hidrógeno pueden ser calculadas en base a la respectiva constante de equilibrio. La Figura 1.1 representa el comportamiento del cianuro libre en solución en función del pH (Smith y Mudder, 2002, p. 8).

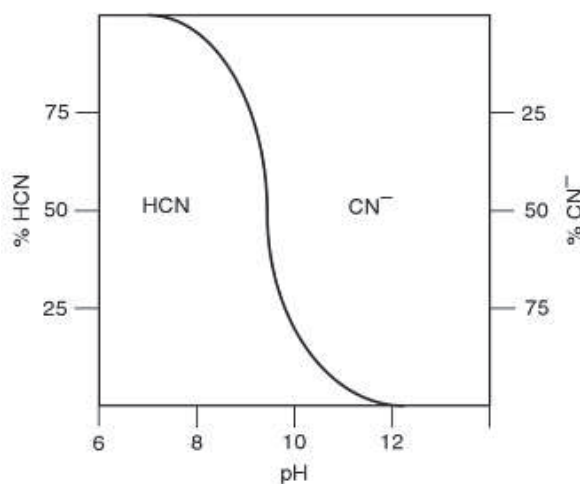


Figura 1.1. Diagrama de la dependencia del pH en el equilibrio entre el ion cianuro y el cianuro de hidrógeno (Lottermoser, 2010, p. 246)

1.1.1.3 Cianuro total

Es el término que comprende el cianuro libre y también el presente como complejos estables formados por cianuro y metales como los ferrocianuros (Crompton, 1996, p. 262).

1.1.2 COMPUESTOS SIMPLES DE CIANURO

Conocidos también como cianuros simples. Se definen como las sales del ácido cianhídrico como por ejemplo el cianuro de potasio y cianuro de sodio, los cuales se disuelven completamente en solución produciendo cationes libres alcalinos y alcalinos térreos además de iones cianuro. Las ecuaciones 1.3 y 1.4 representan las reacciones de disociación para el cianuro de sodio y el de calcio (Smith y Mudder, 1991, p. 8).



El ion cianuro reacciona con el agua para formar HCN según la ecuación 1.1, el porcentaje que se transforma depende del pH de la solución. Son estos compuestos de cianuro los que son empleados inicialmente en el proceso de lixiviación (Smith y Mudder, 1991, p. 8).

Los compuestos simples de cianuro son eléctricamente neutros (las cargas positivas de ion metálico se balancean exactamente con las cargas negativas de los iones cianuro) y tienen la capacidad de existir en forma sólida. Los compuestos simples de cianuro son solubles en agua y se disocian o ionizan rápidamente para producir cianuro libre y también iones metálicos (Smith y Mudder, 2002, p. 8).

Dentro de los compuestos simples de cianuro también están incluidas las sales neutras insolubles que el cianuro forma con metales como cobre, plata, zinc y cadmio. Las cuales se caracterizan por su baja solubilidad lo que lleva a considerarlas insolubles y a tener una concentración de cianuro dependiente de la constante de disociación y el pH cuando están presentes en medio acuoso. En la Tabla 1.2 se presentan las propiedades de los compuestos simples de cianuro más comunes (Eisler, 2007, p. 204).

Tabla 1.2. Propiedades de los compuestos simples de cianuro

Componente	Cianuro disponible	Solubilidad en agua a 25 °C (g/100cm ³)
NaCN	53,1%	48,0
KCN	40,0%	71,6
Ca(CN) ₂	56,5%	Soluble con liberación de HCN

(Taylor, 2010, p. 135-136)

1.1.3 COMPLEJOS METÁLICOS DE CIANURO

Comprende los compuestos metal-cianuro solubles en los que el ion cianuro viene incorporado a metales principalmente de transición; estos compuestos difieren de los compuestos simples de cianuro en sus propiedades químicas y toxicológicas. Se clasifican de acuerdo a su estabilidad como débiles, moderadamente fuertes y fuertes (Eisler, 2007, p. 204).

En general, la estructura de los iones complejos cianurados se puede representar con la ecuación 1.5 (Marsden y House, 2006, p.236):



Donde:

M: representa el metal que puede formar complejos con el cianuro.

x: representa el estado de oxidación del metal que forma el complejo.

y: representa el número de iones cianuro que forman parte del complejo.

1.1.3.1 Complejos de cianuro débiles y moderadamente fuertes

Estos compuestos poseen cianuro formando complejos con cadmio, cobre, níquel, plata y zinc. Se forman de manera progresiva siguiendo el aumento en la concentración de cianuro en la solución. Su estabilidad depende del ion metálico que contienen, siendo los complejos de zinc y de cadmio los más débiles. Estos complejos también reciben el nombre de WAD (weak acid dissociable) y se los considera de este grupo cuando el logaritmo de su constante de disociación es menor o igual a 30. Algunas de las constantes de disociación para estos compuestos se presentan en la Tabla 1.3 (Smith y Mudder, 1991, p. 11; Marsden y House, 2006, p. 236).

Tabla 1.3. Complejos cianuro-metálicos débiles y moderadamente fuertes en orden descendente de estabilidad en agua

Compuesto	Fórmula	Constante de disociación
Tricianocuprato (I)	$[\text{Cu}(\text{CN})_3]^{-2}$	$5,0 \times 10^{-28}$
Tetracianoniquelato (II)	$[\text{Ni}(\text{CN})_4]^{-2}$	$1,0 \times 10^{-22}$
Dicianosilverato (I)	$[\text{Ag}(\text{CN})_2]^{-1}$	$1,0 \times 10^{-21}$
Tetracianocadmiato (II)	$[\text{Cd}(\text{CN})_4]^{-2}$	$1,4 \times 10^{-17}$
Tetracianocincato (II)	$[\text{Zn}(\text{CN})_4]^{-2}$	$1,3 \times 10^{-17}$

(Smith y Mudder, 1991, p. 12)

La velocidad a la que ocurre la disociación de estos complejos y la liberación de cianuro libre a partir de los mismos se ven afectadas por algunos factores como la intensidad de la luz, temperatura del agua, pH, sólidos disueltos totales y concentración de los complejos. La liberación de cianuro libre por fotólisis se hace más pronunciada cuando se trata de complejos de hierro y cianuro (Smith y Mudder, 1991, p.11).

Las constantes de disociación pueden ser utilizadas para calcular la concentración de cianuro libre liberado cuando los complejos están presentes en solución. En general, una disminución en el pH y concentración del complejo, aumenta el porcentaje de cianuro libre producido. Como resultado, la

descomposición de cada complejo cianurado de metal aumenta con la disminución en la concentración. Así, es la estabilidad del complejo la que dictamina su facilidad de tratamiento y toxicidad relativa (Smith y Mudder, 1991, p. 11).

1.1.3.2 Complejos de cianuro fuertes

El ion cianuro tiende a formar complejos muy estables, que se denominan complejos fuertes o SAD (strong acid dissociable), al combinarse con elementos como el oro, hierro y cobalto. Estos compuestos se degradan de manera mucho más lenta que los débiles o moderadamente fuertes en condiciones ambientales. Gracias a la estabilidad del complejo entre el cianuro y el oro (III) se utiliza el cianuro como lixiviante para la extracción de oro a nivel industrial, permitiendo que el oro permanezca en solución hasta que sea necesario alterar las condiciones del proceso para poder recuperar el oro disuelto. El hierro es un metal que se encuentra frecuentemente en los minerales de donde se extrae el oro, es por eso que los complejos fuertes predominantes en los efluentes de minería son los de hierro. En la Tabla 1.4 se presentan datos de los principales complejos que forma el hierro con el cianuro. En general, el cobalto suele estar presente en forma de trazas (Logsdon et al., 1999, p.18).

Tabla 1.4. Complejos cianuro-metálicos fuertes en orden descendente de estabilidad en agua

Compuesto	Fórmula	Constante de disociación
Hexacianoferrato (III) o Ferricianuro	$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{-3}$	$1,0 \times 10^{-52}$
Hexacianoferrato (II) o Ferrocianuro	$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{-4}$	$1,0 \times 10^{-47}$

(Smith y Mudder, 1991, p. 12)

Los complejos cianurados de hierro requieren especial atención desde el punto de vista ambiental por su extrema estabilidad en ausencia de luz y su tendencia a descomponerse en su presencia. Aunque tienen gran resistencia a la

descomposición natural en comparación al cianuro libre y otros complejos de más fácil disociación; estos compuestos son capaces de liberar niveles tóxicos de cianuro al ser expuestos a intensa radiación ultravioleta (Smith y Mudder, 1991, p. 11).

Dentro de los complejos cianurados de hierro, los hexacianoferratos son los más importantes representantes, destacándose entre otros complejos cianurados por su capacidad para reaccionar. Por ejemplo, el hexacianoferrato (II) o ferrocianuro, se oxida con facilidad produciendo hexacianoferrato (III) o ferricianuro siendo esta reacción la responsable del contenido de ferricianuro en los efluentes cianurados debido a que el ion cianuro y el ion férrico no son muy reactivos entre sí (Smith y Mudder, 1991, p. 13).

Las sales de metales alcalinos y alcalinotérreos que forman los hexacianoferratos son solubles en el agua. Las sales de metales de transición que forma el hexacianoferrato (II) son insolubles y precipitan en el agua. Por otra parte las sales del hexacianoferrato (III) son más solubles que sus análogas del hexacianoferrato (II) (Smith y Mudder, 1991, p. 15).

Desde el punto de vista del tratamiento de efluentes que contienen complejos cianurados de hierro, es necesario considerar algunas reacciones. El hexacianoferrato (II) no se oxida por el aire en soluciones neutras o alcalinas sin la presencia de luz o catalizadores. Se puede oxidar con peróxido de hidrógeno en solución ácida pero no en alcalina. Al tratarlo con cloro, hipoclorito u ozono se produce hexacianoferrato (III). Se acompaña a los reactivos mencionados con un adecuado agente reductor como sulfito de sodio en las operaciones de destrucción del cianuro (Smith y Mudder, 1991, p. 17).

1.1.4 TIOCIANATO

Este ion lineal, electronegativo y poli-atómico de fórmula SCN^- puede formarse durante la lixiviación por la reacción del cianuro con átomos de azufre inestable.

Se degrada con mayor facilidad que el cianuro y además no presenta una toxicidad elevada para medios acuáticos pero su presencia hace que se gaste más oxidante para la oxidación del cianuro y compuestos relacionados en efluentes. Si se va a tratar con cloro un efluente que contiene cianuro, existe probabilidad de formación de cloruro de cianógeno, un gas altamente tóxico y poco soluble en el agua. Si se deja el tiocianato en medio alcalino, la biodegradación puede conducir a la formación de cianuro (Smith y Mudder, 1991, p. 18; Kavanaugh, 2003, p. 5).

1.2. MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES CIANURADOS

Existen varios procedimientos que son utilizados para el tratamiento de efluentes cianurados. Estos procedimientos pueden clasificarse como métodos físicos, de adsorción, de formación de complejos y de oxidación. Estos métodos predominantemente incluyen procesos de separación o de destrucción y algunos pueden darse de forma natural (Young y Jordan, 1996, p. 105).

Los procesos de separación incluyen métodos físicos, de adsorción y de formación de complejos. Mediante la aplicación de algunos de estos métodos, es posible concentrar el cianuro para luego recuperarlo. Por otra parte los procesos de destrucción implican cambio químico en la estructura del cianuro produciendo especies no tóxicas o menos tóxicas. Debido a que los átomos de carbono y/o nitrógeno presentes en el ion cianuro, sufren variación en su estado de oxidación; estos procesos reciben el nombre de métodos oxidativos (Young y Jordan, 1996, p. 105).

1.2.1 MÉTODOS FÍSICOS

Los métodos físicos de tratamiento de efluentes cianurados incluyen: dilución, membranas, electrowinning e hidrósis/destilación (Young y Jordan, 1996, p. 105).

1.2.1.1 Dilución

Este método es el único que no separa ni destruye al cianuro. Consiste en mezclar un efluente cianurado con otro que tenga menor contenido de cianuro o esté libre de cianuro, de tal manera que se produce un efluente final con una concentración de cianuro que se encuentre por debajo de los límites máximos para descargas. Consecuentemente, la dilución es simple y barata y suele usarse como método único o método de apoyo en el tratamiento de efluentes cianurados. El principal problema que presenta este método es que la cantidad total de cianuro en la descarga no se ve alterada de tal manera que los procesos naturales de adsorción y precipitación pueden hacer que el cianuro se concentre en el suelo y en aguas superficiales (Young y Jordan, 1996, p. 105).

1.2.1.2 Membranas

El cianuro puede separarse del agua usando membranas que operan por electrodiálisis o por ósmosis inversa. En la electrodiálisis se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos que están dentro de una celda que tiene una membrana permeable al cianuro que separa a los dos electrodos. La solución a tratar se coloca en la mitad de la celda donde se ubica el cátodo o electrodo negativo. Dado que el ion cianuro tiene carga negativa, éste se difundirá a través de la membrana y se concentrará en la otra mitad de la celda donde está el ánodo o electrodo positivo. En ósmosis inversa se aplica presión a la solución a tratar de tal manera que ésta es forzada a pasar a través de una membrana impermeable al cianuro, lo que reduce la concentración (Young y Jordan, 1996, p. 105).

1.2.1.3 Electrowinning

El electrowinning es una tecnología utilizada para recuperar metales presentes en soluciones mediante su electrodeposición del metal de interés sobre un electrodo. Los complejos que el cianuro forma con metales tanto fuertes como débiles (SAD

y WAD) pueden reducirse a los metales correspondientes en una unidad de electrowinning. Este cambio químico ocurre de acuerdo a la reacción 1.6 (Young y Jordan, 1996, p. 106; Marsden y House, 2006, p. 395).



No se trata de un proceso muy eficiente porque implica la reducción de un anión en el cátodo ya que el gradiente de potencial es adverso para la migración electrolítica. Por esa razón, se busca compensar esta ineficiencia mediante el uso de lana de acero como cátodo debido a la gran área de superficie que ofrece, además se recurre a incrementos de agitación, de temperatura, regulación de pH. Incluso se requiere un rediseño de la celda de electrowinning (Young y Jordan, 1996, p. 106).

En procesos convencionales de recuperación de oro, el cobre aparece como un elemento consumidor de cianuro que no se recupera y dificulta el reciclaje del cianuro. Existen algunas publicaciones acerca del electrowinning del cobre, plata y oro a partir de soluciones cianuradas en las que se plantea el uso del electrowinning como una alternativa para reciclar el cianuro. Una vez que los metales de los complejos cianurados pasan al cátodo, a la solución remanente se le puede adicionar una determinada cantidad de cianuro de sodio para que pueda volver a ser utilizada en el proceso de lixiviación (Wang et al., 2009, p.1).

1.2.1.4 Hidrólisis y destilación

El cianuro libre se hidroliza en el agua de forma natural produciendo cianuro de hidrógeno acuoso, el cual tiene una presión de vapor de 100kPa a 26°C contra el agua que tiene 30kPa a la misma temperatura. Esto facilita el escape de cianuro de hidrógeno como gas cianhídrico y con la posibilidad de intensificar el efecto a temperaturas elevadas y presiones más bajas en un proceso de destilación. Además se favorece la destilación con agitación e incrementando la superficie en la interface entre el aire y la solución. Este gas cianhídrico puede ser capturado y

concentrado en torres de absorción o también puede ser liberado a la atmosfera, lo que puede ir contra la legislación ambiental. Este método no afecta a los complejos de cianuro (Young y Jordan, 1996, p.106).

1.2.2 MÉTODOS DE FORMACIÓN DE COMPLEJOS CIANURADOS

El tratamiento de efluentes cianurados también puede ser efectuado por métodos que implican la formación de complejos cianurados. Tales métodos son la acidificación/volatilización, adición de metales, flotación y extracción por solventes (Young y Jordan, 1996, p. 106).

1.2.2.1 Acidificación y volatilización

El ion cianuro predomina en solución cuando el pH está por encima de 9,3; mientras que a valores menores predomina el cianuro de hidrógeno acuoso. Para la aplicación de este método se utiliza el hecho de que a medida que el pH disminuye por debajo de 9,3, aumenta la velocidad de volatilización de gas cianhídrico. Si el pH baja hasta valores menores que 2, los complejos WAD también se verán afectados y generarán gas cianhídrico de acuerdo a la reacción 1.7 (Young y Jordan, 1996, p.107).



Para el tiocianato y los complejos (SAD) la reacción es similar pero se requiere un medio aún más ácido para que ocurra. La velocidad de volatilización puede incrementarse de la misma manera que lo hace en el proceso de destilación. Adicionalmente, este proceso también se observa en la naturaleza por la disolución de dióxido de carbono en la solución y la formación de ácido carbónico. Después de la acidificación, la solución queda libre de cianuro pero con carácter ácido por lo que debe volver a neutralizarse previo a su descarga o reciclo. La re-neutralización consiste en poner sustancias de carácter básico como $Ca(OH)_2$ o

Na(OH) lo que hace que los metales en solución precipiten como hidróxidos según la reacción 1.8 (Young y Jordan, 1996, p. 107).



Al proceso de acidificación, volatilización y re-neutralización también se lo conoce como proceso AVR o Mills-Crowe. Si bien este proceso puede llegar a consumir elevadas cantidades de ácidos y bases, por otro lado es una mejor alternativa que los procesos de destilación/volatilización ya que el consumo energético es menor y la velocidad de volatilización mayor (Young y Jordan, 1996, p.107).

1.2.2.2 Adición de metales

El cianuro puede perder su reactividad por la adición de varios metales y cationes metálicos lo que promueve la formación de complejos cianuro-metálicos o precipitados que son menos reactivos que el cianuro libre. El proceso destinado a la recuperación de oro conocido como Merrill-Crowe, por ejemplo, consiste en la adición de polvo de zinc a soluciones que contienen complejos cianurados de oro lo que produce la precipitación o cementación del oro metálico según la siguiente reacción 1.9 (Young y Jordan, 1996, p. 107).



En esta reacción se produce un cambio de un complejo cianurado fuerte a un complejo cianurado débil por sustitución del metal. Luego de esto, el oro pasa a forma metálica y al mismo tiempo, la solución se vuelve más susceptible de ser tratada por otros métodos de remediación (Young y Jordan, 1996, p. 107).

Uno de los métodos de remediación incluidos en esta categoría es el que implica la adición de cationes ferrosos o férricos a las soluciones cianuradas para formar los respectivos complejos fuertes que son de menor toxicidad que el resto de complejos. Además, los complejos así formados son aniones que se puede hacer

precipitar como sales dobles por una nueva adición de cationes férricos, ferrosos, cúpricos, de níquel o de zinc (Park et al., 2008, p. 141).

1.2.2.3 Extracción por solventes

En el proceso intervienen dos fases, una fase acuosa donde se encuentra el compuesto a extraer y una fase orgánica que contiene una sustancia denominada extractante la misma que debe tener selectividad por el compuesto a extraer que en esta aplicación sería el compuesto objeto de la remediación. Dichas fases son naturalmente inmiscibles y se las hace fluir de preferencia en contracorriente de manera que la fase orgánica se cargue con la especie a extraerse. Algunos modificadores químicos pueden añadirse tanto a la fase acuosa como a la fase orgánica para maximizar la extracción. Luego de la primera extracción se produce una segunda extracción en la que la especie se transfiere a una fase acuosa diferente con el fin de recuperar la fase orgánica y poder reciclarla aprovechando que la extracción es reversible y así minimizar costos (Young y Jordan, 1996, pp. 108-109).

Inicialmente, esta tecnología de extracción fue utilizada para extraer uranio. Luego se comenzó a aplicar a la extracción de cobre en bajas concentraciones. En la actualidad ha alcanzado tal desarrollo que es posible procesar soluciones con mayor contenido de cobre. También se han desarrollado aplicaciones para extracción selectiva de complejos cianurados de oro usando aminas modificadas y ésteres de alquilo fosforados. La aplicación de esta tecnología para la remediación no es muy popular por la necesidad de utilizar reactivos específicos para el caso del extractante y se suele optar por opciones más económicas (Miller y Mooiman, 1986, pp. 245-261).

1.2.3 MÉTODOS DE ADSORCIÓN

Algunos minerales, el carbón activado y ciertas resinas tienen la capacidad de adsorber el cianuro presente en solución. Para este propósito se pueden utilizar diferentes formas de contacto entre la solución y el agente adsorbente. Una vez que el cianuro ha sido adsorbido, el material adsorbente se separa de la solución por tamizado o por separación gravimétrica. Generalmente, este material se lleva a un proceso de desorción del cianuro que termina concentrándose en una solución de volumen mucho menor que la que se está tratando. El material adsorbente, por su parte, se separa de nuevo y se reactiva para poder volver a utilizarlo (Young y Jordan, 1996, p. 109).

1.2.3.1 Adsorción con minerales

Suelos, desechos y menas que contienen minerales como la ilmenita (FeTiO_3), hematita (Fe_2O_3), bauxita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y pirita; también grupos de minerales como las zeolitas, feldespatos y arcillas han demostrado ser agentes adsorbentes de cianuro tanto libre como del que está formando parte de complejos con metales. La capacidad de adsorción de feldespatos y minerales arcillosos es de hasta 0,05 mg de cianuro por gramo de material. Los mecanismos de adsorción de la ilmenita, hematita y bauxita resultan complejos y aún no han sido estudiados a profundidad (Young y Jordan, 1996, p.109; Marsden y House, 2006, p. 486).

Dependiendo del mineral, la adsorción de cianuro es una combinación de los siguientes mecanismos: intercambio iónico, precipitación o interacción electrostática. Se trata de un método de atenuación del cianuro que está presente en la naturaleza purificando aguas superficiales y subterráneas; desde otra perspectiva incrementa el consumo de cianuro en operaciones de lixiviación (Young y Jordan, 1996, p. 109).

1.2.3.2 Adsorción con carbón activado

Los carbones activados se preparan por la descomposición termoquímica parcial de materiales carbonáceos. Las características de adsorción dependen del método de preparación y el material precursor. Una típica partícula de carbón activado, ya sea en forma de polvo o granular, posee una estructura porosa que consiste en una red de macroporos y mesoporos interconectados que proveen una buena capacidad de adsorción debida a su gran área superficial. Algunas operaciones mineras utilizan al carbón activado como adsorbente para recuperación y remoción de cianuro y metales. El cianuro forma complejos con los metales que tienen mejor facilidad de ser adsorbidos por el carbón que el cianuro o los metales de manera individual. La adsorción no es muy selectiva ya que cationes, aniones y especies neutras pueden ser adsorbidos simultáneamente en varios sitios por intercambio iónico, solvatación, quelación e interacción electrostática (Young y Jordan, 1996, p. 109; Dash et al., 2009, p. 409).

El carbón activado es capaz de adsorber hasta 5 mg de cianuro por gramo de carbón a partir de soluciones de cianuro alcalinas y con presencia de aireación. Esta capacidad se puede ver incrementada a más de 25 mg de cianuro por gramo de carbón si hay presencia de catalizadores como el cobre y níquel. El tamaño de partícula del carbón activado no ha mostrado ser un factor determinante en la adsorción de cianuro.

En un estudio realizado, se utilizó diversos tamaños de partículas (desde 1,2-2 mm hasta 4-5 mm) para tratar soluciones de ZnCN y FeCN, alcanzándose una remoción superior al 80% y para soluciones de NaCN se alcanzó más del 65% de remoción. Si bien hubo un incremento en la remoción porcentual de cianuro con la disminución del tamaño de partícula del carbón activado, este incremento fue pequeño (menos del 2,0%). En la Tabla 1.5 se tiene un resumen de los resultados obtenidos (Marsden y House, 2006, p. 481; Dash et al., 2009, p. 411).

Tabla 1.5. Efecto del tamaño de partícula en la adsorción de cianuro en carbón activado granular

Tamaño de partícula (mm)	% de cianuro removido		
	NaCN	ZnCN	FeCN
4-5	66,3	83,9	81,8
3,5-4	67	84	82,1
2-3,5	67	84,2	82,6
1,2-2	67,6	84,7	82,9
[CN ⁻] _i = 100 mg/L; [C.A.] = 20 g/L; t = 72 h			

(Dash et al., 2009, p. 411)

1.2.3.3 Adsorción con resinas

Este tratamiento se refiere al uso de partículas poliméricas que contienen grupos funcionales en su superficie, grupos que poseen características quelantes o de intercambio iónico. Las resinas pueden ser selectivas y tener alta capacidad de adsorción dependiendo de la fuerzas de sus propiedades quelantes o de intercambio iónico (Young y Jordan, 1996, p. 110).

Para su uso pueden ser depositadas sobre substratos donde forman una capa fina como es el caso de las aplicaciones de lecho empacado. Mientras que las resinas que no requieren de un substrato son usadas en procesos continuos que son similares a aquellos que se utilizan con el carbón activado para recuperar oro. Por eso se tienen los procesos análogos RIC (resina en columna) para CIC (carbón en columna) y RIP (resina en pulpa) para CIP (carbón en pulpa) (Young y Jordan, 1996, p. 110).

Adicionalmente a la similitud con el carbón activado en la forma de uso, cabe destacar que las resinas de intercambio iónico son más versátiles que el carbón activado porque poseen grupos funcionales específicos que pueden fijarse a la base polimérica de la resina. De esa manera, las resinas pueden diseñarse con propiedades mejoradas como selectividad, resistencia al envenenamiento por calcio o materiales orgánicos y alta capacidad de carga. Después de la adsorción, los carbones activados requieren temperaturas más altas de elución y

reactivación termal que resulta innecesaria para las resinas. Se considera que las resinas tienen mejor relación costo beneficio que el propio carbón activado debido a su resistencia al ensuciamiento orgánico, su regeneración más eficiente, mayor vida útil y mayor facilidad de desorción (Moyer y Singh, 2004, pp. 202, 204).

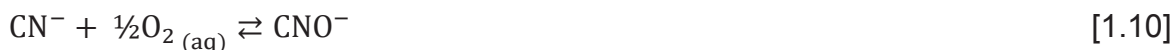
1.2.4 MÉTODOS OXIDATIVOS

Los métodos físicos, de formación de complejos y de adsorción no se basan en la destrucción del cianuro, por esta razón, en algún momento del tratamiento se llega a producir un nuevo efluente pero de volumen menor que contiene las especies cianuradas concentradas que fueron separadas del efluente inicial que fue objeto del tratamiento. Esto hace que los métodos mencionados anteriormente sean aplicables cuando se busca separar, recuperar y reciclar el cianuro. Cuando el principal interés está en destruir el cianuro, se aplican los métodos oxidativos que transforman a este compuesto tóxico en otros de toxicidad mucho menor y que no representan peligro significativo para el medio ambiente (Young y Jordan, 1996, p. 110).

1.2.4.1 Catálisis

Se conoce que el carbón activado puede actuar como adsorbente para el cianuro. Sin embargo, cuando esta adsorción ocurre en presencia de oxígeno, el carbón activado oxidará catalíticamente al cianuro de acuerdo a la reacción 1.10. Si existe presencia de cobre ya sea en solución, o previamente adsorbido en el carbón activado, la velocidad a la que se produce la reacción catalizada se incrementa, un fenómeno atribuido a una mayor adsorción de cianuro en estas condiciones. Si se tiene un exceso de cobre, inclusive la hidrólisis del cianato llega a aumentarse. Es por esta razón que las plantas que extraen oro minimizan el ingreso de oxígeno a sus circuitos de adsorción. La catálisis por carbón activado resulta efectiva para tratar cianuro libre, complejos del tipo WAD y

algunos del tipo SAD; por eso se pueden desarrollar procesos de destrucción del cianuro basados en este fenómeno (Young y Jordan, 1996, p. 111).



1.2.4.2 Electrólisis

La electrólisis se opera de forma similar al electrowinning. Con la diferencia sustancial de que la detoxificación de los efluentes ocurre por una oxidación de cianuro libre en el ánodo en lugar de la reducción de un complejo cianuro-metálico en el cátodo. Debido a que el cianuro y el ánodo tienen cargas opuestas, las eficiencias de corriente son altas. El cianato se produce por dos técnicas: electro-oxidación y electro-cloración (Young y Jordan, 1996, p. 111).

El tratamiento químico de electro-oxidación consiste en la oxidación sobre la superficie de un electrodo y presenta algunas ventajas como son la no utilización de reactivos extras, no hay producción de lodos que implicarían un tratamiento posterior, y la minimización de reacciones competitivas que permite obtener altas eficiencias de corriente. El procedimiento trabaja con soluciones alcalinas concentradas y usando como electrodos óxidos mezclas de RuO_2 y TiO_2 con un depósito de PbO_2 en la superficie, se sigue la reacción 1.11 (Rajeshwar e Ibanez, 1997, p. 374).



Para mejorar el funcionamiento de este tratamiento se añade cloruro de sodio lo que mejora la conductividad de la solución y a su vez puede colaborar en la oxidación del cianuro al permitir un mecanismo indirecto de oxidación por acción del cloro formado. Al proceso que implica la adición de cloruro de sodio en la solución a tratarse se lo denomina electro-cloración. Por su carácter de electrolito fuerte, el cloruro de sodio se disocia en iones cloruro y sódicos.

El ion cloruro produce cloro activo tanto en el electrodo como en la solución. Este reacciona con el ion cianuro para producir cianato tal como en el proceso de cloración alcalina convencional (Young y Jordan, 1996, p. 112).

1.2.4.3 Bio-oxidación

Varias especies de bacterias, hongos, algas, levaduras y plantas junto con sus respectivas enzimas y aminoácidos pueden oxidar el cianuro de forma natural. Por ser un compuesto natural, el cianuro es biodegradable. A pesar de que el cianuro es un inhibidor metabólico, ciertos organismos son capaces de utilizarlo como fuente de nitrógeno. Las características químicas del cianuro hacen que sea una mala fuente de carbono para organismos heterótrofos, pero una excelente fuente de nitrógeno en potencia, siempre y cuando un organismo lo pueda tolerar y asimilar. El mecanismo predominante de la bio-oxidación es la conversión metabólica del cianuro a cianato que es una especie considerada de toxicidad menor siguiendo la ecuación 1.10. Aunque también existen algunas cepas bacterianas que son capaces de transformar el cianuro directamente en dióxido de carbono y amoníaco mediante la enzima cianuro dioxigenasa (Young y Jordan, 1996, p.110; Roldán et al., 2005, pp. 410-411).

Para la eliminación de cianuro se pueden emplear desde lodos activados hasta enzimas puras, dependiendo de la complejidad de la fuente a tratar. El proceso se suele realizar empleando reactores biológicos rotatorios donde películas de bacterias conocidas como biofilm se encuentran adheridas a discos giratorios que rotan a baja velocidad para permitir un contacto adecuado entre el microorganismo y el efluente cianurado y por consiguiente una mejor degradación del cianuro (Mas et al., 2006, p. 5).

Algunas de las rutas de degradación del cianuro por parte de bacterias y hongos se resumen en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Rutas de degradación del cianuro por bio-oxidación

Enzimas	Origen microbiano
Cianuro monoxigenasa $\text{HCN} + \text{O}_2 + \text{H}^+ + \text{NADPH} \rightarrow \text{HO CN} + \text{NADP}^+ + \text{H}_2\text{O}$	<i>Pseudomonas sp.</i>
Cianasa $\text{HO CN} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NH}_3$	<i>Escherichia coli, Rhodococcus rhodochrous</i>
Cianuro dioxigenasa $\text{HCN} + \text{O}_2 + \text{H}^+ + \text{NADPH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NH}_3 + \text{NADP}^+$	<i>Pseudomonas fluorescens, Pseudomonas cereus, Bacillus pumillus</i>
Cianuro hidratasa $\text{HCN} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCONH}_2$	Hongos patógenos
Nitrilo hidratasa $\text{R-CN} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{RCONH}_2$	<i>Pseudomonas, Corynebacterium, Brevibacterium</i>
Cianidasa $\text{HCN} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_2\text{H} + \text{NH}_3$	<i>Alcaligenes xylosooxidans</i>
Nitrilasa $\text{R-CN} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{RCO}_2\text{H}$	<i>Klebsiella, Arthrobacter, Pseudomonas, Nocardia</i>
Rodanasa $\text{HCN} + \text{S}_2\text{O}_3^{2-} \rightarrow \text{SO}_3^{2-} + \text{HSCN}$	<i>Thiobacillus denitrificans, Bacillus subtilis, Bacillus stearothermophilus</i>

(Castillo y Roldán, 2005, p. 411)

Algunas especies intermedias se forman en el transcurso de la reacción dependiendo del agente biológico que está siendo utilizado, las especies cianuradas presentes y las condiciones como concentración, pH y temperatura. De todas las biomásas capaces de oxidar el cianuro, las más investigadas han sido las bacterias (Young y Jordan, 1996, p. 110).

Todos ellos son métodos que pueden resultar muy eficientes, en especial la cianidasa que produce directamente amoníaco y ácido fórmico sin utilizar cofactores y partiendo de cianuro y agua como únicos sustratos. A pesar de las bondades que brinda el tratamiento biológico de cianuro, no existe un método que permita el tratamiento biológico simultáneo del cianuro libre y sus complejos a pH superior a 9. Lo que es necesario para evitar que el cianuro pase a la atmósfera en forma de ácido cianhídrico, lo cual resulta contraproducente.

Es un tema de interés para la biotecnología ambiental la utilización de organismos alcalófilos que permitan la oxidación del cianuro trabajando a un pH que minimice el riesgo de escape del peligroso gas cianhídrico al ambiente (Castillo y Roldán, 2005, pp. 411-412).

1.2.4.4 Oxígeno

El cianuro de hidrógeno y el ion cianuro pueden ser oxidados a ion cianato en presencia de oxígeno cuando se dan las condiciones favorables para la oxidación. Tal como se muestra en el diagrama de potencial – pH para el sistema CN-H₂O de la Figura 1.2. Las reacciones más importantes que ocurren son la 1.12 y 1.13 (Marsden y House, 2006, p. 487).



Reacciones que no son convenientes durante la lixiviación porque reducen la concentración de cianuro libre disponible y el cianato formado no disuelve al oro (Marsden y House, 2006, p. 234).

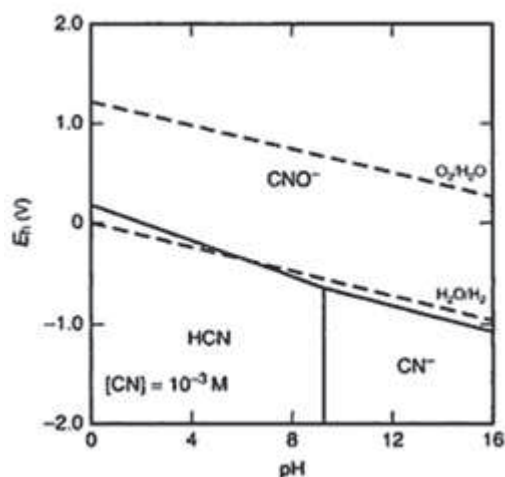


Figura 1.2. Diagrama potencial – pH (E_h -pH) para el sistema CN^- - H_2O a 25 °C (Marsden y House, 2006, p. 235)

Según la Figura 1.2, la oxidación del cianuro a cianato debería ocurrir de manera espontánea con oxígeno, pero la reacción es muy lenta y, en la práctica, se recurre a agentes oxidantes más fuertes para que la reacción ocurra a velocidad significativa (Marsden y House, 2006, p. 236).

En soluciones cianuradas aireadas, la reacción es extremadamente lenta pero puede acelerarse por la acción de agentes como la luz ultravioleta, calor, bacterias y catalizadores como el dióxido de titanio y el óxido de azufre. La degradación del cianuro por oxígeno gaseoso y acuoso es uno de los mecanismos de degradación natural del oxígeno que ocurre lentamente en las pozas donde se depositan los efluentes. Presenta cierta efectividad para el cianuro WAD y el tiocianato pero no para complejos cianurados fuertes (Marsden y House, 2006, p. 236; Young y Jordan, 1995, p. 112).

1.2.4.5 Ozono

El ozono tiene características oxidantes superiores a las del oxígeno y reacciona para producir cianato. El proceso se conoce como ozonización y se produce en dos etapas. La primera es la oxidación del ion cianuro a cianato junto con la conversión del ozono a oxígeno molecular. La segunda se produce por la presencia de un exceso de ozono y consiste en la hidrólisis del cianato para producir iones bicarbonato y nitrógeno molecular de acuerdo a las reacciones 1.14 y 1.15 (Young y Jordan, 1996, pp. 112-113; Rodríguez et al., 2006, pp. 350-351).



Además, la oxidación con ozono es altamente destructiva para el tiocianato y los complejos WAD pero no es destructiva para los SAD. No produce compuestos indeseables que requerirían posterior tratamiento como amoniaco y compuestos

órgano-clorados. No requiere de la adquisición, almacenamiento ni manipulación de compuestos químicos peligrosos. El ozono se puede producir en el sitio de tratamiento mediante un generador de ozono y la reacción no requiere de altas temperaturas ni presiones. El mayor inconveniente de esta técnica es su elevado coste de inversión (Young y Jordan, 1996, p. 112; Rodríguez et al., 2006, p. 350).

1.2.4.6 Peróxido de hidrógeno

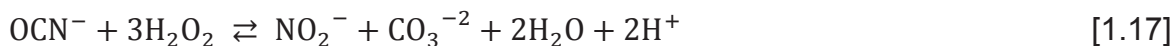
El peróxido de hidrógeno es un oxidante más fuerte que el oxígeno pero más débil que el ozono. Presenta las ventajas de ser un reactivo relativamente barato, totalmente soluble en agua y fácil de manipular y almacenar. La reacción 1.16 describe la oxidación del ion cianuro por acción del peróxido de hidrógeno (Young y Jordan, 1996, p. 113; Marsden y House, 2006, p. 487).



Si bien el peróxido por sí sólo puede oxidar el cianuro libre, no lo hace de forma rápida, por eso es común catalizar la reacción con un metal de transición como cobre soluble, vanadio o plata en concentraciones que van de 5 a 50 mg/L. El cobre suele estar presente en los efluentes de la minería aurífera pero en algunos casos se lo añaden pequeñas cantidades de sulfato de cobre para incrementar su concentración y acelerar la reacción. Como en otros procesos de destrucción del cianuro, es importante mantener el pH en un valor del pH entre 10 y 11 a fin de evitar la liberación del gas cianuro de hidrógeno. La velocidad de esta reacción puede incrementarse de algunas formas: elevación de temperatura, incremento en la dosis de catalizador y/o adición de peróxido de hidrógeno en exceso. La oxidación de cianuro con peróxido de hidrógeno, depende además de algunos parámetros como la concentración de sólidos suspendidos y de complejos cianuro-metálicos (Khodadadi et al., 2005, p.181).

Cuando se aplica un exceso de peróxido de hidrógeno, el cianato se oxida y se forma nitrito, carbonato, posteriormente, se llega a formar nitrato por oxidación del

nitrito como se muestra en las ecuaciones 1.17 y 1.18 (Young y Jordan, 1996, p. 113).



1.2.4.7 Ácido peroximonosulfúrico o ácido de Caro

El ácido peroximonosulfúrico es un oxidante más fuerte que el peróxido de hidrógeno y es producido por la reacción entre el ácido sulfúrico y el peróxido de hidrógeno según la reacción 1.19. Se le conoce como ácido de Caro debido al nombre de Heinrich Caro, su inventor, quien lo preparó por primera vez en 1898. La reacción para producir ácido de Caro es altamente exotérmica y el resultado es una solución clara e incolora cuyas propiedades físicas se detallan en la Tabla 1.7 (Young y Jordan, 1996, p. 113; Gaviria y Meza, 2006, p. 35).



Tabla 1.7. Propiedades físicas del ácido de Caro

Punto de fusión	-30,1 °C
Punto de ebullición	281 °C
Estado físico	claro, incoloro, aceitoso
Olor	fuerte
Solubilidad en agua	100 %
pH	<1
Densidad	1,7 g/mL a 25 °C

(Gaviria y Meza, 2006, p. 35)

El ácido de Caro tiende a descomponerse con facilidad para producir ácido sulfúrico y oxígeno por lo que este ácido debe ser preparado en el sitio donde se lo vaya a utilizar justo antes de comenzar con el proceso de oxidación. Por esta

razón, en las plantas que aplican este proceso al tratamiento de sus efluentes, se tiene en tanques separados al ácido sulfúrico y al peróxido de hidrógeno; así los flujos de cada compuesto se juntan y se mezclan justo antes de efectuar la oxidación del cianuro. Como producto de la oxidación de cianuro con ácido de Caro se produce cianato de acuerdo con la reacción 1.20 (Mular et al., 2002, p. 1871).



El ácido de Caro degrada fácilmente los cianuros WAD y cianuros libres que provienen de las colas de las plantas en los procesos de extracción del oro debido a que contribuye a reducir el pH desde los valores normales que están entre 10,5 y 11,5 hasta valores por debajo de 9 que favorecen la disociación de estos complejos (Gaviria y Meza, 2006, p. 35).

El trabajo con este proceso de oxidación del cianuro ha mostrado que la volatilización del gas cianhídrico es insignificante a pesar del hecho de que se está añadiendo y produciendo un ácido. Este hecho se le atribuye a que la reacción ocurre a gran velocidad y a la inhabilidad de los complejos fuertes para la volatilización una vez que se alcanza un pH de equilibrio entre 6,5 y 8 (Young y Jordan, 1995).

1.2.4.8 Cloración alcalina

Este proceso ha sido aplicado desde la aparición de la lixiviación del oro como una técnica económicamente viable. Es efectiva para la oxidación de todos los compuestos del cianuro a excepción de los complejos cianurados del tipo SAD. El cloro no es un reactivo muy costoso pero se requiere trabajar a altos valores de pH para evitar la formación del gas cloruro de cianógeno. La presencia de amoníaco que puede ser un subproducto de la oxidación del cianuro tiende a incrementar la demanda de cloro (Marsden y House, 2006, p. 490).

La cloración es un proceso rápido y económico que es ampliamente utilizado a nivel mundial para el tratamiento de los efluentes cianurados pero presenta los inconvenientes de elevados consumos de cloro gaseoso y de hipoclorito junto las altas concentraciones de iones cloruro e hipoclorito que son tóxicos en las descargas (Young y Jordan, 1996, p. 113).

El cloro necesario se suministra en forma líquida o gaseosa, también se puede utilizar hipoclorito de sodio en forma sólida, preparando previamente soluciones concentradas de este compuesto. Tanto el cloro como el hipoclorito pueden generarse in situ electrolíticamente (Mular et al., 2002, p. 1873).

La reacción de destrucción del cianuro por este método tiene dos pasos, el primer paso es la conversión del cianuro a cloruro de cianógeno (CNCl) y el segundo paso es la hidrólisis del cloruro de cianógeno para producir cianato. Las reacciones que se producen son la 1.21 y 1.22 (Mular et al., 2002, p. 1872).



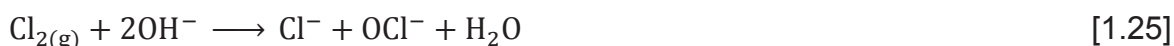
En la presencia de un ligero exceso de cloro, el cianato posteriormente se hidroliza para producir amonio según la reacción 1.23 (Mular et al., 2002, p. 1872).



Cuando existe suficiente exceso de cloro disponible, una reacción de oxidación del amonio se produce y se libera nitrógeno gaseoso como se presenta en la reacción 1.24 (Mular et al., 2002, p. 1872).



A partir de la cloración alcalina se desarrolló la cloración alcalina con hipoclorito debido a que el hipoclorito que se forma durante la oxidación con cloro gaseoso tiene la capacidad de oxidar al cianuro. La reacción 1.25 es la de formación del hipoclorito en condiciones alcalinas a partir de cloro gaseoso (Young y Jordan, 1996, p. 114).



1.2.4.9 Dióxido de azufre y aire

Se conocen dos versiones patentadas del proceso de destrucción del cianuro. La primera y más utilizada es conocida con nombre de proceso INCO que se basa en la conversión de los complejos cianurados del tipo WAD a cianato usando una mezcla de dióxido de azufre y aire en presencia de cobre soluble como catalizador a pH controlado. En este proceso, las diferentes formas de cianuro son removidas con procesos distintos. El uno es la conversión de los complejos cianurados WAD a cianato mientras que los complejos cianurados de hierro son reducidos a estado ferroso y se hacen precipitar como complejos cianurados de cobre y de hierro. Los iones metálicos liberados de los complejos WAD se hacen precipitar en forma de hidróxidos (Young y Jordan, 1996, p. 114; Tünay et al., 2010, p. 277).

El segundo proceso fue desarrollado por la compañía Heath Steel Mines Ltd. Se denomina proceso Noranda y consiste en la adición de dióxido de azufre puro a la solución o pulpa para bajar el pH hasta un valor en el rango de 7,0 a 9,0. Una vez que ha bajado el pH, se añade solución de sulfato cúprico en un flujo que permita alcanzar la concentración de cianuro deseada en el efluente final (Lawrence et al., 2004, p. 263; Mudder et al., 2001, p. 327).

La reacción 1.26 es la de oxidación del ion cianuro con dióxido de azufre (Mudder et al., 2001, p. 327).



El pH ideal para estas reacciones es 9,0, pero se hacen normalmente a un pH entre 7,5 y 8,5, y debido a la formación de ácido en las reacciones, se utiliza cal para controlar el pH. El desempeño del proceso depende en gran medida de que el pH se mantenga dentro del rango de trabajo. La temperatura tiene poco efecto en el rendimiento del proceso si se mantiene entre 5 y 60°C (Marsden y House, 2006, p. 489).

El dióxido de azufre que se utiliza para la reacción puede ser suministrado como dióxido de azufre líquido, sulfito de sodio o como metabisulfito de sodio. También se ha usado bisulfito de amonio pero la adición de amonio al efluente puede tener un impacto negativo. El requerimiento de cal se calcula a partir de la producción anticipada de ácido que indican las reacciones. El oxígeno necesario para la reacción se suministra por burbujeo de aire atmosférico dentro de los reactores (Mudder et al., 2001, p. 328).

El cobre soluble que actúa como catalizador se añade normalmente en solución de sulfato de cobre pentahidratado en una concentración equivalente a entre 10 y 20% de la concentración inicial de cianuro WAD. En ciertos casos ya existe cobre disuelto en las soluciones a tratar y esto reduce o elimina por completo la adición de sulfato de cobre (Mudder et al., 2001, p. 328).

1.2.5 FOTÓLISIS

La fotólisis puede favorecer las reacciones redox al proveer energía de la radiación electromagnética para catalizar el proceso de transferencia de electrones. La radiación electromagnética es absorbida y esto hace que un electrón del compuesto que la absorbe pase del estado fundamental al estado excitado, posiblemente separando electrones apareados. Así, los electrones se vuelven más susceptibles al ambiente químico y más aptos para participar en las reacciones redox. La foto-reducción ocurre cuando el compuesto que absorbe

radiación dona el electrón excitado a otra especie. La foto-oxidación se da cuando el compuesto que absorbe radiación acepta un electrón de otra especie para llenar su deficiencia electrónica. El electrón excitado eventualmente vuelve al estado fundamental en los productos de la reacción (Young y Jordan, 1996, p. 115).

La energía necesaria para que los electrones pasen del estado fundamental al estado excitado es usualmente equivalente al que posee la radiación ultravioleta. Por eso se acostumbra a catalizar muchas reacciones redox por exposición a fuentes de radiación como son lámparas inclusive a la luz solar. La fotólisis directa implica que el compuesto que es objeto de la remediación absorbe la radiación, mientras que la fotólisis es indirecta cuando el compuesto que absorbe radiación está disponible para transferir el fotón a la especie objeto de la remediación. La fotólisis directa no se aplica al cianuro libre pero ocurre con algunos complejos WAD y SAD, en particular los complejos del ferro y del ferri cianuro (Young y Jordan, 1996, p. 115).

1.3 INFLUENCIA DEL CARBÓN ACTIVADO, COBRE Y PLATA EN LA OXIDACIÓN DEL CIANURO

1.3.1 CARBÓN ACTIVADO EN LA OXIDACIÓN DEL CIANURO

El carbón activado ha sido ampliamente utilizado por mucho tiempo para la remoción de cianuro presente en soluciones acuosas. Es conocido que actúa en dos maneras, primero tiene la capacidad para adsorber el cianuro en su extensa superficie específica y en segundo lugar es conocida su acción como catalizador en la oxidación de cianuro a cianato. Las reacciones 1.27 y 1.28 son las responsables de la pérdida de cianuro en soluciones alcalinas en las que los mecanismos naturales de descomposición del cianuro no resultan efectivos (Adams, 1990, pp. 37-39).





Una comparación entre los potenciales de reducción de las reacciones 1.27 y 1.28 y los potenciales de reducción típicos del carbón activado (+0,40 V a +0,08V), muestra que la oxidación del cianuro por acción del carbón activado es termodinámicamente favorable por ambos mecanismos (Adams, 1990, p. 39).

El oxígeno se adsorbe en el carbón de manera más simple que otros elementos, y los complejos de carbono y oxígeno formados pueden influenciar reacciones en la superficie, así como las propiedades eléctricas y catalíticas del carbón. Se conoce que aproximadamente el 90% del oxígeno en la superficie del carbón activado está presente como grupos funcionales mientras que el porcentaje restante está formando puentes enlaces neutros. El oxígeno molecular actúa como el oxidante para la oxidación de cianuro a cianato en presencia de carbón activado de acuerdo al siguiente mecanismo con las reacciones 1.29 y 1.30 que tienen como reacción resultante la 1.10 (Marsden y House, 2006, p. 313; Adams, 1990, p. 43).



Una parte del cianato producido de esta manera se descompone para formar una mezcla de amoníaco, carbonato y urea, dependiendo de las condiciones de la solución. Además, se produce una pérdida de cianuro adicional debida a la adsorción de cianuro en el carbón activado (Adams, 1990, p. 43).

La cinética de la oxidación de cianuro con carbón activado como catalizador fue ampliamente estudiada por Adams, en la Figura 1.3 se presentan los resultados de un típico experimento de oxidación de cianuro con aire y carbón activado como catalizador. Utilizando una escala semi-logarítmica se encontró una relación lineal representativa para la cinética de la reacción estudiada (Adams, 1990, p. 39).

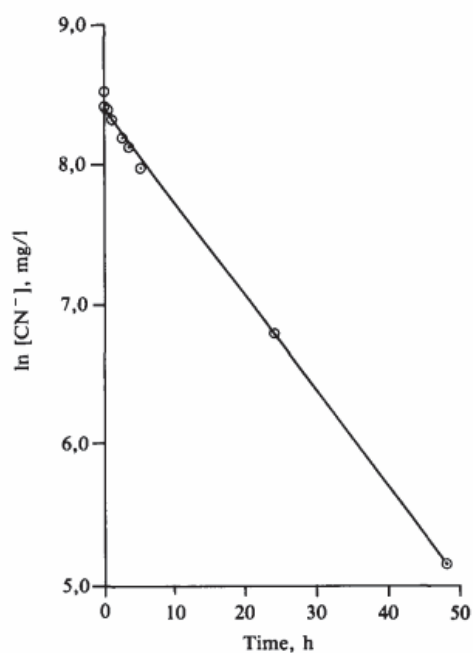


Figura 1.3. Representación de la cinética de la oxidación de cianuro con aire y catalizada con carbón activado (Adams, 1990, p.39)

En la Figura 1.3 se sugiere que la oxidación de cianuro en presencia de aire y carbón activado puede ser considerada una reacción de primer orden que se describe con las ecuaciones 1.31 y 1.32 (Adams, 1990, p. 39).

$$\frac{d[\text{CN}^-]}{dt} = -k_1[\text{CN}^-] \quad [1.31]$$

$$\ln[\text{CN}^-]_t = \ln[\text{CN}^-]_0 - k_1 t \quad [1.32]$$

Donde k_1 es la constante de reacción de primer orden. La ecuación 1.32 es la forma integrada y reordenada de la ecuación 1.31 y corresponde a la gráfica de la Figura 1.3 (Adams, 1990, p. 39).

1.3.2 COBRE EN LA OXIDACIÓN DEL CIANURO

La adsorción de cianuro por parte del carbón activado se ve ampliamente incrementada por la impregnación del carbón con cloruro cúprico. Los iones

cúpricos reaccionan con el cianuro para formar el ion cianocúprico que se reduce al ion cianocuproso mediante las reacciones 1.33 y 1.34 (Ramachandra, 2006, p. 471).



El potencial estándar de reducción típico de un carbón activado es de +0,24V permite que se den estas reacciones. Adicionalmente, el ion cianocúprico es inestable en solución acuosa y se descompone rápidamente formando cianógeno y luego el cianógeno se descompone formando cianato como muestran las ecuaciones 1.35 y 1.36 (Ramachandra, 2006, p. 471).



El resultado de esto es que una parte del cianuro se adsorbe en el carbón mientras que otra se oxida a cianato y permanece en la solución (Ramachandra, 2006, p. 471).

En el estudio de Deveci, 2006, se impregnó cloruro cúprico en carbón activado para utilizarlo como catalizador de la oxidación de cianuro con aire. Se utilizó solución de 1 g/L de cloruro cúprico para impregnar, obteniéndose un carbón activado con un 0,43% de cobre que se aplicó en diferentes concentraciones el cual permitió eliminar el 35,4% del cianuro contenido en una solución cuyo contenido inicial fue del 100 mg/L, cuando se aplicaron 4,5 g/L de carbón impregnado con cloruro cúprico a la solución (Deveci et al., 2006, p. 201).

En la Figura 1.4 se presentan los resultados de las pruebas de remoción de cianuro que fueron realizadas.

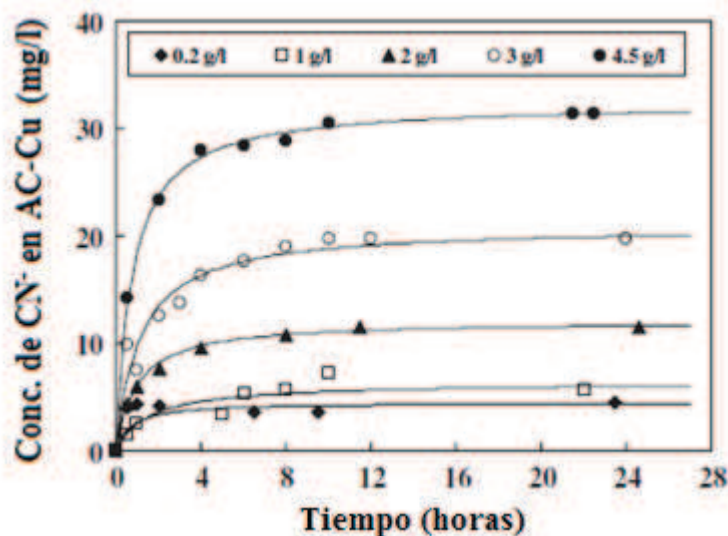


Figura 1.4. Remoción de cianuro de una solución utilizando carbón activado impregnado con cobre (AC – Cu) a concentraciones desde 0,2 a 4,5 g/L ($[\text{CN}^-]_0 = 100 \text{ mg/L}$, pH 10,5 -11) (Deveci et al., 2006, p. 201)

1.3.3 PLATA EN LA OXIDACIÓN DEL CIANURO

Existen otros estudios sobre la modificación del carbón activado en los cuales el carbón es impregnado con soluciones de sales de níquel o plata. Los resultados mostraron que el carbón impregnado con sales de plata tiene una capacidad de remoción de cianuro cercana al doble de la capacidad del carbón impregnado con sales de níquel y cuatro veces la del carbón activado sin modificar (Adhoum y Monser, 2002, p. 21).

Las capacidades aumentadas del carbón activado impregnado se explican por adsorción o por intercambio con grupos cargados positivamente en la superficie del carbón. El cianuro es probablemente removido en forma de complejos cianuro metálicos como $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ o $\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$. Es importante destacar que en el caso del níquel, el metal impregnado llegó a representar el 0,4% de la masa total de carbón activado modificado mientras que su capacidad de remoción de cianuro se vio incrementada por un factor mayor a dos gracias a la impregnación (Adhoum y Monser, 2002, p.21).

En el estudio de Deveci, 2006, se concluyó que el carbón activado impregnado con nitrato de plata fue más efectivo en la eliminación de cianuro que el carbón activado impregnado con cloruro cúprico. La razón de este mejor desempeño fue atribuido a que se consiguió una mayor concentración de plata que de cobre en el carbón activado impregnado lo que significó mayor disponibilidad de iones metálicos para catalizar la oxidación. Se preparó el carbón activado impregnado con nitrato de plata utilizando dos soluciones distintas. El carbón impregnado con solución de nitrato de plata de 1 g/L permitió conseguir un 0,06% de plata en el carbón activado, mientras que cuando se utilizó solución de 10 g/L se alcanzó un contenido de 5,07% de plata. Este último carbón activado impregnado fue el que se utilizó en diferentes concentraciones y los resultados de la eliminación de cianuro lograda se presentan en la Figura 1.5 (Deveci et al., 2006, p. 200).

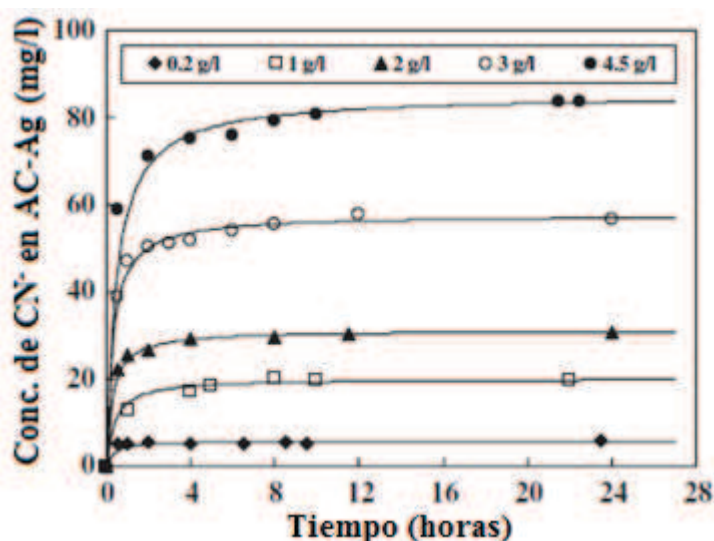


Figura 1.5. Remoción de cianuro de una solución utilizando carbón activado impregnado con plata (AC – Ag) a concentraciones desde 0,2 a 4,5 g/L.
 $[\text{CN}^-]_0 = 100 \text{ mg/L}$, pH 10,5 -11)
 (Deveci et al., 2006, p. 201)

El uso del carbón activado impregnado con nitrato de plata con un contenido de 5,07% de plata permitió eliminar el 92,3% del cianuro presente en una solución de 100 mg/L de concentración inicial cuando se pusieron 4,5 g/L de este carbón activado modificado. Lo que significó el mayor porcentaje de eliminación en las pruebas realizadas por Deveci, 2006. Se le atribuye la mejor capacidad de eliminación de cianuro de los carbones activados impregnados a la formación y

adsorción de complejos metálicos cianurados de la forma $\text{Me}(\text{CN})_n^{-(n-1)}$ donde Me representa un átomo metálico. Este efecto de formación de complejos también es sugerido por los cálculos de especiación química con el pH de las soluciones (Deveci et al., 2006, p. 206).

El efecto de formación de complejos también es sugerido por los cálculos de especiación química con el pH de las soluciones que indican que la plata puede estar presente en forma de AgCN y $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ a pH como el que tuvieron las soluciones con las que se trabajó (Deveci et al., 2006, p. 206).

1.4 ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE

1.4.1 DEPOSICIÓN ELECTROQUÍMICA

La deposición electroquímica de metales y aleaciones implica la reducción de iones metálicos presentes en electrolitos ya sean acuosos, orgánicos o sales fundidas. Este proceso de reducción puede lograrse mediante dos procesos distintos: el primero es el proceso de electrodeposición en el que los electrones vienen de una fuente de poder externa, y el segundo es la deposición auto catalítica en la que un agente reductor es la fuente de electrones sin fuente de poder externa (Paunovic y Schlesinger, 2006, p. 1).

1.4.2 CELDA ELECTROLÍTICA

Una celda electrolítica consiste de dos electrodos inmersos en un electrolito. El electrolito puede ser una sustancia iónica fundida o una solución acuosa de una sustancia iónica. En ambos casos, el electrolito debe contener iones positivos y negativos libres de moverse. Los electrodos se conectan a una fuente externa de voltaje que remueve los electrones de un electrodo y los transfiere al otro. El electrodo denominado ánodo tiene carga positiva mientras que otro electrodo se denomina cátodo y tiene carga negativa (Clugston y Flemming, 2000, p. 232).

Los componentes básicos de una celda de electrodeposición son dos electrodos metálicos, solución acuosa con iones disueltos, una fuente externa. El tanque que contiene a la solución electrolítica debe ser elaborado de un material no conductor como vidrio, plástico o baquelita. Los electrodos suspendidos en la solución electrolítica se conectan a la fuente de voltaje mediante cables. En la Figura 1.6 se presenta el esquema de una celda electrolítica (Paunovic y Schlesinger, 2006, p. 139).

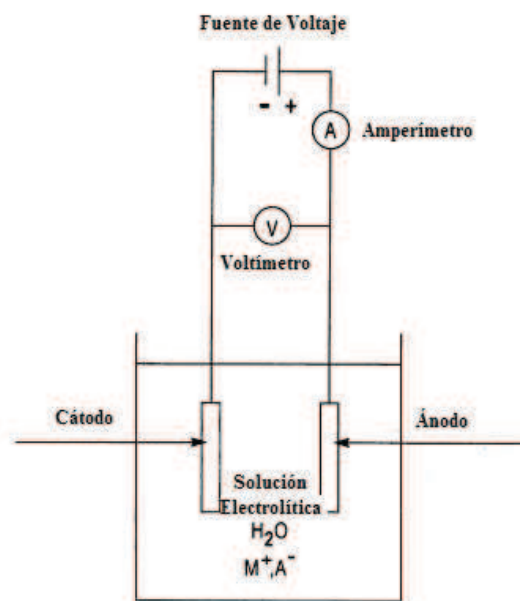


Figura 1.6. Esquema de una celda electrolítica
(Paunovic y Schlesinger, 2006, p. 139)

1.4.3 PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN

La reacción anódica implica que el ánodo metálico se oxide por lo que sus átomos se ionizan. Estos iones metálicos ingresan a la solución electrolítica mientras que los electrones dejan el ánodo a través de la corriente eléctrica. La reacción 1.37 representa lo que ocurre en el ánodo. Por la pérdida de átomos metálicos, el ánodo se corroe. La reacción 1.38 es la que ocurre en el caso específico del cobre (Askeland, 1988, p. 673).



La reacción catódica es la reversa de la anódica. En ella los iones metálicos, ya sea añadidos al electrolito o formados por la reacción anódica, se combinan con los electrones en el cátodo. El metal formado cubre la superficie del cátodo. La reacción 1.39 es la inversa de la 1.37 y ocurre en el cátodo. Cuando se trata de electrodeposición de cobre, la reacción es la 1.40 (Askeland, 1988, p. 673).



Se siguen las leyes generales de la electrólisis (Bilurbina et al., 2003, p. 110):

- a) El cambio químico que se produce por el paso de una corriente eléctrica, es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa (Bilurbina et al., 2003, p. 110).
- b) La cantidad de sustancia liberada por una cantidad de electricidad es proporcional al peso equivalente de esta sustancia en la reacción que tiene lugar. Cada 96500 C depositan un equivalente. Esta equivalencia se conoce como Ley de Faraday y de acuerdo a ella, el número de gramos depositados se puede calcular mediante la ecuación 1.41 (Bilurbina et al., 2003, p. 110):

$$G = \frac{ItM}{Fn} \quad [1.41]$$

Donde:

G: gramos de sustancia liberados en un electrodo

I: intensidad de la corriente en amperios

t: tiempo en segundos

M: peso atómico o molecular de la sustancia liberada

F: 1 faraday \approx 96500 coulombs

n: cambio de valencia (2 para el cobre)

1.4.4 EFECTO DE LA FORMA GEOMÉTRICA DEL OBJETO A SER SOMETIDO A ELECTRODEPOSICIÓN

La forma geométrica y el contorno de un objeto a ser electrodepositado afecta el espesor de la capa depositada. En general, objetos con esquinas agudas y puntos prominentes tienden a tener depósitos de mayor espesor en los puntos agudos externos y de menor espesor en las zonas más deprimidas. La causa de esta diferencia en el espesor de la capa resultante es que la corriente continua fluye de manera más densa en dirección a las salientes agudas del material que a las zonas deprimidas menos accesibles. Dicho de otra manera la distribución de corriente en las líneas de campo eléctrico existente entre el cátodo y el ánodo en solución son las responsables del espesor obtenido de la capa electrodepositada (Lou y Huang, 2006, p. 6).

1.4.5 CARBÓN COMO SUSTRATO PARA ELECTRODEPOSICIÓN

El carbono en general, es un elemento de poca conductividad eléctrica. Sin embargo, las formas cristalizadas del carbono pueden poseer electrones que no participan en los enlaces de la estructura cristalina del sólido, estos electrones móviles son los que permiten cierta conducción de electricidad pero más pobre que en los metales (Yahya, 2010, p. 26).

De lo anterior se desprende que la conductividad eléctrica del carbono tiene fuerte dependencia en la estructura que adoptan los átomos de acuerdo a la forma en que se presenta este elemento. Las diferentes configuraciones moleculares que puede tomar un elemento reciben el nombre de formas alotrópicas y en el caso del carbono, las más importantes son: diamante, grafito y carbón amorfo. En la

estructura del diamante, cada átomo de carbono está unido covalentemente a otros cuatro átomos de carbono dispuestos en tetraedro que se agrupan formando una estructura cristalina tridimensional que le concede extraordinarias propiedades de dureza pero a la vez lo hace un material aislante al no dejar electrones libres en los átomos de carbono que conforman su estructura. La disposición de los átomos de carbono que conforman la estructura del diamante se puede apreciar en la Figura 1.7 (Marsh y Rodríguez, 2006, p.14).

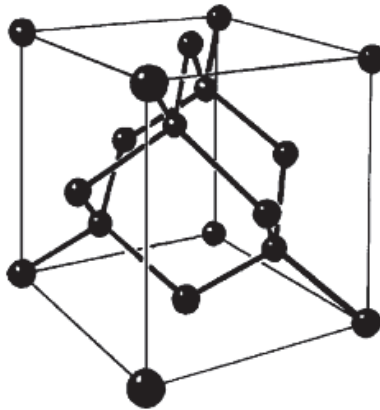


Figura 1.7. Diagrama de la estructura del diamante que muestra la disposición de los átomos de carbono
(Marsh y Rodríguez, 2006, p. 15)

El grafito es por otra parte un alótropo del carbono que tiene la propiedad de ser un material conductor de la electricidad. En su estructura, cada átomo de carbono está covalentemente unido a tres átomos de carbono formando láminas de redes hexagonales separadas 0,335 nm. Es debido esta estructura laminar que el grafito es un material blando que se exfolia con facilidad lo que es crucial para los usos que tiene. Esta estructura particular que presenta el grafito puede apreciarse en la Figura 1.8.

La capacidad del grafito de conducir la electricidad viene dada por el electrón no apareado presente en cada átomo de carbono de su estructura. Estos electrones no apareados forman planos deslocalizados o móviles, por encima y debajo de los planos de átomos de carbono que le dan cierto carácter metálico al grafito al permitir un flujo de electrones que se puede producir únicamente a lo largo de los planos de las capas (Menéndez, 2012, p. 80).

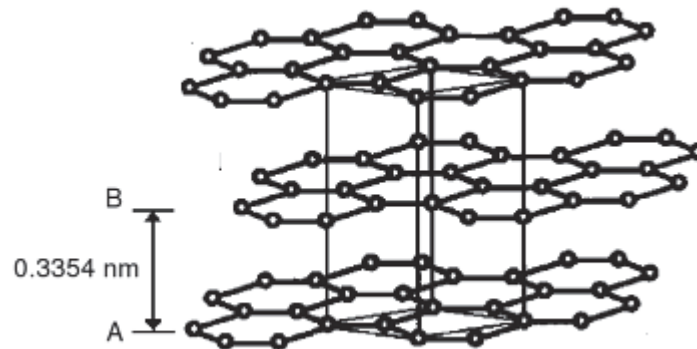


Figura 1.8. Diagrama de la estructura del grafito que muestra la disposición de los átomos de carbono
(Marsh y Rodríguez, 2006, p. 15)

Carbono amorfo, es el nombre que recibe el carbono cuando no tiene ninguna estructura cristalina uniforme. Dentro de su estructura, cierto orden de corto alcance puede observarse, pero definitivamente no hay ningún patrón de largo alcance en las posiciones que ocupan los átomos. Los materiales carbonáceos considerados carbón amorfo son el negro de humo y el carbón activado.

El carbón completamente amorfo puede crearse, pero la mayor parte del material descrito como amorfo contiene en baja cantidad ciertas estructuras cristalinas granulares (cristalitas) correspondientes al grafito e incluso al diamante pero con cantidades variables de carbono amorfo que las mantienen juntas, haciéndolo técnicamente un material policristalino. Además pueden existir dentro de la estructura ciertas cantidades de otros elementos que forman impurezas cristalinas (Brown et al., 2004, p. 901).

2. METODOLOGÍA

Con el propósito de estudiar la oxidación de cianuro con carbón activado modificado y aire, se comenzó por preparar el carbón activado por impregnación con soluciones de nitrato cúprico o nitrato de plata según el caso y se prepararon cantidades apropiadas para ser utilizadas a escala de planta piloto. La impregnación consiste básicamente en sumergir cargas de carbón activado previamente lavado en las mencionadas soluciones por un tiempo de algunos días. Una vez separado de la solución y secado, este carbón activado modificado pudo ser utilizado en los ensayos de oxidación del cianuro.

Ensayos que fueron realizados a escala piloto para analizar el efecto de aplicar este catalizador a la oxidación de soluciones cianuradas sintéticas o efluentes cianurados reales, operando con 100 L de solución. Algunas variables fueron analizadas en estos experimentos, como la concentración inicial de la solución, la concentración catalizador y el tipo de carbón activado impregnado utilizado. La concentración de cianuro fue medida con un electrodo específico para cianuro en estos ensayos a escala piloto.

Posteriormente se produjo un nuevo tipo de carbón activado modificado, esta vez se obtuvo carbón activado con cobre metálico en su superficie. Este nuevo material se obtuvo por electrodeposición en una celda electrolítica con una placa de cobre como ánodo y un cátodo especialmente diseñado para que permita sostener los granos de carbón activado, hacer que éstos entren en contacto con la solución electrolítica y ser conectado a la fuente de corriente continua. La solución electrolítica utilizada se compuso de ácido sulfúrico y sulfato de cobre. Se utilizaron dos diferentes maneras para conformar el cátodo para determinar la mejor opción de acuerdo a los resultados. En los ensayos de electrodeposición, se estudió la influencia del voltaje, la distancia entre electrodos y el tiempo de duración. Las pruebas se limitaron a la electrodeposición de cobre sobre 10 g de carbón activado debido a que tuvieron que realizarse a pequeña escala.

Las pruebas de oxidación de cianuro en solución aplicando aire y usando el carbón activado con cobre electrodepositado se hicieron en laboratorio en un recipiente cilíndrico que fue utilizado como reactor y al que se le suministró aire desde el fondo mediante un difusor. En estas pruebas se trabajó con 1,5 L de solución y en ellas se analizaron las mismas variables que fueron consideradas para las pruebas en planta piloto. Adicionalmente, se realizaron pruebas comparativas a igual escala, usando carbón activado sin modificar e impregnado tanto con nitrato cúprico como con nitrato de plata. La medición de la concentración de cianuro fue hecha por titulación con solución de nitrato de plata para estos ensayos.

Finalmente se utilizaron los resultados obtenidos en planta piloto para crear un diagrama de flujo de un proceso de oxidación de cianuro basado en los procesos aplicados en este trabajo y que permita alcanzar los valores de concentración de cianuro libre permitidos por la normativa ambiental. Luego del diagrama de flujo, se pasó al diseño de una planta para tratar 10 m³ diarios de un típico efluente cianurado de minería. El diseño de la planta contó con el detalle de los equipos, distribución de áreas, evaluación económica y demás aspectos necesarios para la instalación de una planta de este tipo. En la Figura 2.1 se presenta un diagrama general de la metodología seguida.

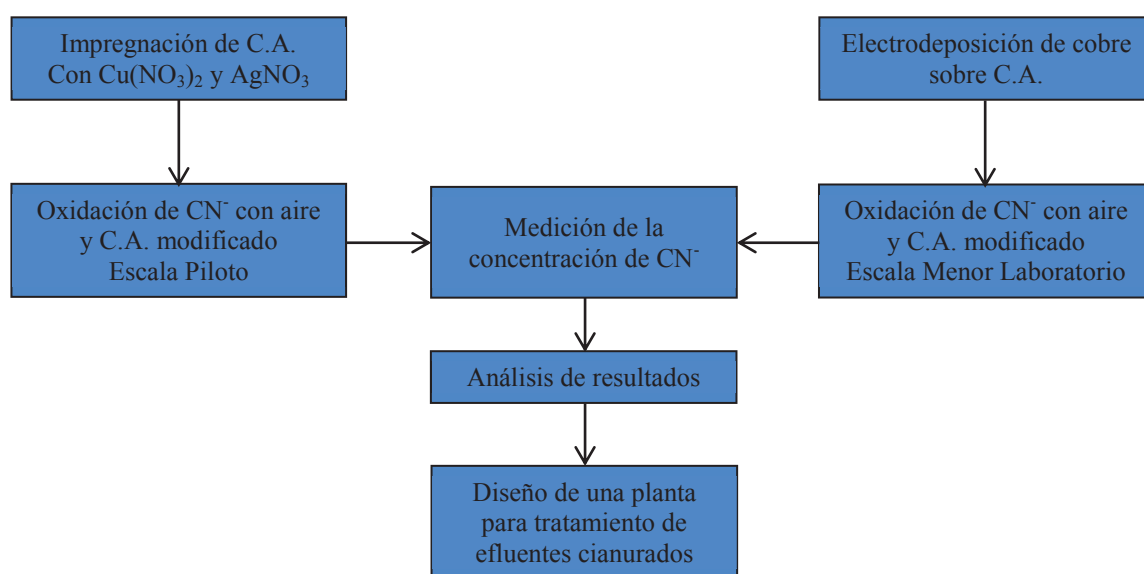


Figura 2.1. Diagrama general de la metodología seguida en el proyecto

2.1 IMPREGNACIÓN DE NITRATO DE COBRE Y NITRATO DE PLATA EN CARBÓN ACTIVADO

2.1.1 LAVADO DEL CARBÓN ACTIVADO

El índice de yodo del carbón activado se determinó siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo I. Antes de proceder a la impregnación, el carbón activado fue pasado por un tamiz de abertura 4,75 mm, para luego ser lavado con agua potable en proporción carbón activado – agua igual a 1:4, este proceso incluyó media hora de agitación moderada del carbón en agua. Luego de esto, una serie de 3 enjuagues a similar proporción para terminar con un enjuague final sobre el tamiz de abertura 4,75 mm que permita eliminar en su mayoría a las partículas más finas contenidas en el carbón y las que se formaron por la atrición del mismo durante la etapa de agitación. Posteriormente se lleva el carbón lavado al proceso de secado en estufa a temperatura de 100 a 110 °C. En la Figura 2.2 se presenta el procedimiento de lavado del carbón activado.

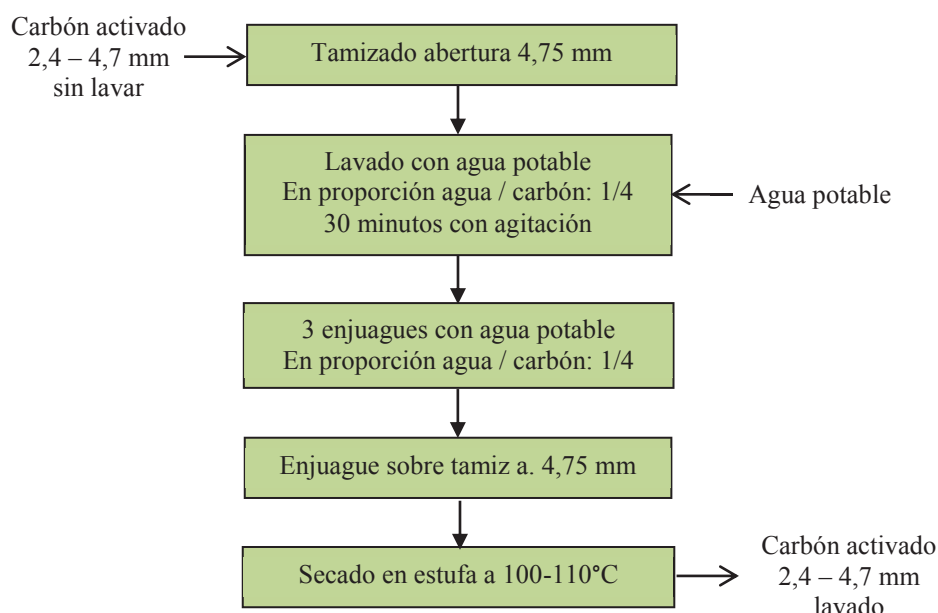


Figura 2.2. Lavado y selección del carbón activado para impregnación

2.1.2 IMPREGNACIÓN DE NITRATO CÚPRICO Y NITRATO DE PLATA

Se prepararon 5 L de solución de nitrato de cobre con una concentración en cobre de al menos 4000 mg/L a pH de alrededor de 4, que es inferior al pH de precipitación del cobre. Dentro de un pequeño tanque acondicionado para el procedimiento de impregnación se colocaron cargas de 1,5 a 2,0 kg de carbón lavado junto con el volumen de solución que va a ser utilizado en la prueba, desde 5 hasta 6 litros en algunas pruebas.

Se tapó el tanque que contenía la solución y el carbón activado lavado y se procedió a aplicar agitación mecánica a 3000 rpm durante una hora. Posteriormente, se dejó reposar al carbón activado y la solución durante un tiempo de 3 días en el mismo tanque. Para la impregnación con nitrato de plata se siguió un procedimiento similar, pero con la diferencia de que se cubrió el tanque para que la luz no descomponga el nitrato de plata presente en la solución.

Luego de dejar reposar la solución se recuperó la misma y se la filtró para separar las partículas finas de carbón que se generan por efecto de la agitación como se explicó anteriormente. Mientras que el carbón se retiró del tanque y se colocó en una bandeja con mayor superficie horizontal para facilitar la evaporación del agua contenida en la solución. Además se adicionó aproximadamente 0,5 L de solución de impregnación limpia para contribuir a aumentar de esta manera el contenido de cobre en el carbón activado impregnado. Esta bandeja se llevó a la estufa para evaporar hasta sequedad la solución con lo que terminó el proceso de impregnación del carbón.

Para determinar el contenido metálico del carbón activado impregnado, se obtuvo una muestra, se la pulverizó, se la calcinó y se efectuó la disgregación ácida de la misma para luego analizar la solución de disgregación por absorción atómica. El contenido metálico del carbón activado al final del proceso de impregnación se calcula a partir de los resultados de la absorción atómica y siguiendo los cálculos detallados en el Anexo IV. Todo el proceso de la impregnación de nitrato cúprico y nitrato de plata se resume en la Figura 2.3.

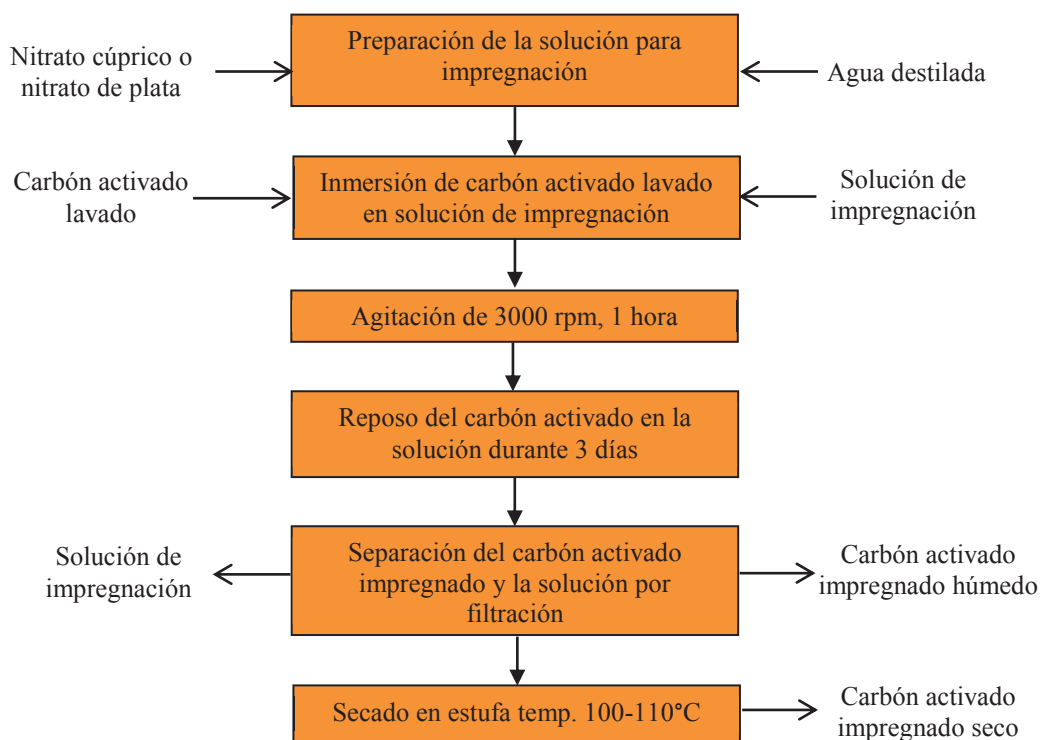


Figura 2.3. Impregnación del carbón activado con nitrato cúprico o nitrato de plata

2.2 ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE SOBRE CARBÓN ACTIVADO

2.2.1 ELECTRODOS PARA ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE SOBRE CARBÓN ACTIVADO

En la elaboración de un electrodo que permita la electrodeposición de cobre metálico sobre granos de carbón, se probó dos tipos diferentes de electrodos. El primero consistió de un arreglo de alambre galvanizado soldado en forma de escoba que se presenta en la Figura 2.4 con sus medidas, el cual se introdujo dentro de una funda hecha de malla plástica donde se colocó el carbón activado para ser sometido a electrodeposición.

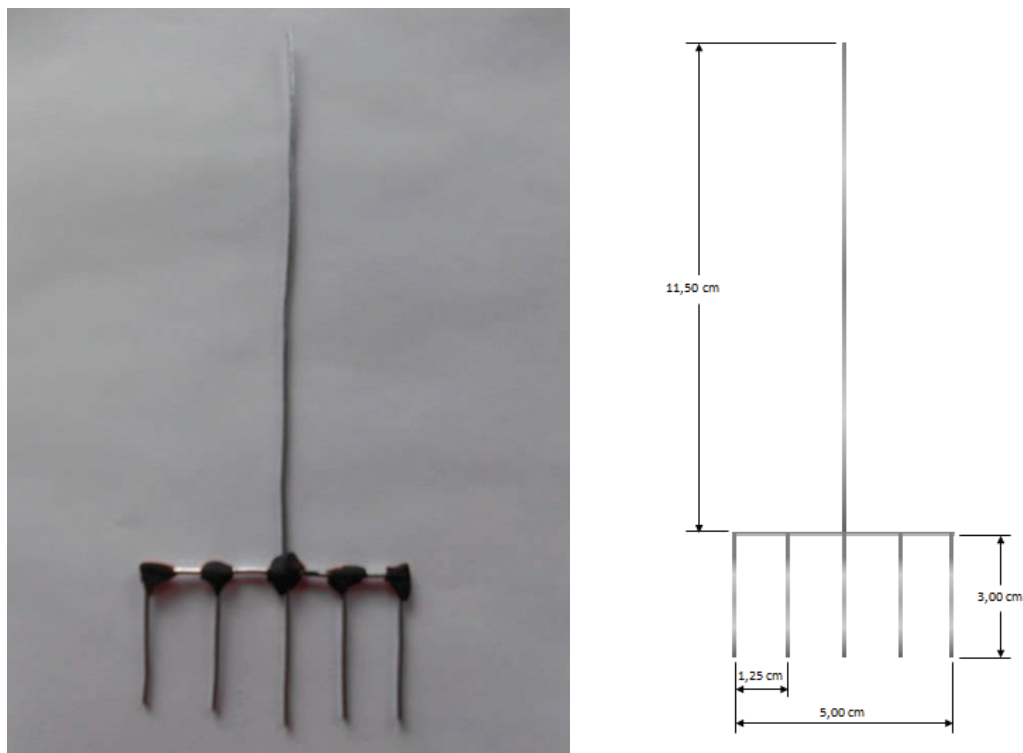


Figura 2.4. Electrodo tipo escoba utilizado en las pruebas de electrodeposición

El otro tipo de electrodo utilizado consistió de una placa delgada de acero inoxidable de $7,0 \times 4,5$ cm como la presentada en la Figura 2.5 junto con un gráfico que indica sus medidas. Esta placa fue insertada dentro de una funda hecha de malla plástica que se ajustó a las dimensiones de la placa.

La placa insertada dividió a la funda en dos cavidades de tal forma que a ambos lados de la placa se colocaron los granos de carbón activado para electrodeposición que quedaron sostenidos por la funda.

Para las pruebas de electrodeposición, 10 g de carbón activado fueron introducidos dentro de la funda. Se repartió equitativamente el carbón entre las dos cavidades que formó la placa de tal manera que aproximadamente 5 g de carbón quedaron a cada lado de la placa. La funda fue cerrada con hilo de nylon para que los granos de carbón estuvieran más compactados y el contacto entre éstos y con la placa sea mejor lo que mejora las condiciones de conducción de electricidad necesarias para la electrodeposición.

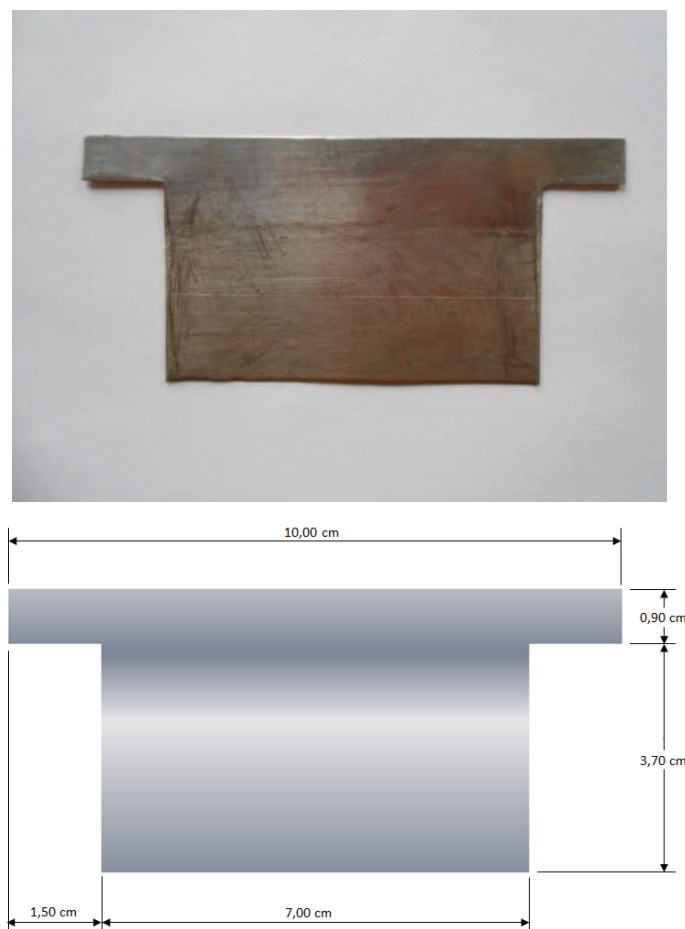


Figura 2.5. Electrodo tipo placa utilizado en las pruebas de electrodeposición

El electrodo para electrodeposición conformado por la placa de acero y los granos de carbón activado en su respectiva funda puede apreciarse en la Figura 2.6, este electrodo fue utilizado como cátodo para la celda electrolítica. El diseño del mismo fue realizado buscando una mejor electrodeposición de cobre sobre el carbón activado al anteponer este último a la placa que si estaría libre se cubriría de una capa de cobre uniforme tal como ocurre en la electrodeposición de cobre sobre otros metales.

El ánodo fue una placa delgada (1,5 mm de espesor) de cobre de 5 × 5 cm como la que muestra la Figura 2.7. Se debió tener algunas placas disponibles de similares características porque se sabe que el ánodo de cobre se va consumiendo al liberar iones de cobre cargados positivamente en la solución durante la electrodeposición.

Es importante indicar que los electrodos usados tuvieron dimensiones similares para un mejor desempeño de la electrodeposición porque esto permite mantener densidades de corriente cercanas en ambos electrodos. Las dimensiones pequeñas de los electrodos también tienen la función de contribuir a incrementar la densidad e corriente y permitir así la formación de un recubrimiento de cobre de mayor espesor y uniformidad.



Figura 2.6. Cátodo para electrodeposición conformado por la placa de acero y el carbón activado en la funda de malla plástica

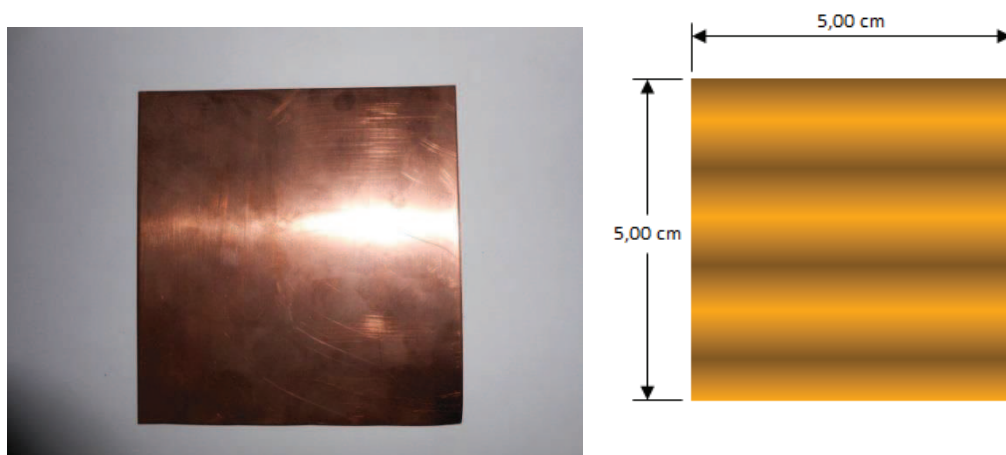


Figura 2.7. Placa de cobre que constituyó el ánodo para la electrodeposición

2.2.2 ENSAYOS DE ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE SOBRE CARBÓN ACTIVADO

Para la electrodeposición se colocaron los electrodos dentro de un recipiente con 2 litros de solución electrolítica con un contenido de 120 g/L de ácido sulfúrico y 60 g/L de sulfato de cobre (CuSO_4). Para las pruebas, se aplicaron dos distancias distintas de separación entre los electrodos, 5 y 10 cm. La duración de las mismas también se modificó, midiéndose tiempos de 15, 30 y 60 minutos. Lo que se varió además fue la diferencia de potencial y de esta manera la intensidad de la corriente necesaria para la electrodeposición. En todas las pruebas se midió la intensidad de corriente al inicio, a la mitad del tiempo y al final para obtener un valor promedio que se pueda utilizar en los cálculos. En la Figura 2.8 se presenta un esquema de la celda electrolítica armada para esta electrodeposición.

Al inicio de las pruebas, la diferencia de potencial entre los electrodos se hizo variar hasta encontrar un valor adecuado para tener una significativa cantidad de cobre electrodepositado sobre el carbón. Es por esto que las primeras pruebas se consideran preliminares, todas tuvieron duración de una hora y se aplicaron voltajes desde los 0,25 V.

Al final del proceso de electrodeposición, el cátodo fue retirado, dejando escurrir el exceso de solución dentro del recipiente; luego lavado con agua destilada. Finalmente se lo llevó a la estufa para dejarlo secar durante unas 3 horas a temperatura de entre 100 y 110 °C.

Una vez seco el cátodo con cobre electrodepositado, se procedió abrirlo cortando el hilo de nylon y dejando libres a los granos de carbón activado con cobre electrodepositado lavado del mismo con agua destilada para eliminar la acumulación de sulfato de cobre que se produce en su superficie y así evitar que produzca un descenso en el pH de la solución cuando se lo utilice para la oxidación del cianuro por efecto de los iones sulfato.

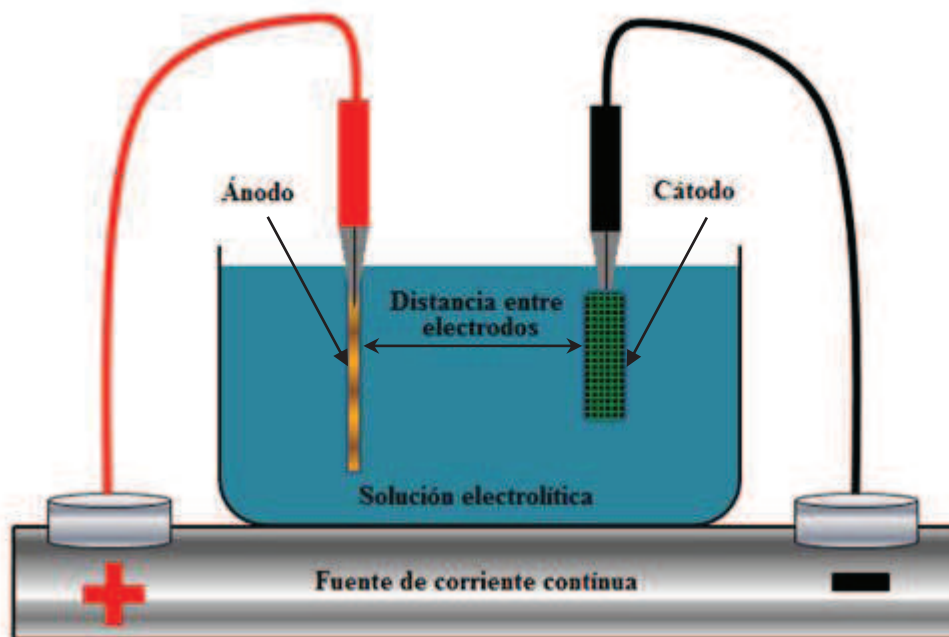


Figura 2.8. Esquema de la celda electrolítica usada para electrodeposición de cobre sobre carbón activado

2.2.3 OBTENCIÓN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ELECTRODEPOSICIÓN

Para determinar el aumento de masa del carbón activado luego de ser sometido a electrodeposición de cobre, se pesó el carbón antes y después del proceso. También fue necesario controlar la variación de masa de la placa de acero inoxidable o del arreglo de alambre tipo escoba que formaron parte del electrodo puesto que el cobre también llega a electrodeponerse sobre estos objetos metálicos. Los resultados obtenidos se presentan en la sección Anexo VI.

El aumento en la masa del carbón activado esperado, se deberá en gran medida a la capa de cobre que se electrodeposita y se puede despreciar cierta cantidad de sulfato de cobre procedente de la solución que llega a impregnarse en el carbón. Luego con estos datos obtenidos de variación en la masa de carbón y las partes metálicas de los electrodos, junto con los datos de corriente y tiempo, se llegó a determinar la masa de cobre electrodepositada experimental y teórica que

servieron para evaluar la eficiencia del proceso, también se llegó a conocer el porcentaje que representa el cobre electrodepositado en relación con la masa total del carbón activado modificado por electrodeposición. Los cálculos de esta sección se presentan en la sección Anexo V.

2.3 OXIDACIÓN DE CIANURO EN SOLUCIONES Y EFLUENTES CIANURADOS CON CARBÓN ACTIVADO MODIFICADO, A NIVEL LABORATORIO Y PLANTA PILOTO

2.3.1 ENSAYOS EN PLANTA PILOTO DE OXIDACIÓN DE CIANURO CON AIRE Y CARBÓN ACTIVADO SIN MODIFICAR Y CARBÓN ACTIVADO IMPREGNADO

Las pruebas de oxidación del cianuro en planta piloto fueron realizadas a temperaturas de entre 15 y 20 °C y a 0,72 atm utilizando inicialmente soluciones sintéticas y luego efluentes reales obtenidos en el laboratorio a partir de procesos de cianuración.

Las soluciones sintéticas fueron elaboradas de tal manera que se asemejen a los efluentes reales de empresas mineras por esta razón se utilizó agua potable como solvente y el pH básico fue fijado en un valor de 10,5 y regulado con cal. La concentración de cianuro de sodio fue ajustada de acuerdo a los requerimientos de las pruebas a realizar. Las soluciones reales utilizadas fueron producto de la cianuración de una pulpa de mineral.

La oxidación del cianuro fue efectuada en un tanque de 32 galones de capacidad al que se lo acondicionó poniendo un difusor de aire en su parte inferior el cual fue elaborado para adaptarse a las medidas del tanque y se presenta en la Figura 2.9., junto con sus principales medidas. Este difusor fue alimentado por un compresor de 2 etapas, 5 HP de potencia y con un tanque de 170 L que se hizo operar con una presión en la tubería de salida de 10 psi manteniendo un flujo

constante de 9500 L/h que permitió suministrar el oxígeno necesario para la reacción además de agitación neumática para mantener el lecho de carbón activado agitado y suspendido en la solución. En la Figura 2.10 se presenta un esquema de las pruebas de oxidación de soluciones cianuradas en planta piloto.

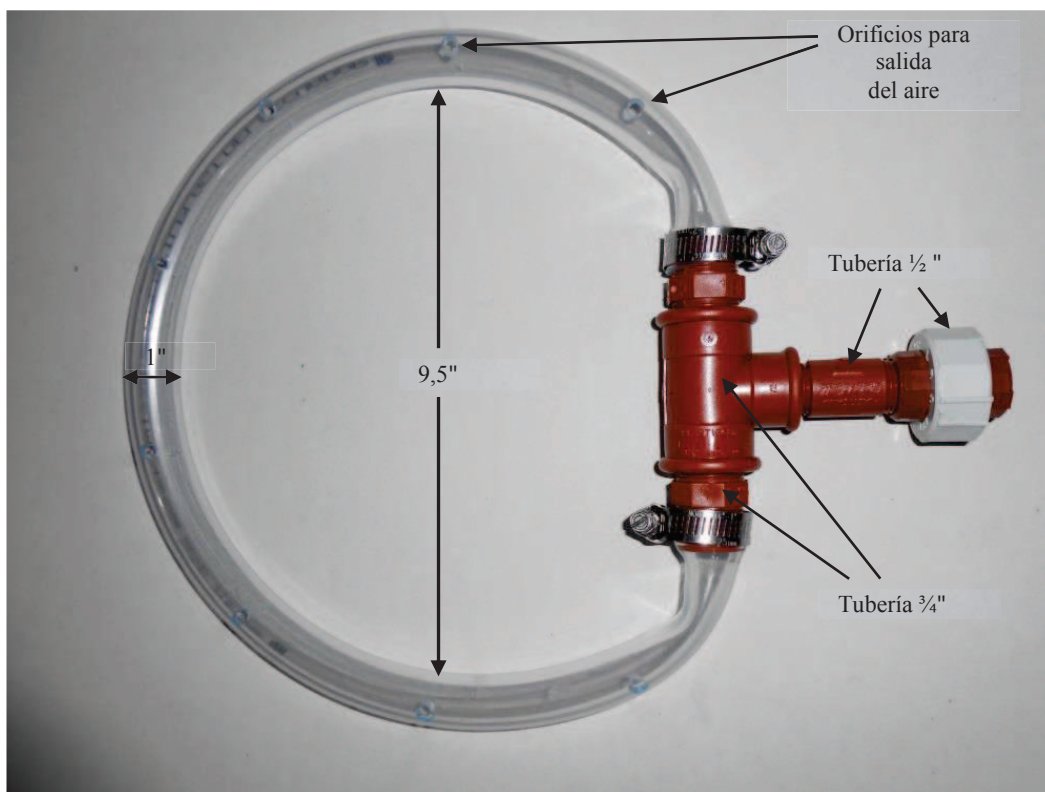


Figura 2.9. Difusor de aire elaborado para la base del tanque de oxidación

En los ensayos de oxidación de cianuro, el catalizador fue carbón activado granular microporoso obtenido de cuesco de palmiste el cual se utilizó inicialmente sin modificación y posteriormente impregnado con sales de cobre y plata.

El tamaño de partícula del carbón utilizado fue 4×8 (2,4 - 4,7 mm) y antes de ser utilizado se lavó con agua potable como se indica en la sección 2.1.1 para eliminar de manera más efectiva el material fino junto con ciertas impurezas.

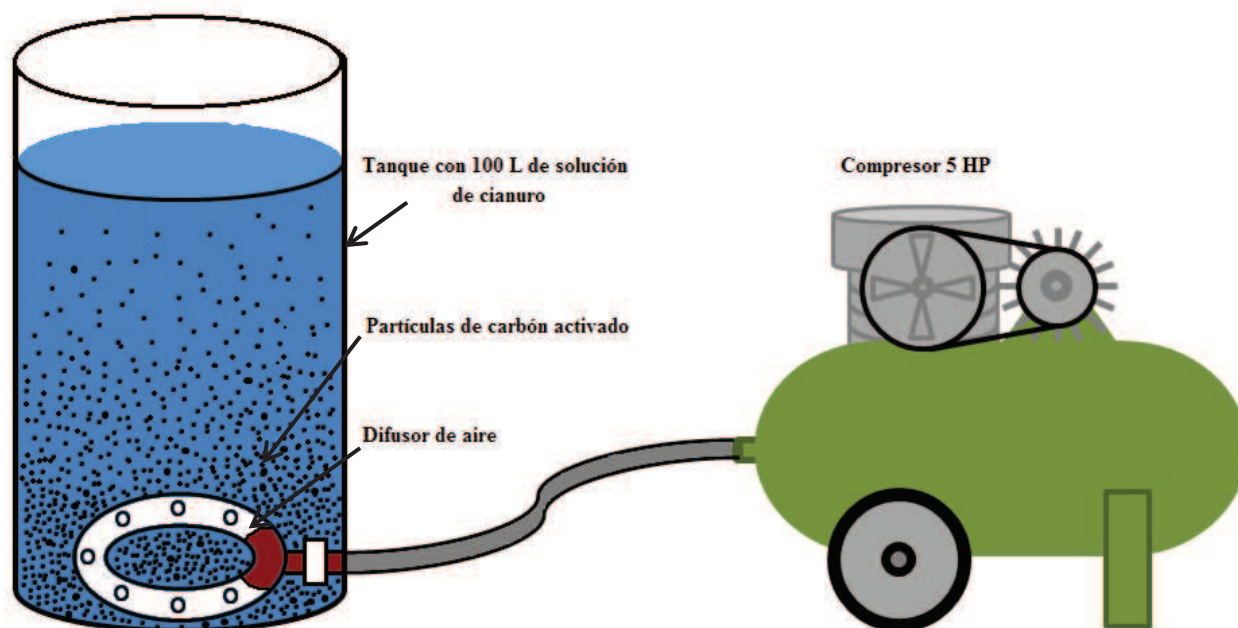


Figura 2.10. Esquema de la oxidación de cianuro con aire y carbón activado a escala de planta piloto

Para los ensayos iniciales se prepararon 100 L de solución de cianuro de sodio de 0,5 g/L de concentración, manteniendo el pH en el intervalo de 10,5 a 10,7 por adición previa de 11,5 gramos de cal al agua. La cantidad de cal a adicionar se obtuvo luego de ensayos preliminares de pH en laboratorio. Para facilitar y hacer más rápida la disolución del cianuro de sodio fue necesario moler las pastillas en que viene este reactivo. Una vez que se ha disuelto tanto el cianuro de sodio como la cal, se procede a introducir el carbón en la solución en la cantidad requerida para efectuar las pruebas de oxidación.

Se tomaron muestras de aproximadamente 30 mL de solución a cada 30 minutos para medir la concentración de cianuro libre en las mismas mediante el uso del electrodo selectivo para cianuro 9606BNWP. Las curvas de calibración para el electrodo se presentan en el Anexo II.

2.3.2 MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CIANURO LIBRE CON EL ELECTRODO SELECTIVO PARA CIANURO

Como el intervalo de concentraciones óptimo para el funcionamiento del electrodo está entre 0,05 ppm a 10 ppm, resulta necesario diluir las muestras para analizarlas. Las primeras muestras vienen con una concentración de alrededor de 230 ppm de cianuro libre y se toma una alícuota de 10 mL que se disuelve con agua potable en un matraz aforado de 250 mL para disminuir la concentración unas 25 veces y estar dentro del intervalo óptimo de concentración. En este punto es importante adicionar cierta cantidad de cal para mantener el pH cercano a 10,5 a pesar de la dilución; la cantidad a adicionar se obtiene por aproximación tomando en cuenta una serie de valores referenciales.

Una vez disuelta la muestra y comprobado el valor del pH se procede a poner entre 40 y 60 mL en un vaso de precipitación, se somete a agitación magnética y se introduce el electrodo hasta que el potenciómetro dé la lectura definitiva que se registra y se transforma a concentración mediante la ecuación de la curva de calibración. En la Figura 2.11 se resumen los pasos a seguir para medir concentración de cianuro con ayuda del electrodo selectivo.

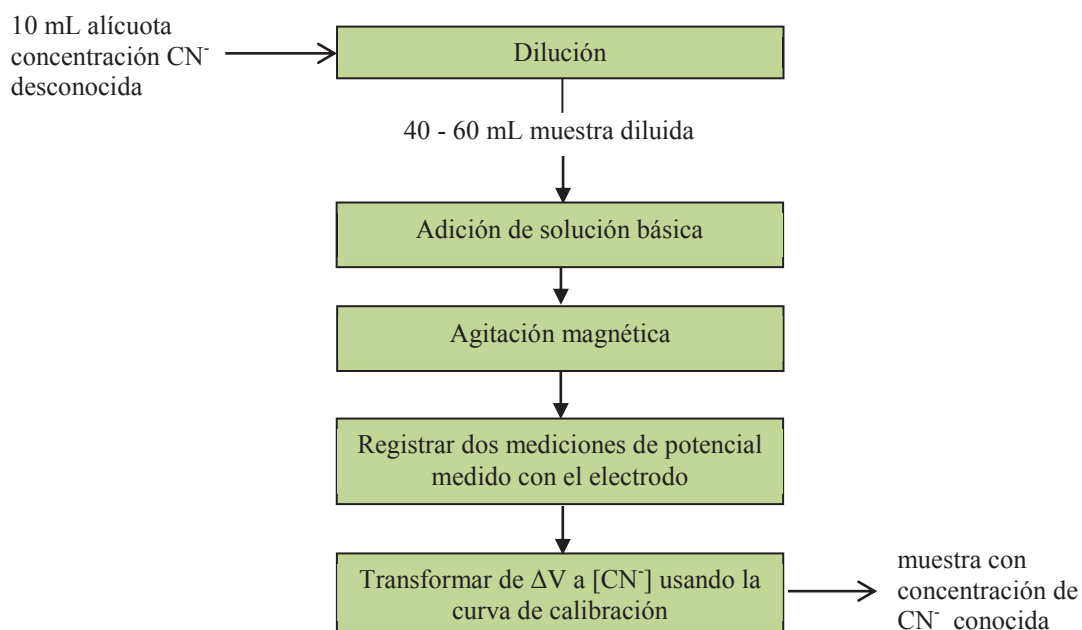


Figura 2.11. Medición de concentración de cianuro usando el electrodo selectivo

2.3.3 ENSAYOS EN LABORATORIO DE OXIDACIÓN DE CIANURO CON AIRE Y CARBÓN ACTIVADO CON COBRE ELECTRODEPOSITADO

Los ensayos para probar el funcionamiento del carbón activado con cobre electrodepositado como agente que permita la oxidación del cianuro en solución se realizaron en reactor tipo batch que consistió de un recipiente cilíndrico de 20 cm de diámetro y 40 cm de altura al cual se le acopló un sistema difusor de aire en su base el cual consistió de una piedra difusora que genera burbujas. La imagen del recipiente y el difusor se puede apreciar en la Figura 2.12. Dentro del recipiente se colocaron 1,5 L de la solución a tratar. Inicialmente se utilizaron soluciones sintéticas con un contenido de NaCN que varió entre 0,5 y 1 g/L. El valor de pH se mantuvo en 10,5.

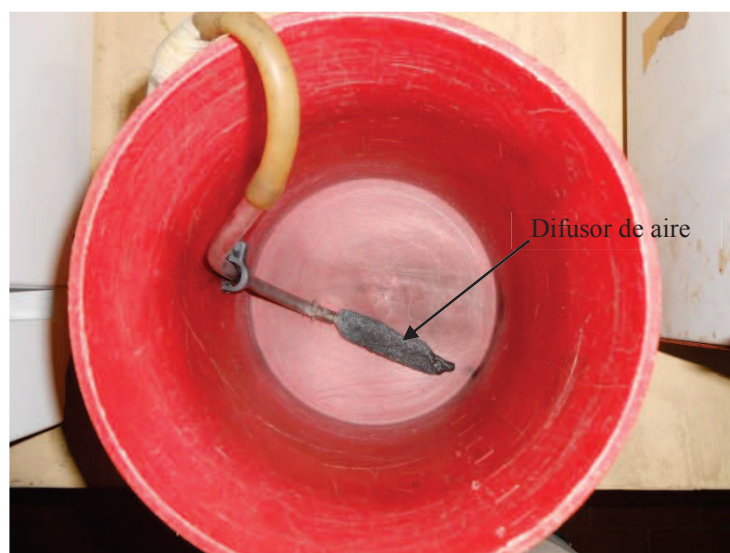


Figura 2.12. Vista del interior del recipiente usado como reactor para la oxidación de cianuro a menor escala en el laboratorio

Se añadieron 75 g de carbón activado con cobre electrodepositado que se utilizó para la oxidación del cianuro, de tal manera que la concentración de carbón fue de 50 g/L. En algunas pruebas la cantidad varió para alcanzar concentraciones de 25 y 80 g/L. También se efectuaron ensayos complementarios en los que se utilizó carbón activado virgen y carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y AgNO_3 con la finalidad de establecer una comparación entre el funcionamiento de los distintos carbones para las mismas condiciones experimentales.

En las pruebas realizadas para este propósito, la agitación se debió únicamente al burbujeo de aire que también es necesario para proveer de oxígeno a la reacción de oxidación del carbón activado. El suministro de aire fue proveniente de un compresor que se hizo operar a un flujo de 650 L/h medido con un rotámetro y controlado periódicamente.

Los ensayos tuvieron una duración de 6 horas y se tomaron muestras de la solución cada 30 minutos. Dichas muestras fueron filtradas y después tituladas con nitrato de plata (0,433 g/L) y utilizando solución de KI al 10% como indicador. El procedimiento se detalla en el Anexo III. El pH también se controló luego de la toma de cada alícuota para comprobar si se mantenía en un valor de 10,5. Cuando se detectó algún descenso se procedió a adicionar entre 1 y 3 mL de solución de NaOH al 10%. Con los datos obtenidos se elaboraron gráficos de concentración de ion cianuro en mg/L versus tiempo en minutos para cada ensayo con la finalidad de estudiar el proceso de oxidación de cianuro con carbón activado y establecer su cinética.

2.4 DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OXIDACIÓN DE CIANURO EN LOS EFLUENTES TRATADOS

En las pruebas de oxidación de cianuro con aire y aplicando los diferentes tipos de catalizadores basados en carbón activado que fueron desarrollados a lo largo del proyecto, se obtuvieron resultados que se utilizaron para conocer la influencia en la oxidación de cianuro libre que tiene este método de descontaminación y luego diseñar un proceso para eliminar el cianuro libre presente en efluentes que contengan la mencionada sustancia tóxica, antes de que sean liberados al medio ambiente y de esta forma evitar un grave impacto ambiental a la vez que permita cumplir con las regulaciones ambientales vigentes.

El proceso que se diseñó tuvo como objetivo el tratamiento de 10 m³ diarios de soluciones cianuradas provenientes de operaciones de extracción de metales

preciosos por lixiviación con cianuro y buscando poder reducir la concentración del cianuro libre en los efluentes a valores cercanos a 1 mg/L o menos de tal forma que se cumpla la normativa ambiental o se esté en buena posibilidad de hacerlo. En este punto se elaboró el balance de masa lo que permitió decidir los valores de capacidad de la planta basándose en los resultados del ensayo de oxidación en planta piloto de un efluente real de cianuración. El balance de masa también permitió determinar las cantidades de reactivos a utilizar para el funcionamiento de la planta en sus reales dimensiones, en este caso los reactivos son el carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y la cal para controlar el pH. Luego, los datos obtenidos se pusieron en un diagrama de bloques para representar al proceso.

Del diseño del proceso se pasó al de una planta para el tratamiento de efluentes cianurados. Una parte fundamental de diseño fue la elaboración del diagrama de flujo de proceso (PFD) que fue la base para estimar los equipos necesarios y la fuente de las especificaciones que sirvieron para el diseño y selección de los mismos. Además en este diagrama PFD se incluyó la guía para la interpretación de la planta con los nombres de identificación del equipo creados en forma sistemática y se presentaron los flujos máxicos de las corrientes que intervienen en el proceso.

Para complementar el diagrama PFD, fue necesario construir un diagrama de instrumentación y tuberías (PID) para indicar las especificaciones de las tuberías que son necesarias para transportar las corrientes del proceso tales como el diámetro, el material, junto con dispositivos como válvulas y bombas que permitan el transporte de las mencionadas corrientes. En este diagrama también van incluidas las temperaturas y presión en cada tubería, las mismas que no requieren control. Como la planta fue diseñada para ser operada de forma manual, no se aplican controles automáticos. Las principales variables a controlar son la concentración de cianuro libre y el pH, en menor medida está el flujo de aire de los compresores.

2.5 EVALUACIÓN DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA DISEÑADA

La evaluación económica de este proyecto de diseñar una planta de tratamiento de efluentes cianurados es un aspecto importante para conocer su viabilidad, esto les permite a los potenciales inversionistas evaluar la conveniencia de instalar una planta de tratamiento que siga los procesos descritos en este trabajo y pueda integrarse a un sistema de tratamiento de aguas de una empresa minera. Se considera la inversión inicial total necesaria para poner en marcha la planta de tratamiento de efluentes propuesta así como los costos.

La estimación de la inversión necesaria para la planta de tratamiento planteada se hizo según el método de factores el mismo que se fundamenta en la inversión de equipos y sobre ésta se aplica factores que permiten establecer costos directos e indirectos. El método a usar es de gran aplicación cuando se requiere una evaluación económica preliminar como en este caso (Peters y Timmerhaus, 1991, pp.182-184).

La inversión en equipos fue determinada una vez establecidos los requerimientos de la planta y considerando eventualidades de necesidad de algunos equipos de remplazo. Los precios de los equipos como tanques se basaron en el costo de su elaboración ya que se trata de equipos que deben ser construidos a la medida para adaptarse a la capacidad de la planta. Para el resto de equipos se aplica una estimación de su valor actual en el mercado.

A partir de la inversión en equipos se calculó la inversión fija siguiendo el método de factores para obtener costos directos e indirectos. De la inversión fija se considera el porcentaje referente a los servicios industriales y con esto se llega a obtener el capital total de inversión. La parte referente a los costos de producción divide a los costos en dos categorías; la primera referente a la materia prima y la segunda al costo de la mano de obra y de la energía. Sobre la base del consumo diario y los precios unitarios, fueron determinados los costos totales del funcionamiento de la planta.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 OXIDACIÓN DE CIANURO LIBRE PRESENTE EN SOLUCIONES SINTÉTICAS A ESCALA PILOTO

3.1.1 CARBÓN ACTIVADO EN LA OXIDACIÓN DE CIANURO EN SOLUCIONES SINTÉTICAS A ESCALA PILOTO

En esta sección se analizan los resultados obtenidos al oxidar el ion cianuro presente en soluciones sintéticas a nivel planta piloto utilizando aire y carbón activado. Inicialmente se utilizan diferentes concentraciones de carbón activado para actuar en soluciones de igual concentración de cianuro y determinar el efecto que tiene la concentración de carbón activado en la cinética de la reacción de oxidación del ion cianuro en las condiciones experimentales.

En la Figura 3.1 se presenta la comparación de la oxidación del ion cianuro en una solución de cianuro de sodio de 1,0 g/L de concentración, utilizando aire y carbón activado a dos concentraciones distintas.

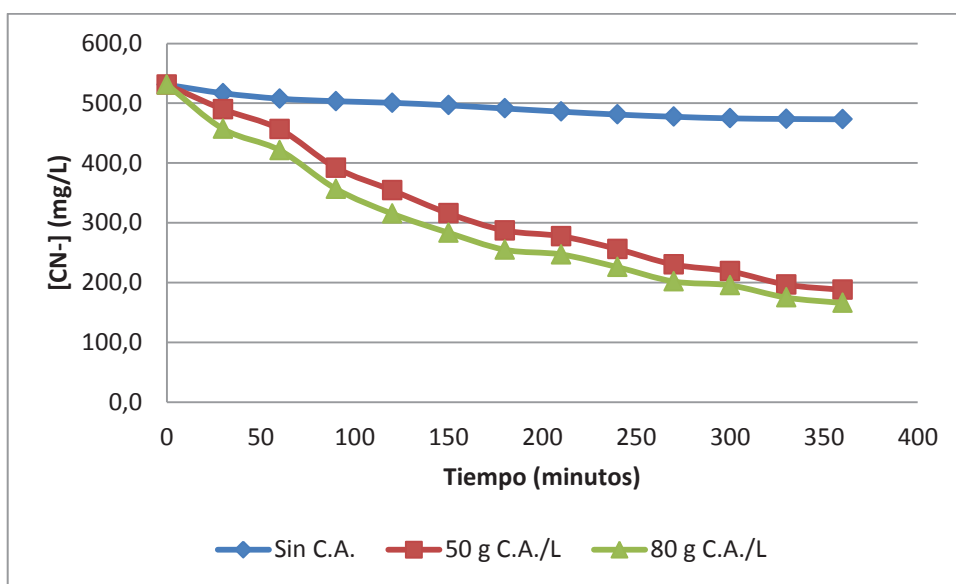


Figura 3.1. Influencia de la concentración de carbón activado en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto $[NaCN]_0=1,0$ g/L

La Figura 3.1 indica que al aumentar la concentración de carbón activado, la reacción de oxidación del ion cianuro se produce a mayor velocidad pero este aumento en la velocidad no es tan pronunciado y luego de seis horas de oxidación, se alcanza una reducción del 64,68 y 68,77% para los 50 y 80 g/L de carbón activado respectivamente. Lo que representa una definitiva mejora del proceso en comparación al uso exclusivo de aire que permitió una reducción del 10,9% de la concentración inicial de cianuro luego de las 6 horas.

Al igual que en estudios similares, se tiene que la cinética del proceso se ve favorecida por el aumento en la cantidad de carbón activado pero a esta escala no es conveniente continuar incrementando la cantidad de carbón porque esto dificultaría la agitación y el suministro de aire para el proceso.

Es importante resaltar el hecho de que la reacción de oxidación del ion cianuro bajo estas condiciones se da a mayor velocidad durante los primeros minutos de iniciado el proceso, luego de esto, la curva de disminución de la concentración de cianuro se vuelve menos pronunciada que al principio y tiende a presentar una variación cada vez más ligera.

Las mismas pruebas fueron realizadas con una concentración inicial de cianuro de 0,5 g/L de NaCN y utilizando iguales concentraciones de carbón que en las pruebas anteriores y los resultados se pueden apreciar en la Figura 3.2. Las concentraciones de carbón correspondientes a 50 y 80 g/L se seleccionaron porque se trata de concentraciones que permitieron tener presente en la solución una cantidad considerable de carbón activado disponible al igual que una apropiada agitación de la solución durante la oxidación y trabajar de forma adecuada sin que el carbón ocupe demasiado espacio en el tanque, además de que como se vio en la Figura 3.1, el aumento de concentración de carbón no se traduce en un incremento considerable en la velocidad a la que se oxida el cianuro bajo estas condiciones.

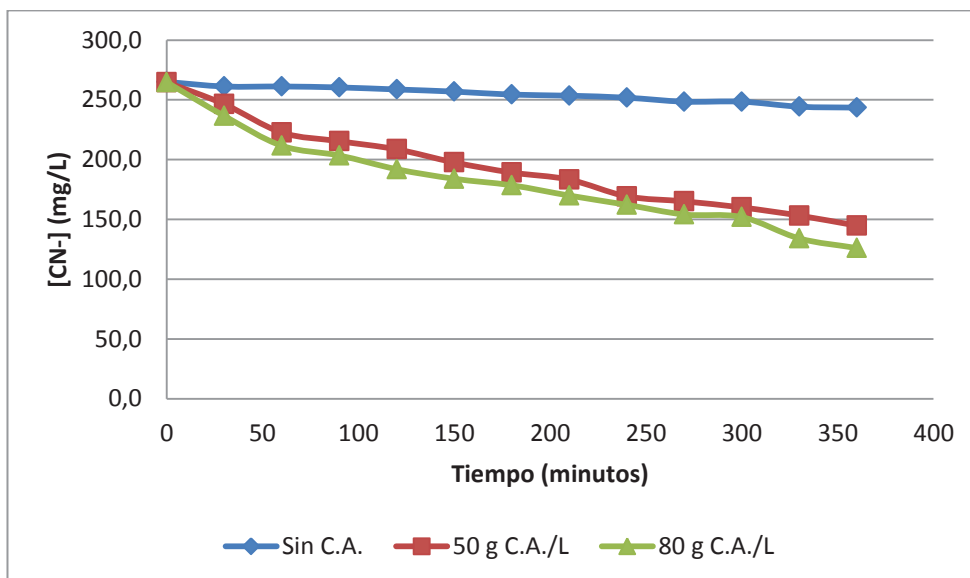


Figura 3.2. Influencia de la concentración de carbón activado en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto $[\text{NaCN}]_0=0,5 \text{ g/L}$

Tal como en la prueba anterior, la presencia de una mayor cantidad de carbón activado permite mejorar el porcentaje de cianuro eliminado; para los 50 g/L se alcanza 45,30% y para los 80 g/L se llega a eliminar el 52,38%. Este aumento es un efecto útil pero no es tan importante como para considerar un mayor incremento en la concentración de carbón dadas las dificultades técnicas que esto presenta.

En cuanto al efecto que tiene la concentración inicial de cianuro de la solución sobre la velocidad de oxidación, los resultados demuestran que al disminuir dicha concentración de 1,0 a 0,5 g/L, las curvas se mantienen similares como se puede ver al comparar las figuras 3.1 y 3.2. Esto indica que la constante de velocidad debe ser similar para ambos casos. Las curvas se van haciendo menos pronunciadas con el tiempo lo que es coherente con una cinética de primer orden como fue demostrado en estudios realizados por Adams, 1990, quien dedujo una cinética de primer orden para esta oxidación. Este es un factor importante a considerar a medida que la concentración de cianuro en la solución va disminuyendo porque dificulta la oxidación del cianuro en las soluciones menos concentradas cuando se sigue este procedimiento de oxidación.

Como ya lo indicó Pilco, 2008, existe un cierto valor de concentración de carbón con el que se puede obtener el máximo porcentaje de reducción de la concentración de cianuro y seguir incrementando la concentración de carbón ya no produce un efecto significativo. Permitir un aumento exagerado del porcentaje de sólidos en la solución no es algo que beneficie al diseño del proceso a nivel planta piloto y el porcentaje de reducción de la concentración de cianuro que se alcanza de esta manera no justifica tal aumento.

Además de este efecto de disminución en la efectividad del carbón activado como catalizador de la reacción que ocurre cuando la concentración aumenta a partir del porcentaje máximo de reducción que resulta práctico de alcanzar. Se debe considerar que existe cierta cantidad de cianuro que es adsorbido por el carbón al igual que también se adsorbe cal y esto altera las propiedades del carbón activado como catalizador. Según Marsden y House, 2006, un gramo de carbón activado puede adsorber 5 mg de cianuro. Si bien la adsorción colabora con la disminución de la concentración de cianuro en la solución, su efecto no es el más importante ya que según Pilco, 2008, en las pruebas de oxidación de cianuro con carbón activado y aire, el porcentaje de cianuro que se pierde por adsorción en el carbón activado no llega al 5%.

Cabe indicar que el pH no requirió mayor control a lo largo del tiempo que duró el proceso de oxidación de las soluciones cianuradas a nivel de planta piloto. La disminución de pH fue mínima y solamente en algunas pruebas fue necesario añadir unos pocos gramos de cal para mantener el pH en un valor de 10,5; que es un factor crucial para que el proceso de oxidación resulte lo más eficiente posible y que se tenga una mínima pérdida de cianuro por liberación de gas cianhídrico. Que el pH se haya mantenido en valores alrededor de 10,5 resulta muy útil con proyección a aplicar el proceso a efluentes cianurados reales como los que produce la industria minera cuyo pH se encuentra en ese valor o cercano.

Los resultados de las pruebas sin catalizador y con carbón activado sin modificar se resumen en la Tabla 3.1 y se detallan en las Fichas Técnicas 1 a 6 en la sección de Anexos VI.

Tabla 3.1. Resultados de los tratamientos oxidación de cianuro con carbón activado en soluciones sintéticas de NaCN. Condiciones: $[\text{NaCN}]_0 = 0,5 \text{ g/L}$ y $1,0 \text{ g/L}$; $\text{pH} = 10,5$; Aire 9500 L/h

Parámetros	$[\text{CN}]_0$ (mg/L)	$[\text{CN}]_f$ (mg/L)	Porcentaje de oxidación de CN^-
Sin catalizador	265,0	243,5	8,11
	531,0	473,1	10,90
50 g/L C.A.	264,7	144,8	45,30
	531,7	187,8	64,68
80 g/L C.A.	264,7	126,1	52,38
	531,0	165,8	68,77

3.1.2 CARBÓN ACTIVADO IMPREGNADO CON NITRATO CÚPRICO EN LA OXIDACIÓN DE CIANURO EN SOLUCIONES SINTÉTICAS A ESCALA PILOTO

El carbón activado modificado por impregnación se utilizó para la pruebas de oxidación de cianuro siguiendo la metodología detallada en la sección 2.2. En la Figura 3.3 se presenta una imagen de este carbón activado impregnado con nitrato de cobre cuyos resultados como catalizador se presentan en esta sección.



Figura 3.3. Carbón activado impregnado con nitrato cúprico (2,4 – 4,7 mm)

3.1.2.1 Efecto de la concentración de carbón activado impregnado con nitrato cúprico

Para las siguientes pruebas se utilizó carbón modificado por impregnación con nitrato cúprico, ya que esta sal produjo los mejores resultados como catalizador de la oxidación del ion cianuro en el trabajo de Pesántez, 2010. La impregnación siguió el proceso que se describe en la sección 2.1, el mismo que permitió obtener las cantidades de carbón impregnado que estas pruebas requirieron. En general, el carbón utilizado tuvo una concentración inicial de cobre del 0,45% en peso, determinado por disgregación ácida y absorción atómica, siguiendo los cálculos presentados en el Anexo IV. Distintas concentraciones de carbón activado impregnado fueron probadas, inicialmente en soluciones sintéticas de 1,0 g/L de NaCN como se muestra en la Figura 3.4.

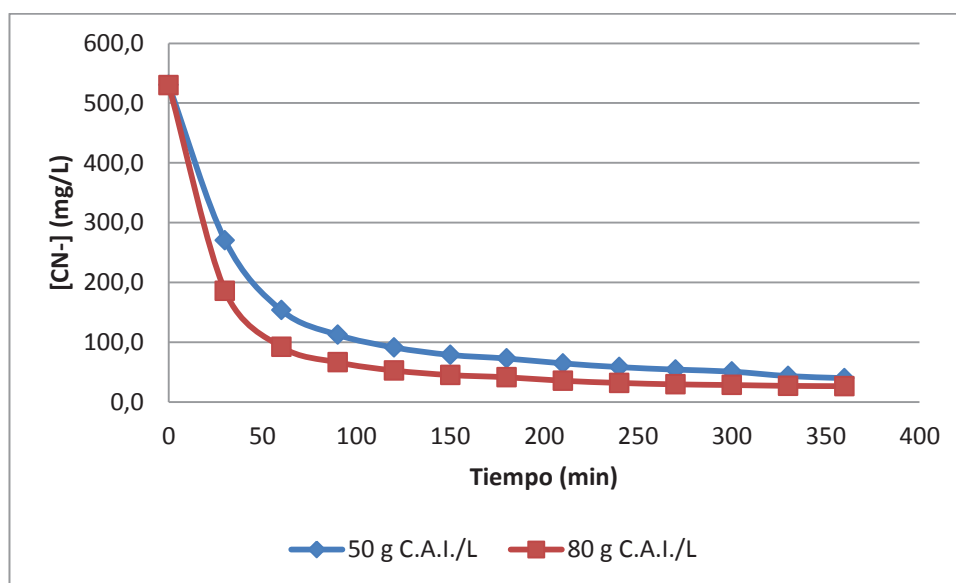


Figura 3.4. Influencia de la concentración de carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto $[\text{NaCN}]_0=1,0$ g/L

El uso de carbón activado impregnado con nitrato cúprico como catalizador para la oxidación del cianuro, produjo una considerable mejora en comparación del uso de carbón activado sin modificar. Esto puede apreciarse al comparar las figuras de esta sección 3.1.1 con las de la 3.1.2.

El porcentaje de eliminación de cianuro llega al 92,5% para los 50 g/L y al 95% para los 80 g/L en 6 horas. En lo que respecta a las concentraciones finales son de 40,0 y 26,6 mg CN⁻/L lo que sugiere la necesidad de un nuevo proceso para reducir la concentración a los niveles reglamentados por la legislación ambiental.

Al utilizar una concentración inicial de cianuro de sodio de 0,5 g/L, la eliminación de cianuro se dio de acuerdo a lo que se presenta en la Figura 3.5. Como se puede apreciar, ambas curvas se suavizan al respecto de cuando se comenzó a partir de la concentración de 1,0 g/L, esto sucede nuevamente por la participación fundamental que tiene la presencia de los iones cúpricos en la cinética de oxidación del cianuro.

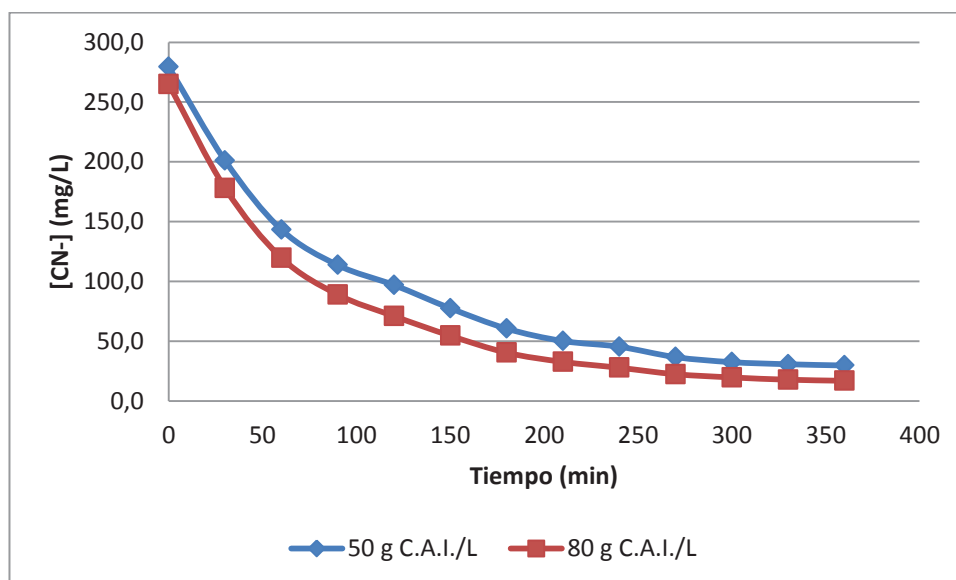


Figura 3.5. Influencia de la concentración de carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto $[\text{NaCN}]_0=0,5 \text{ g/L}$

A pesar de tener una eliminación de cianuro más lenta, fue posible obtener un porcentajes de eliminación de 89,4% empleando 50 g/L de carbón impregnado y de 93,6% con 80 g/L. Si bien se trata de porcentajes de eliminación muy útiles, las concentraciones finales de 29,7 y 17,0 mg CN⁻/L respectivamente, van a requerir ser reducidas para cumplir con la normativa ambiental.

Además se debe considerar la tendencia que lleva la curva entre las 5 y 6 horas de proceso, que con una reducción de concentración tan baja indica que aumentar el tiempo no necesariamente va a permitir conseguir una concentración de cianuro más cercana a cero.

El efecto de la presencia del nitrato cúprico en la superficie del carbón activado fue de incrementar su capacidad catalítica alcanzándose mayores velocidades de oxidación del ion cianuro presente en las soluciones sintéticas. Es de esta manera que se consiguió llegar a concentraciones más bajas de cianuro en menor tiempo que si se utilizaría el carbón activado sin modificar. Adicionalmente, el funcionamiento general del proceso de oxidación a esta escala y bajo estas condiciones, se afectó en el sentido de que se dificulta alcanzar concentraciones más bajas en comparación a trabajos similares a menor escala. En la Tabla 3.2 se resumen los resultados de las pruebas de oxidación de cianuro con carbón activado impregnado con nitrato cúprico.

Tabla 3.2. Resultados de los tratamientos oxidación de cianuro con carbón activado impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en soluciones sintéticas de NaCN. Condiciones: $[\text{NaCN}]_0 = 0,5 \text{ g/L}$ y $1,0 \text{ g/L}$; $\text{pH} = 10,5$; Aire 9500 L/h

Parámetros	$[\text{CN}]_0$ (mg/L)	$[\text{CN}]_f$ (mg/L)	Porcentaje de oxidación de CN^-
50 g/L C.A.I.	279,5	29,7	89,4
	530,3	40,0	92,5
80 g/L C.A.I.	265,1	17,0	93,6
	531,0	26,6	95,0

3.1.2.2 Reutilización de carbón activado impregnado con nitrato cúprico

Al trabajar a una escala de planta piloto, la reutilización del carbón impregnado tendrá trascendental influencia en la economía del proceso con miras a aplicarlo en una planta de tratamiento de efluentes cianurados que requerirá la participación de cantidades de este material en el orden de los kilogramos y por lo tanto la posibilidad de reutilizar el material haría más factible el proceso.

Los ciclos de reutilización del carbón se consideraron mientras el desempeño del carbón reciclado no reduzca la eficiencia del proceso de manera importante. También se busca establecer una comparación entre el funcionamiento de carbón impregnado reciclado y el carbón activado sin modificar. En la Figura 3.6 se tiene el comportamiento de la eliminación del cianuro en cada reciclo del carbón impregnado.

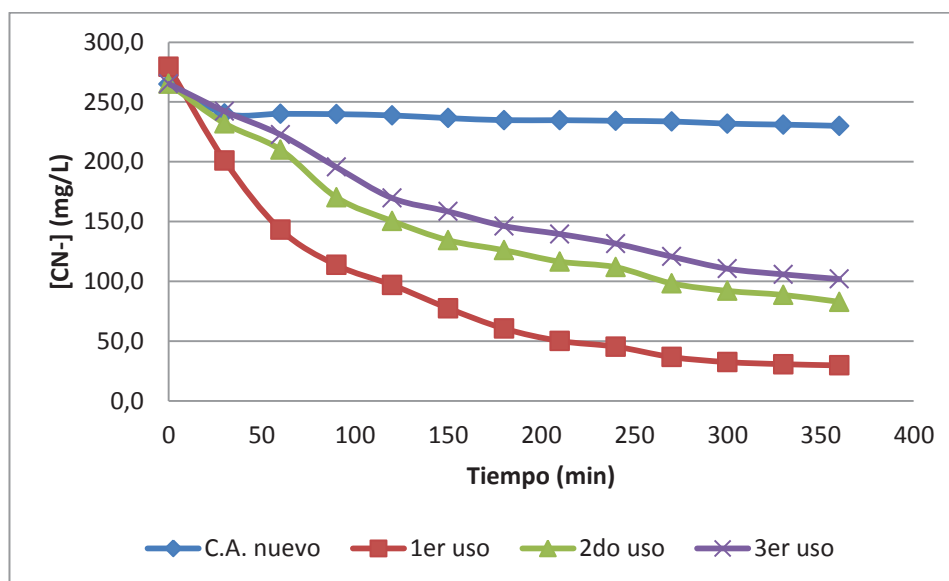


Figura 3.6. Efecto de la reutilización de carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto

Estos ensayos de reutilización del carbón se hicieron con el propósito de conocer cual era el efecto que tenía el sucesivo uso del carbón impregnado con nitrato cúprico en nuevos procesos de oxidación de cianuro sin haberlo sometido a ninguna clase de proceso de elución de las sustancias adsorbidas fuera de un rápido lavado con agua potable y posterior secado en estufa. Tampoco se sometió al carbón impregnado usado a un nuevo proceso de impregnación. Los resultados finales de los ensayos de reutilización del carbón impregnado con nitrato cúprico están presentados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados de los tratamientos de reutilización de carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en soluciones sintéticas de NaCN . Condiciones: $[\text{NaCN}]_0 = 0,5 \text{ g/L}$; $\text{pH} = 10,5$; Aire 9500 L/h ; Tiempo: 6 horas

Parámetros	$[\text{CN}]_0$ (mg/L)	$[\text{CN}]_f$ (mg/L)	Porcentaje de oxidación de CN^-
50 g/L C.A. nuevo	264,7	144,8	45,3
50 g/L C.A.I. $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 1er uso	279,5	29,7	89,4
50 g/L C.A.I. $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 2do uso	265,1	82,9	68,8
50 g/L C.A.I. $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 3er uso	265,1	101,9	61,6

Como se puede observar en la Tabla 3.3, en cada reutilización del carbón, se alcanza una mayor concentración final a las 6 horas de comenzado el proceso y por tanto, un porcentaje de oxidación de cianuro menor. Lo que se explica por una variación en la cinética del proceso de oxidación catalizada por el carbón impregnado que también es apreciable en la Figura 3.6. Esto ocurre por el cambio que tiene lugar en la superficie del carbón activado que va perdiendo parte de su contenido original del $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en cada nuevo uso.

Durante las 6 horas que duró el proceso de eliminación de cianuro en estos ensayos, se produjo la pérdida de entre 0,1 y 0,3% del material que se debe casi en su totalidad al nitrato cúprico que pasó a la solución tratada ya que por el sistema de agitación seleccionado, las pérdidas de peso por atrición del carbón se vuelven despreciables y se pueden seguir en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Porcentaje de cobre en la superficie del carbón impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ después de cada ensayo de reutilización.

Número de uso	mg Cu/g C.A.	% Peso
1ero	340	0,34
2do	270	0,27
3ero	220	0,22

Además, la variación en la cinética de la reacción de oxidación del cianuro con carbón activado impregnado y reutilizado se debe a que los sitios activos del carbón se cargan de complejos cianurados tanto de cobre como de plata, según el caso, dichos complejos se forman necesariamente durante el proceso en este tipo de ensayos con soluciones sintéticas. Por otro lado, este efecto se hace más fuerte cuando se tratan efluentes reales que por contener iones metálicos, producen una mayor concentración de compuestos cianurados que se quedan ocupando los sitios activos del carbón.

3.1.3 CARBÓN ACTIVADO IMPREGNADO CON NITRATO DE PLATA EN LA OXIDACIÓN DE CIANURO EN SOLUCIONES SINTÉTICAS A ESCALA PILOTO

De igual manera a como se utilizó el carbón activado impregnado con nitrato cúprico, se efectuó la oxidación de soluciones sintéticas de cianuro de sodio empleando carbón activado impregnado con nitrato de plata como catalizador. El aspecto de este nuevo tipo de carbón activado impregnado se presenta en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Carbón activado impregnado con nitrato de plata (2,4 – 4,7 mm)

3.1.3.1 Comparación del uso de carbón activado impregnado con nitrato cúprico y carbón activado impregnado con nitrato de plata

El uso de carbón impregnado con diversos metales ha producido mejora en la capacidad el carbón para catalizar la oxidación del cianuro. En estos ensayos se analiza el efecto del uso de plata en forma de nitrato como agente impregnante del carbón activado. La plata tiene el antecedente de servir para la oxidación del cianuro de forma eficiente. Es por esto que su uso ofrece una alternativa al nitrato cúprico que ya presentó resultados favorables en los ensayos anteriores que se efectuaron a nivel de laboratorio. En el caso del carbón impregnado con nitrato de plata se realizaron únicamente pruebas a escala piloto a la concentración de 0,5 g/L de cianuro de sodio para soluciones sintéticas pero se hizo énfasis en su reutilización por tres ciclos. El contenido inicial de plata en el carbón activado fue de 0,27% en promedio, medido y calculado como se indica en el Anexo IV.

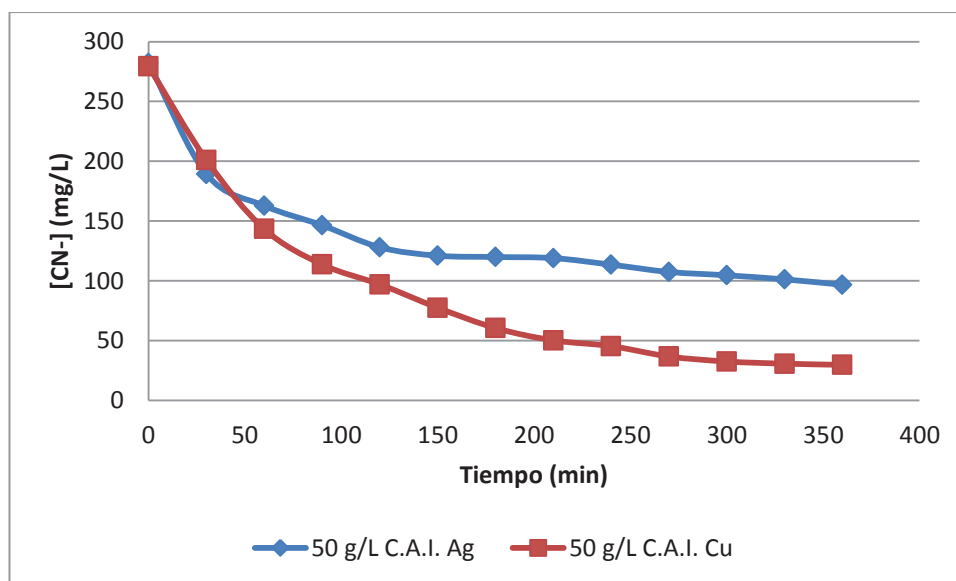


Figura 3.8. Diagrama comparativo del uso de C.A. impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y C.A. impregnado con AgNO_3

En la Figura 3.8 se puede evidenciar que el carbón activado impregnado con nitrato de plata no logró superar al impregnado con nitrato cúprico en términos de eliminación de cianuro lo cual no es favorable desde un punto de vista económico al considerar el costo de la sal de cobre y la sal de plata que es más costosa.

Además el porcentaje logrado de cobre en el carbón activado fue mayor al de plata lo que tiene su incidencia en la cinética de la reacción catalizada por los mencionados metales. El nitrato de plata es una sal que requiere un manejo más delicado porque al recibir luz se descompone produciendo plata metálica que se escapa de la solución y también del carbón activado impregnado.

3.1.3.2 Reutilización de carbón activado impregnado con nitrato de plata

Los ensayos de reutilización del carbón activado con nitrato de plata en la oxidación del cianuro demostraron que hay un marcado efecto que reduce la acción catalítica de este tipo de carbón modificado al volverlo a utilizar. Esto se aprecia de mejor manera mediante la Figura 3.9.

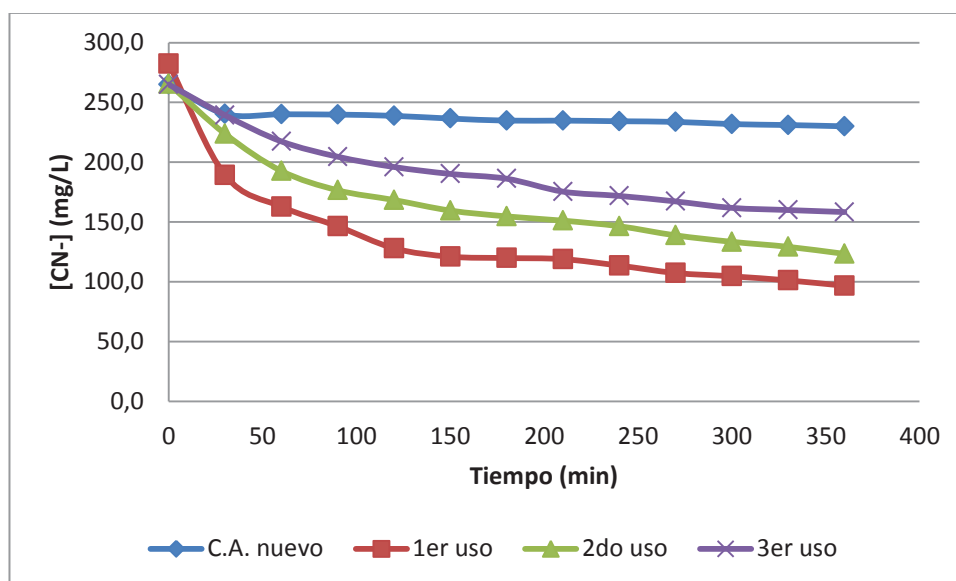


Figura 3.9. Efecto de la reutilización de carbón activado impregnado con AgNO_3 en la oxidación de cianuro libre a escala planta piloto

En la Tabla 3.5 se presentan los resultados de los ensayos de reutilización del carbón activado impregnado con nitrato de plata, lo que permite un mejor seguimiento de como el proceso se ve influenciado por la reutilización de este carbón activado modificado, considerando los datos más significativos de cada ensayo como son las concentraciones finales y el porcentaje de eliminación.

Como se puede evidenciar en la Tabla 3.5, la capacidad de remoción de cianuro por parte del carbón activado impregnado con nitrato de plata se va reduciendo en cada nuevo uso que se le da. Esta reducción sigue siendo significativa al pasar del segundo uso al tercero.

Tabla 3.5. Resultados de los tratamientos de reutilización de carbón activado impregnado con AgNO_3 en soluciones sintéticas de NaCN

Condiciones: $[\text{NaCN}]_0 = 0,5 \text{ g/L}$; $\text{pH} = 10,5$; Aire 170 L/h ; Tiempo: 6 horas

Parámetros	Tiempo (min)	$[\text{CN}]_f$ (mg/L)	Porcentaje de oxidación de CN^-
50 g/L C.A. nuevo	264,7	144,8	45,3
50 g/L C.A.I. AgNO_3 1er uso	282,2	96,7	65,7
50 g/L C.A.I. AgNO_3 2do uso	265,6	123,4	53,6
50 g/L C.A.I. AgNO_3 3er uso	265,2	158,3	40,3

En comparación con el carbón activado impregnado con nitrato cúprico que fue utilizado en los ensayos de la sección anterior se puede decir que en cada nuevo uso, el comportamiento del carbón impregnado con nitrato cúprico fue más favorable al proceso de oxidación de cianuro, dados los porcentajes de oxidación alcanzados y concentraciones finales. Para conocer como resultó afectada la cantidad de plata en el carbón activado impregnado luego de cada reutilización se realizó un análisis por absorción atómica de la solución de disgregación ácida del carbón impregnado y sus resultados se detallan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Porcentaje de plata en la superficie del carbón impregnado con AgNO_3 después de cada ensayo de reutilización

Número de uso	mg Ag/g C.A.	% Peso
1ero	60	0,06
2do	20	0,02
3ero	10	0,01

3.2 OXIDACIÓN DE CIANURO LIBRE EN EFLUENTES DE CIANURACIÓN A ESCALA PILOTO

Para finalizar la sección de pruebas en planta piloto se realizó el proceso de eliminación del cianuro libre utilizando soluciones reales tomadas de un proceso de cianuración hecho en el laboratorio y que produjo una cantidad adecuada de efluente para ser sometido a oxidación del cianuro libre según el procedimiento indicado en la sección 2.2. Antes de tomar el efluente se lo dejó decantar para poder trabajar únicamente con la solución y las características de la misma están descritas en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Concentraciones de cianuro libre y metales en el efluente, al inicio y al final del tratamiento

	Cianuro libre (mg/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	Cu (mg/L)
Inicio	291,5	2,08	5,40	517
Final	0,1	0,03	0,10	1,56

Al final de la sexta hora de este proceso de oxidación, se alcanzó una concentración de cianuro libre de 51,7 mg/L lo que representa un 82,3% como porcentaje de remoción de cianuro libre que es considerable tratándose de un efluente real producto de cianuración. En la Figura 3.10 se muestra como transcurrió este proceso.

Dado que durante las primeras 6 horas de oxidación de cianuro no se consiguió reducir la concentración de cianuro libre a un valor cercano al que dictamina la norma, se decidió llevar a cabo una nueva oxidación con igual tiempo de duración. Este segundo proceso condujo a una concentración menor a 1 mg/L y se ilustra con la Figura 3.11.

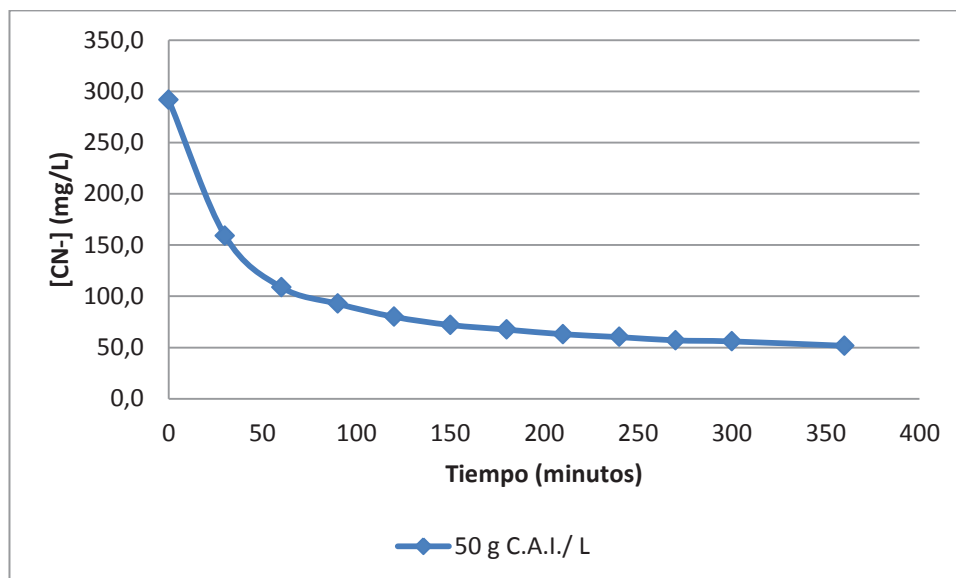


Figura 3.10. Primera oxidación de efluente real de cianuración con aire y carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ a escala planta piloto
 Condiciones: $[\text{CN}^-]_0 = 291,5 \text{ mg/L}$; $\text{pH} = 10,5$; Aire 9500 L/h

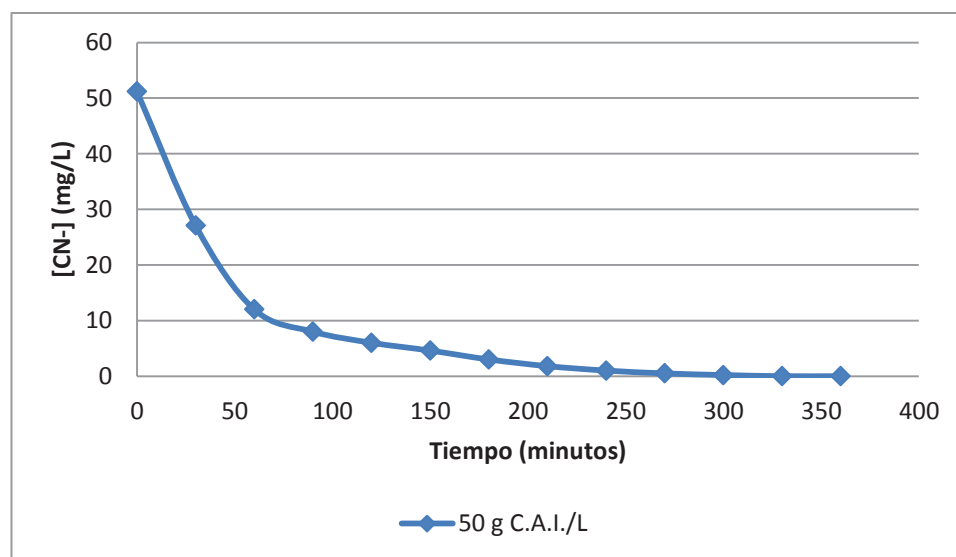


Figura 3.11. Segunda oxidación de efluente real de cianuración con aire y nuevo carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ a escala planta piloto
 Condiciones: $[\text{CN}^-]_0 = 51,2 \text{ mg/L}$; $\text{pH} = 10,5$; Aire 9500 L/h

Debido a la diferente naturaleza de la solución tratada en comparación con las soluciones sintéticas, se obtuvo una cinética distinta para la oxidación del cianuro libre presente, la misma que se caracterizó por ser más lenta en la primera parte del proceso de oxidación.

Este efecto se debió en gran medida a la adsorción de los complejos cianuro metálicos presentes en el efluente. En estos ensayos, el control del pH tuvo que hacerse de manera más seguida que en los ensayos anteriores debido a una mayor tendencia a bajar que mostró el pH del efluente.

Al término de estos ensayos se logró eliminar prácticamente la totalidad del cianuro libre presente. Las últimas concentraciones fueron indetectables con el método de medir la concentración que fue utilizado. Se puede afirmar que la concentración inicial de otros metales, se puede apreciar que el uso de carbón activado impregnado con nitrato cúprico puede presentar resultados favorables aún en presencia de otros iones en la solución tratada.

Con los resultados de estas pruebas se demuestra el gran potencial que tiene el carbón activado impregnado con nitrato cúprico para formar parte del tratamiento de efluentes en una planta piloto lo que ya está cercano a su aplicación a nivel industrial. Es por esto que en una sección posterior se planteará el diseño de una planta de tratamiento de efluentes mineros con cianuro basada en el proceso principal de oxidación de cianuro libre que se sigue en este estudio.

La planta será experimental y contemplará la posibilidad de procesos adicionales para reducir la concentración de cianuro libre hasta los valores que permite la normativa ambiental. Esta capacidad del procedimiento de oxidación de cianuro de ser aplicado a nivel industrial se debe a que los efluentes mineros de explotación de oro comparten ciertas características en común que son más similares cuando las minas de donde provienen se encuentran en una misma zona geográfica; sin embargo siempre será necesario realizar pruebas preliminares en el laboratorio o en planta piloto como se las plantea en este trabajo con la finalidad de conocer los resultados a esperarse y así diseñar de mejor manera el procedimiento a seguir para el tratamiento de efluentes. El diseño de la planta se explica y detalla en la sección 3.6.

3.3 ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE EN CARBÓN ACTIVADO

Las pérdidas por solubilidad de las sales impregnadas en el carbón activado que ocurren cuando éste se pone en contacto con las soluciones a tratar fue un problema evidenciado en secciones anteriores. Por esta razón se buscó tener una mejor permanencia del cobre en el carbón de manera que el efecto de las pérdidas de cobre sea menos marcado en la cinética de oxidación del cianuro. En el trabajo de Pesántez, 2010, se estudió la modificación del carbón impregnado mediante la reducción de la sal de cobre en atmósfera reductora lo cual produjo la formación de cobre metálico y de cuprita en la superficie del carbón que luego al ser utilizado en la oxidación de cianuro, presentó una definitiva mejora en comparación a la capacidad del carbón impregnado con nitrato cúprico como catalizador, llegando a oxidar más del 99% del cianuro inicial y con baja pérdida de cobre en ensayos de reutilización.

En el presente estudio se trabajó con una nueva forma de obtener cobre metálico en la superficie del carbón activado mediante la formación de una fina capa de cobre sobre la superficie del carbón obtenida por electrodeposición. La potencial ventaja de esta forma de depositar cobre metálico sobre el carbón activado consistió en conseguir un mayor contenido de cobre metálico presente en el carbón y en un tiempo menor que por el método de reducción, además de que se evitó el gasto de combustible y que el baño electrolítico donde se produjo el carbón con cobre electrodepositado pudo ser reutilizado varias veces sin una significativa disminución en la eficiencia de la electrodeposición.

En los primeros ensayos de esta sección se estudió el efecto de algunas variables en la electrodeposición de cobre sobre carbón activado. Estas variables fueron la intensidad de la corriente, la distancia entre las placas y la cantidad de carbón activado que se sometió al proceso.

Al tratarse de una nueva técnica para depositar cobre metálico sobre la superficie de carbón activado, se comenzó por probar dos diseños para el cátodo que es el electrodo donde se colocó el carbón activado. El primer diseño utilizado fue el de

tipo escoba que se describe en la sección 2.3.1 y el otro fue el de placa de acero inoxidable. Además en estos ensayos considerados preliminares se buscó la diferencia de potencial adecuada para ser aplicada a la celda electrolítica y que efectivamente se produzca una electrodeposición de cobre sobre el carbón.

3.3.1 ELECTRODEPOSICIÓN CON ELECTRODO TIPO ESCOBA

3.3.1.1 Pruebas preliminares

Las pruebas preliminares con el cátodo tipo escoba fueron realizadas en dos series dependiendo de la distancia de separación entre los electrodos y con tres voltajes nominales para determinar la eficiencia del proceso de electrodeposición con cada distinto voltaje y todas tuvieron duración de una hora. La primera distancia entre electrodos considerada fue de diez centímetros y los resultados de las pruebas se presentan en la Tabla 3.8 que es un resumen de los resultados completos de las pruebas que se encuentran en la sección de Anexos VI.

Tabla 3.8. Resumen de las pruebas preliminares de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo escoba y 10 cm de distancia entre electrodos

Voltaje (V)	Intensidad (A)	Peso cobre ed. Exp. (g)	Peso cobre ed. Teor. (g)	Eficiencia (%)	Porcentaje de cobre en el carbón final (%)
0,25	0,09	0,0377	0,1067	35,34	0,28
0,50	0,19	0,0973	0,2252	43,20	0,79
1,00	0,26	0,1688	0,3082	54,77	1,22

En la Tabla 3.8 se evidencia que la eficiencia del proceso fue baja, alcanzando a superar ligeramente el 50% en la última prueba pero también es notorio el aumento en eficiencia que se produce a medida que el voltaje se incrementa. Es por esto que con una diferencia de potencial de 1,00 V se logró la mayor eficiencia en esta serie de experimentos además de una esperada mayor cantidad

de cobre electrodepositado sobre el carbón activado pero que como porcentaje es baja porque llega solamente al 1,22% en peso del carbón al final del proceso.

En la segunda serie de experimentos preliminares de electrodeposición se mantuvo los electrodos a una distancia de 5 cm entre ellos y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Resumen de las pruebas preliminares de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo escoba y 5 cm de distancia entre electrodos

Voltaje (V)	Intensidad (A)	Peso cobre ed. Exp. (g)	Peso cobre ed. Teor. (g)	Eficiencia (%)	Porcentaje de cobre en el carbón final (%)
0,25	0,22	0,1363	0,2608	52,27	1,04
0,50	0,42	0,2836	0,4979	56,96	2,22
1,00	0,94	0,7188	1,1143	64,51	5,10

Lo primero que se evidencia en esta nueva serie es un aumento de la intensidad de corriente para un mismo voltaje en comparación con la serie anterior, esto es debido a que se ha disminuido la distancia que los iones deben recorrer durante la electrodeposición de 10 a 5 cm, lo que reduce la resistencia eléctrica y favorece el aumento en la intensidad. En toda esta serie se pudo obtener eficiencias superiores al 50% y también se hizo más perceptible a simple vista la capa de cobre que se formó sobre algunos de los granos de carbón activado. El cobre electrodepositado llegó a representar el 5,10% del peso del carbón activado luego del proceso, si bien supera casi diez veces al porcentaje obtenido para el carbón impregnado con nitrato cúprico, se considera bajo por la posibilidad de seguir incrementándolo modificando las condiciones del proceso.

3.3.1.2 Pruebas definitivas

Luego de las pruebas preliminares se procedió a las pruebas definitivas con los electrodos tipo escoba formando parte del cátodo. En estas pruebas se utilizaron valores de voltaje a partir de un voltio y se mantuvo una distancia de 5 cm entre

los electrodos como referencia porque produjo mayor intensidad de corriente y por ende mayor cantidad de cobre electrodepositado. Se aplicaron cuatro valores distintos de voltaje comprendidos entre 1,0 y 2,0 V y se decidió también ir variando el tiempo de duración de la electrodeposición para ir analizando el efecto de estas variables en el producto final.

En las pruebas con voltaje superior a 1,0 V se comenzó a observar efectos de corrosión sobre el electrodo tipo escoba que hicieron que este disminuya su peso en lugar de aumentarlo por la electrodeposición de cobre. Esto impidió considerar la cantidad de cobre que pudo haber llegado a electrodepositarse sobre el electrodo para los cálculos de eficiencia del proceso. Además, luego de relativamente pocos usos, los electrodos tipo escoba quedaron completamente inservibles por acción de la corrosión intensificada por la corriente eléctrica. Los resultados de las pruebas definitivas con cátodo tipo escoba se detallan en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Resumen de las pruebas definitivas de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo escoba y 5 cm de distancia entre electrodos

Voltaje (V)	Intensidad (A)	Tiempo (min)	Peso cobre ed. Exp. (g)	Peso cobre ed. Teor. (g)	Eficiencia (%)	Porcentaje de cobre en el carbón final (%)
1,00	1,02	10	0,0903	0,2015	44,81	0,88
	0,97	30	0,3081	0,5749	53,59	3,00
	0,95	60	0,4692	1,1261	41,67	4,47
1,35	1,18	10	0,1126	0,2331	48,30	1,11
	1,26	30	0,4294	0,7468	57,50	4,08
	1,24	60	0,6815	1,4699	46,36	6,38
1,55	1,47	10	0,1561	0,2904	53,75	1,53
	1,44	30	0,5078	0,8535	59,50	4,80
	1,51	60	0,8495	1,7899	47,46	7,82
2,00	1,92	10	0,1770	0,3793	46,66	1,73
	1,90	30	0,8105	1,1261	71,97	7,48
	1,94	60	1,4605	2,2997	63,51	12,69

Cabe resaltar que la eficiencia del proceso fue muy variable en estas pruebas y como se dijo anteriormente no se pudo considerar el cobre electrodepositado en el electrodo tipo escoba para algunos de estos cálculos, es así que en general se obtuvieron eficiencias bajas con un promedio de 52,92% y que tuvieron cierto crecimiento para el mayor voltaje utilizado que fueron 2,0 V. Estas pruebas definitivas con el electrodo tipo escoba dieron paso a nuevas pruebas con otro tipo de electrodo en cuanto a su material y forma.

3.3.2 ELECTRODEPOSICIÓN CON ELECTRODO TIPO PLACA

3.3.2.1 Pruebas preliminares

El electrodo tipo escoba no presentó los resultados favorables ya que no propició la formación de una capa de cobre con cierta uniformidad sobre los granos de carbón activado y también se buscó la posibilidad de tener una mayor cantidad de cobre electrodepositado sobre el carbón activado. Adicionalmente, al estar constituido por segmentos de alambre, el electrodo tipo escoba sufrió claros efectos de corrosión por parte del baño ácido de electrodeposición y la corriente eléctrica.

Los motivos señalados anteriormente llevaron a que se decida probar el uso de un nuevo tipo de cátodo con electrodo de placa de acero para el resto de ensayos de electrodeposición profundizando en el estudio de la influencia de las variables del experimento.

En los ensayos preliminares se estudió el efecto de la intensidad de corriente en la electrodeposición. Al igual que con el electrodo tipo escoba se tuvo dos series de pruebas preliminares que consideran una diferente distancia entre el ánodo y cátodo. En ambas series se comenzó probando con valores de corriente que fueron de menor a mayor partiendo de un amperio y la duración de las pruebas fue de una hora. Los resultados de la primera serie con 10 cm de separación entre electrodos se presentan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Resumen de las pruebas preliminares de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo placa y 10 cm de distancia entre electrodos

Voltaje (V)	Intensidad (A)	Peso cobre ed. Exp. (g)	Peso cobre ed. Teor. (g)	Eficiencia (%)	Porcentaje de cobre en carbón final (%)
1,00	1,16	1,0625	1,3751	77,27	9,38
1,25	1,31	1,3173	1,5529	84,83	9,52
1,50	1,46	1,5314	1,7307	88,49	11,95
1,75	1,52	1,4395	1,8018	79,89	12,07
2,00	1,66	1,6486	1,9677	83,78	13,57
2,25	1,75	1,7285	2,0744	83,32	14,41
2,50	1,88	1,9355	2,2285	86,85	15,68
3,00	2,09	2,0261	2,4775	81,78	16,15
3,50	2,28	2,3432	2,7027	86,70	18,32
4,00	2,40	2,6090	2,8449	91,71	19,87
4,50	2,70	2,8079	3,2005	87,73	18,86

En estas pruebas preliminares se obtuvo una notoria capa de cobre formada sobre la superficie del carbón activado, la misma que se adaptó bien a la irregular forma del sustrato. Los valores de incremento de peso en el carbón por cobre electrodepositado se ven favorecidos por el aumento gradual de intensidad de corriente que se realizó en cada prueba. En cuanto al parámetro de la eficiencia del proceso, se obtuvieron valores considerados altos aunque cambiantes de una prueba a otra y con una ligera tendencia a subir con los mayores valores de intensidad de corriente.

La eficiencia promedio para esta serie de pruebas fue de 84,76%. Otro aspecto a destacar en esta serie de pruebas fue el porcentaje en peso que llegó a representar el cobre electrodepositado sobre el carbón activado que superó ampliamente al obtenido usando el electrodo tipo escoba para todos los voltajes considerados.

Luego de la primera serie de pruebas se redujo la distancia entre los electrodos de 10 a 5 cm y se utilizaron los mismos voltajes referenciales de la serie anterior.

Así el efecto a estudiar sería solamente el acercamiento de las placas. Los resultados de esta nueva serie de pruebas se detallan en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Resumen de las pruebas preliminares de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo placa y 5 cm de distancia entre electrodos

Voltaje (V)	Intensidad (A)	Peso cobre ed. Exp. (g)	Peso cobre ed. Teor. (g)	Eficiencia (%)	Porcentaje de cobre en carbón final (%)
1,00	1,24	1,1251	1,4699	76,54	9,61
1,25	1,43	1,3963	1,6951	82,37	11,67
1,50	1,69	1,7344	2,0033	86,58	14,18
1,75	2,00	2,0476	2,3708	86,37	16,37
2,00	2,20	2,0840	2,6079	79,91	16,58
2,25	2,46	2,6748	2,9161	91,73	17,84
2,50	2,70	2,9226	3,2005	91,32	22,47
3,00	3,20	3,4471	3,7932	90,87	22,84
3,50	3,71	3,7315	4,3978	84,85	24,44
4,00	4,18	4,3964	4,9549	88,73	26,55
4,50	4,67	5,0154	5,5358	90,60	32,43

En esta segunda serie de pruebas, lo primero que se evidenció fue un aumento comparativo en la intensidad de la corriente para voltajes iguales, de manera similar a lo que ocurrió con las pruebas para el electrodo tipo escoba. Consecuentemente con este aumento en la intensidad de corriente, se llega a obtener mayor cantidad de cobre electrodepositado a voltajes menores que los empleados en la serie anterior. Al respecto de la eficiencia promedio del proceso, ésta prácticamente se mantiene aunque se tiene un ligero aumento en general, llegando a un 86,35%. El cobre electrodepositado en el carbón activado llega a superar el 20% del peso total a partir de los 2,50 V en esta serie de pruebas lo que representa una mejora significativa en comparación con la serie anterior.

3.3.2.2 Pruebas definitivas

Los resultados de las pruebas con electrodo tipo placa superaron claramente a los de las pruebas con electrodo tipo escoba, es por esta razón que las pruebas definitivas para el electrodo tipo placa formando parte del cátodo se efectuaron con el propósito de producir el carbón activado con cobre electrodepositado que fue usado posteriormente como catalizador para la oxidación de cianuro. Se mantuvo una distancia entre el ánodo y cátodo de 5 cm para tener mayores valores de intensidad de corriente y se emplearon cuatro voltajes distintos desde 2,50 hasta 4,00 V que fueron seleccionados en base a las pruebas preliminares. Si bien se llegó a utilizar voltajes más altos en pruebas preliminares y con buenos resultados de electrodeposición, se decidió no superar los 4,00 V debido a que los voltajes más elevados intensificaron la disminución de masa en la placa de cobre del ánodo en relativamente pocos usos. Los resultados más importantes de estas pruebas se presentan en la Tabla 3.13 y de forma completa en el Anexo VI.

Tabla 3.13. Resumen de las pruebas definitivas de electrodeposición de cobre sobre carbón activado con cátodo tipo placa y 5 cm de distancia entre electrodos

Voltaje (V)	Intensidad (A)	Tiempo (min)	Peso cobre ed. Exp. (g)	Peso cobre ed. Teor. (g)	Eficiencia (%)	Porcentaje de cobre en carbón final (%)
2,50	2,63	10	0,4531	0,5196	87,20	3,52
	2,54	30	1,4015	1,5054	93,10	11,90
	2,70	60	2,9226	3,2005	91,32	22,47
3,00	3,18	10	0,4945	0,6283	78,70	4,22
	3,21	30	1,8405	1,9025	96,74	15,62
	3,20	60	3,4471	3,7932	90,87	22,84
3,50	3,75	10	0,6477	0,7409	87,42	5,10
	3,80	30	1,9272	2,2522	85,57	13,70
	3,73	60	4,0987	4,4215	92,70	25,27
4,00	4,10	10	0,7388	0,8100	91,21	5,82
	4,16	30	2,2970	2,4656	93,16	15,90
	4,18	60	4,4460	4,9549	89,73	26,77

Estas pruebas definitivas con electrodo tipo placa arrojaron los mejores resultados de todas las series de pruebas de electrodeposición que se realizaron alcanzándose la eficiencia promedio más alta con un valor de 89,81%, además la cantidad de cobre electrodepositado llegó a ser del 26,77% del peso del carbón, en la prueba de mayor duración y con el voltaje más alto. Luego de estas pruebas se decidieron las condiciones para la producción del carbón activado con cobre electrodepositado tomando un voltaje de 3,50 V debido a que con el voltaje de 4,00 V no hay mayor diferencia en la cantidad de cobre que se electrodeposita y de esta manera se evita el rápido desgaste de la placa de cobre del ánodo.

3.4 INFLUENCIA DEL CARBÓN ACTIVADO CON COBRE ELECTRODEPOSITADO EN LA OXIDACIÓN DE CIANURO EN SOLUCIONES SINTÉTICAS

El carbón activado con cobre electrodepositado en su superficie fue desarrollado como una alternativa al carbón activado impregnado, este nuevo tipo de carbón modificado permitió superar el contenido metálico de las otras variantes. El aspecto de este material se presenta en la Figura 3.12.



Figura 3.12. Carbón activado con cobre electrodepositado (2,4 – 4,7 mm)

3.4.1 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO CON COBRE ELECTRODEPOSITADO EN LA OXIDACIÓN DE CIANURO EN SOLUCIONES SINTÉTICAS

La electrodeposición de cobre sobre el carbón activado estudiada en la sección anterior permitió crear un nuevo catalizador para la oxidación del cianuro el cual fue utilizado en algunas pruebas para conocer los efectos de su uso. Las primeras pruebas realizadas con este nuevo tipo de carbón activado modificado fueron para determinar el efecto de la concentración de este catalizador en la oxidación del cianuro presente en soluciones sintéticas de 1,0 g/L de concentración de cianuro de sodio. Los resultados de estas pruebas que consideraron tres concentraciones distintas de catalizador se presentan en la Figura 3.13.

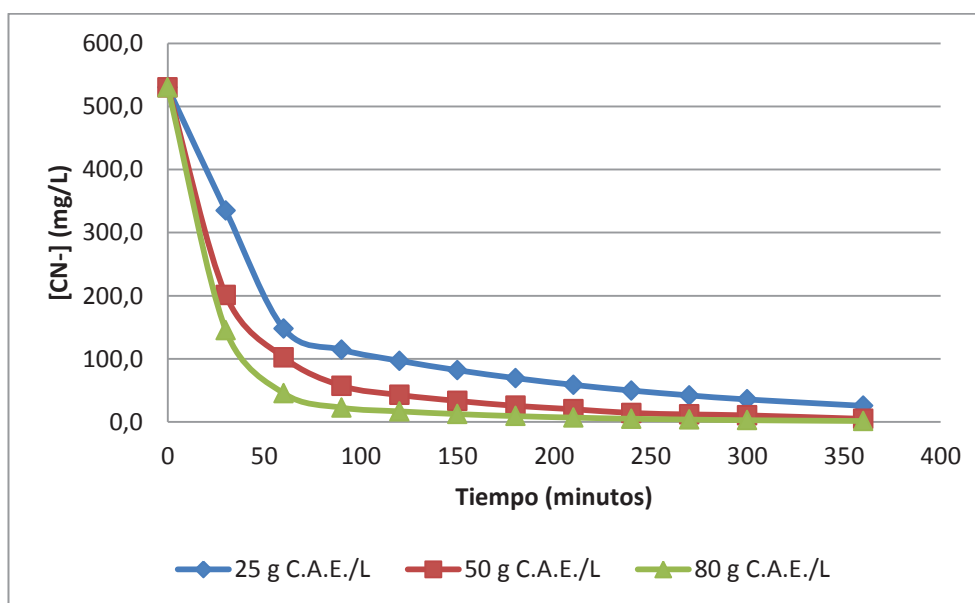


Figura 3.13. Influencia de la concentración de carbón activado con cobre electrodepositado en la oxidación de cianuro libre a escala de laboratorio
 $[\text{NaCN}]_0 = 1,0 \text{ g/L}$

En la Figura 3.13 se puede ver que la disminución de concentración de cianuro libre se ve favorecida por el aumento en la concentración del carbón activado modificado utilizado, esto ocurre de forma análoga a las pruebas de oxidación de cianuro de secciones anteriores.

También se hace evidente que la cinética de la oxidación de cianuro libre en estas condiciones se presenta de forma más rápida durante la primera hora del proceso para luego ir disminuyendo paulatinamente.

Las concentraciones de cianuro obtenidas luego de seis horas del proceso implican una disminución porcentual de la concentración de cianuro cercana a 95% para los 25 g/L de carbón activado con cobre electrodepositado y que superó el 99% tanto para 50 g/L como para 80 g/L del mismo catalizador. Es de esta forma que se comienza a demostrar la efectividad de este tipo de catalizador para el proceso.

Adicionalmente se debe indicar que los valores de concentración final de cianuro son cercanos y no superan los 5 ppm para las pruebas con 50 y 80 g/L, lo que sugiere que el uso de mayores concentraciones de catalizador tiene el efecto de acelerar la cinética de la reacción pero por la disminución de velocidad de reacción que ocurre a bajas concentraciones se llega a tener valores similares al final de las pruebas con lo que se demuestra que no resulta necesario continuar aumentando la concentración de catalizador a niveles que dificultarían una adecuada entrada de aire y agitación. Los valores exactos se presentan en la Tabla 3.14 y en las Fichas Técnicas correspondientes a estas pruebas junto con detalles adicionales en la sección de Anexos VI.

A continuación se analizan los resultados de las pruebas del proceso de oxidación de cianuro presente en soluciones sintéticas a distintas concentraciones de catalizador pero con una concentración inicial de 0,5 g/L de cianuro de sodio en la solución. En la Figura 3.14 se muestran los resultados de la pérdida de cianuro con el tiempo para los procesos efectuados.

En la Figura 3.14 se hace nuevamente evidente la forma en que la reacción de oxidación del cianuro procede de manera más rápida durante un tiempo aproximado a una hora al inicio del proceso, es por esto que en este intervalo de tiempo se produce la mayor parte de la eliminación del cianuro presente en la solución.

Luego de este tiempo, la cinética de la reacción se ve frenada y si bien continúa disminuyendo la concentración de cianuro, esto ocurre a velocidad mucho menor.

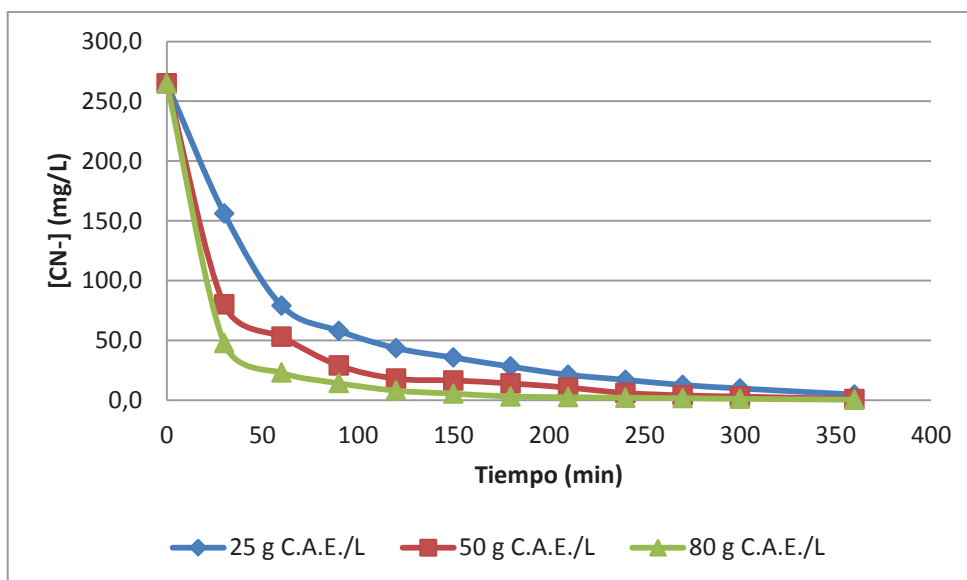


Figura 3.14. Influencia de la concentración de carbón activado con cobre electrodepositado en la oxidación de cianuro libre a escala de laboratorio $[\text{NaCN}]_0=0,5 \text{ g/L}$

En lo que respecta al efecto de la concentración del carbón activado con cobre electrodepositado, se demuestra que una mayor cantidad de catalizador presente permite lograr más baja concentración de cianuro en menor tiempo y en las tres pruebas se produjo una significativa reducción porcentual en la concentración de cianuro que estuvo por encima del 98% para todas las concentraciones luego de 6 horas de oxidación.

La concentración final para los 25 g/L de catalizador estuvo por debajo de los 5 ppm y para los 50 y 80 g/L fue menor que 1 ppm, siendo esto un efecto de la menor concentración de cianuro al comienzo de las pruebas. Los valores exactos se encuentran en la Tabla 3.14 y también en las Fichas Técnicas.

Al comparar los resultados presentados en las Figuras 3.13 y 3.14 se puede observar que en la primera hora se tiene una curva mucho más pronunciada para la concentración inicial de 1,0 g/L y que en la zona en que las curvas se van suavizando.

A partir de la primera hora, la curva correspondiente a los 1,0 g/L sigue siendo ligeramente más pronunciada que la de 0,5 g/L. Todos estos efectos responden a la influencia de la concentración en la ecuación de la cinética de la reacción de oxidación del cianuro.

Tabla 3.14. Resultados de los tratamientos de oxidación de cianuro en soluciones sintéticas a diferentes concentraciones de carbón activado con cobre electrodepositado

[CN] ₀ (mg/L)	Concentración de carbón activado con cobre e.d.	[CN] _f (mg/L)	Porcentaje de oxidación de cianuro (%)
530	25 g/L	25,2	95,25
	50 g/L	5,3	99,00
	80 g/L	1,7	99,69
265	25 g/L	4,6	98,25
	50 g/L	1,0	99,63
	80 g/L	0,3	99,88

3.4.2 COMPARACIÓN ENTRE CARBÓN ACTIVADO CON COBRE ELECTRODEPOSITADO Y OTRAS VARIANTES DE CARBÓN ACTIVADO EN LA OXIDACIÓN DE CIANURO

Se realizaron pruebas similares a las pruebas de oxidación de cianuro que se hicieron con carbón activado con cobre electrodepositado pero en estas pruebas fue utilizado carbón activado sin modificar y carbón activado impregnado con nitrato de cobre y también con nitrato de plata para estudiar la diferencia en la cinética de la oxidación de cianuro que produce el uso de cada distinto catalizador.

El carbón activado sin modificar fue la primera forma de carbón utilizada en este estudio y es la base de los catalizadores que fueron elaborados con motivo del mismo. La Figura 3.15 permite comparar el desempeño del catalizador de carbón activado con cobre electrodepositado y carbón activado virgen.

La diferencia de concentración afectó de mayor manera al funcionamiento del carbón activado virgen que al carbón activado con cobre electrodepositado, esto se evidencia por el amplio margen de diferencia entre las concentraciones a un tiempo dado.

Si bien dicha diferencia disminuye a medida que avanza el tiempo, se hace muy pequeña para el catalizador con cobre mientras que para el carbón activado virgen se mantiene notable.

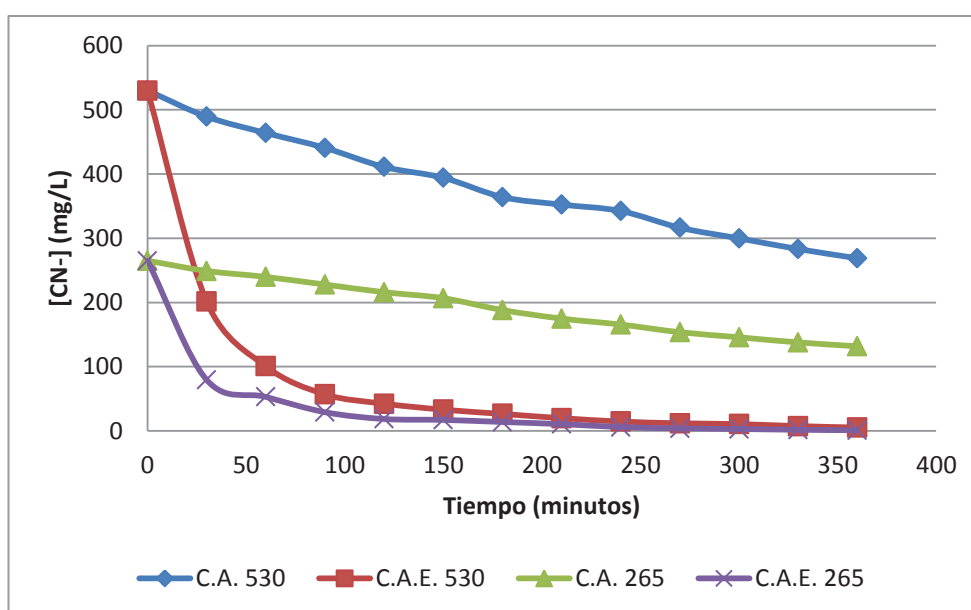


Figura 3.15. Influencia del uso de carbón activado (C.A.) y carbón activado con cobre electrodepositado (C.A.E.) en la oxidación de cianuro presente en soluciones sintéticas

Después de evidenciar la manera en que los resultados del carbón activado sin modificar fueron superados por los resultados del carbón activado con cobre electrodepositado; se realizaron pruebas comparativas con el carbón activado impregnado con nitrato cúprico para dos concentraciones iniciales de cianuro y así diferenciar los efectos de tener el cobre a manera de sales que producen iones y por otro lado el cobre en forma metálica. Las curvas para comparación se presentan en la Figura 3.16 y se describen a continuación.

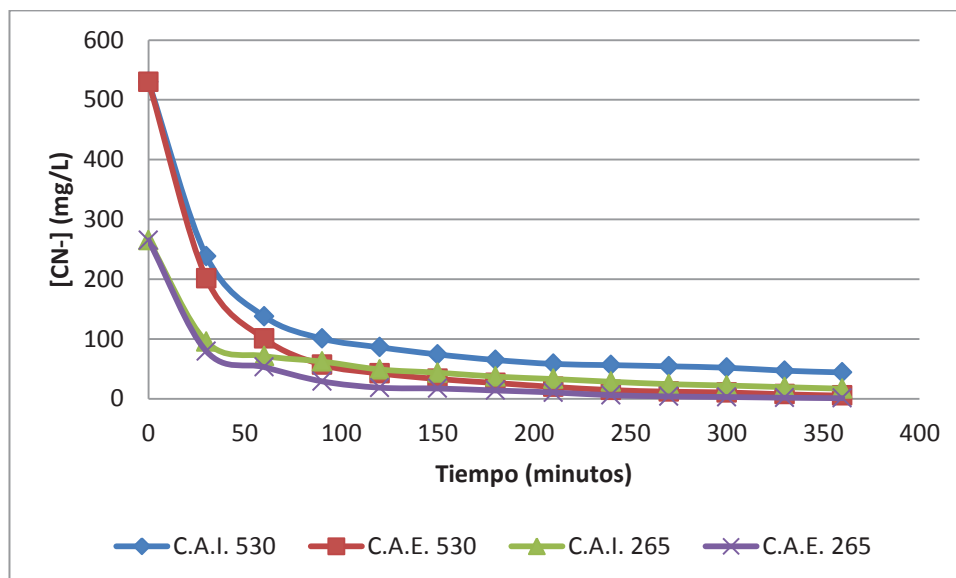


Figura 3.16. Influencia del uso de carbón activado impregnado (C.A.I.) con nitrato cúprico y carbón activado con cobre electrodepositado (C.A.E.) en la oxidación de cianuro presente en soluciones sintéticas

En la Figura 3.16 se evidencia que el uso de carbón activado con cobre electrodepositado permite alcanzar concentraciones menores al final de las pruebas que con el uso de carbón activado impregnado con nitrato cúprico y este efecto se mantiene igual para los dos concentraciones iniciales de cianuro que fueron consideradas.

La diferencia entre el uso de uno y otro catalizador no es tan amplia como ocurrió cuando se establecía la comparación con el carbón activado sin modificar, lo cual definitivamente representa una mejora en el proceso de oxidación de cianuro además de que el carbón activado con cobre electrodepositado presenta una tendencia ligeramente mayor que el carbón activado impregnado para continuar reduciendo la concentración aún a tiempo cercano al final de las pruebas. Esto demuestra que el carbón activado con cobre electrodepositado tiene el potencial de ser una mejor opción que el carbón activado impregnado con nitrato cúprico. Si bien ambos tipos de carbón activado modificado contienen cobre en su estructura, el cobre metálico resultó más favorable para la oxidación de cianuro que el cobre en forma de nitrato.

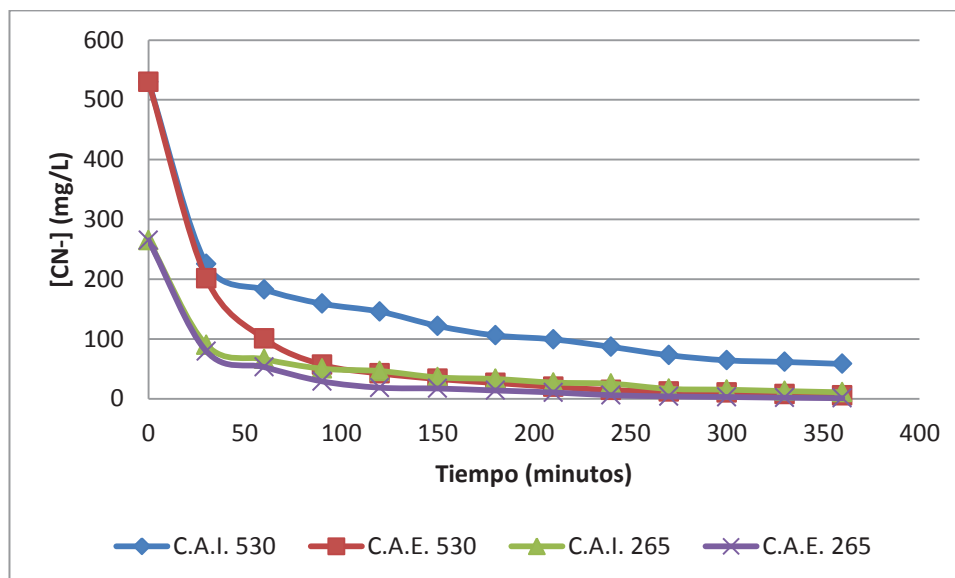


Figura 3.17. Influencia del uso de carbón activado impregnado (C.A.I.) con nitrato de plata y carbón activado con cobre electrodepositado (C.A.E.) en la oxidación de cianuro presente en soluciones sintéticas

Para finalizar esta sección comparativa del funcionamiento del carbón activado con cobre electrodepositado y otras formas de carbón activado se consideró el carbón activado impregnado con nitrato de plata y las gráficas obtenidas en las pruebas se presentan en la Figura 3.17.

Para los dos catalizadores considerados en la Figura 3.17, la eliminación de cianuro a partir de una misma concentración es parecida al inicio de la reacción y también cerca del final de las pruebas porque los valores finales de concentración de cianuro no son muy distantes entre ellos en esta región de las curvas.

Adicionalmente, el uso de carbón activado con cobre electrodepositado produce valores más bajos de concentración a un tiempo dado que el uso de carbón activado impregnado con nitrato de plata para soluciones con las concentraciones iniciales consideradas. Para un mejor seguimiento de los resultados de esta sección, los valores finales de concentración y porcentaje de eliminación de cianuro para todas las figuras comparativas se presentan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Resultados de los tratamientos de oxidación de cianuro en soluciones sintéticas con diversos tipos de catalizadores de carbón activado modificado
Condiciones: $[\text{NaCN}]_0 = 0,5 \text{ g/L}$ y $1,0 \text{ g/L}$; $\text{pH} = 10,5$; Aire 650 L/h

$[\text{CN}]_0$ (mg/L)	Catalizador usado	$[\text{CN}]_f$ (mg/L)	Porcentaje de oxidación de cianuro (%)
530	50 g/L C.A.	268,8	49,28
	50 g/L C.A.I. $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	44,1	91,69
	50 g/L C.A.I. AgNO_3	58,3	89,00
	50 g/L C.A.E.	5,3	99,00
265	50 g/L C.A.	131,8	50,25
	50 g/L C.A.I. $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	16,9	93,63
	50 g/L C.A.I. AgNO_3	10,9	95,88
	50 g/L C.A.E.	1,0	99,63

El catalizador que produjo las concentraciones más bajas de cianuro al final de las pruebas tanto para las dos series de concentraciones fue el carbón activado con cobre electrodepositado que permitió alcanzar 5 ppm para una concentración inicial de 530 ppm en seis horas y 1 ppm para una concentración inicial de 265 ppm en el mismo tiempo.

El uso de los otros catalizadores condujo a concentraciones finales más altas. Es una amplia diferencia la que existe entre los resultados con el carbón activado sin modificar que solamente permitió la una reducción que fue cercana al 50% del cianuro inicial a partir de ambas concentraciones.

Esta diferencia se reduce al hacer la comparación con los carbones activados impregnados con nitrato cúprico y de plata respectivamente que permitieron reducir la concentración del cianuro entre un 89 y 95% dependiendo de la concentración inicial. En el caso del carbón activado electrodepositado, la eliminación del cianuro fue mayor al 99% con las dos concentraciones iniciales, lo que indica notoriamente que el cobre electrodepositado sobre carbón activado facilitó la creación de un catalizador superior a los otros considerados en este estudio para este tipo de aplicación.

3.4.3 RECICLOS DE CARBÓN ACTIVADO CON COBRE ELECTRODEPOSITADO

Luego de los resultados iniciales del uso de este nuevo tipo de carbón activado modificado desarrollado se encontró un gran potencial en este catalizador para oxidación de cianuro en comparación con las otras variantes de carbón activado utilizadas, por esta razón se hizo necesario realizar pruebas destinadas a conocer su comportamiento al reutilizarlo.

Las mencionadas pruebas se hicieron para soluciones sintéticas de cianuro con una concentración inicial de 0,5 g/L de cianuro de sodio, con 50 g/L de catalizador y pH 10,5 tal como se indicó en la sección 2.3.3.

El catalizador fue utilizado cuatro veces y las curvas de concentración de cianuro con el tiempo obtenidas a partir de los resultados de los ensayos se presentan en la Figura 3.18.

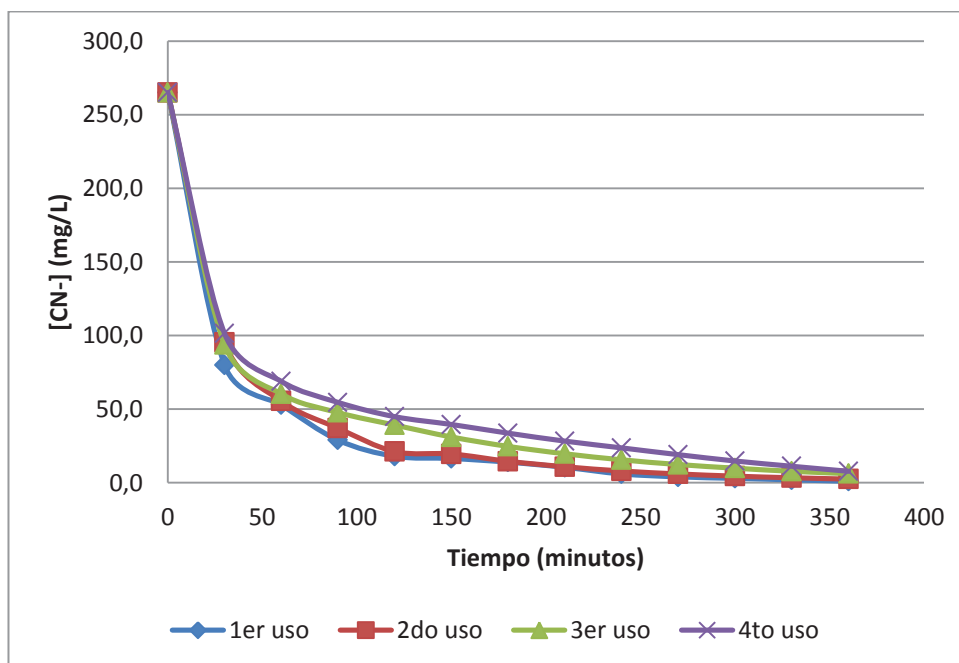


Figura 3.18. Reutilización del carbón activado con cobre electrodepositado para la oxidación de cianuro presente en soluciones sintéticas de 265 ppm de concentración inicial

Como se puede apreciar en la Figura 3.18, se logra una disminución importante de la concentración de cianuro en todas las pruebas y la cinética presenta variación en cada reciclo por lo que se van alcanzando concentraciones más elevadas hacia el final de las pruebas pero estas concentraciones finales no presentan mucha diferencia entre sí, lo que es una característica muy favorable para el uso del catalizador de carbón activado con cobre electrodepositado en esta aplicación sin realizar ningún tipo de acondicionamiento especial para el catalizador entre reciclo y reciclo. Los valores finales medidos en estas pruebas se presentan en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16. Resultados de los tratamientos de reutilización de carbón activado con cobre electrodepositado (C.A.E.) en soluciones sintéticas de NaCN
Condiciones: $[\text{NaCN}]_0 = 0,5 \text{ g/L}$; $\text{pH} = 10,5$; Aire 650 L/h

Parámetros	$[\text{CN}^-]_f$ (mg/L)	Porcentaje de oxidación de CN^-
50 g/L C.A.E. 1er uso	1,0	99,63
50 g/L C.A.E. 2do uso	2,3	99,13
50 g/L C.A.E. 3er uso	6,3	97,63
50 g/L C.A.E. 4to uso	7,6	97,13

La razón principal del cambio en la cinética de la reacción en cada reciclo es la pérdida de cobre electrodepositado en la superficie del carbón activado ya que éste juega un papel muy importante en el funcionamiento del catalizador como se vio en las pruebas comparativas entre el carbón activado sin modificar y el carbón activado con cobre electrodepositado que se presentaron en la Figura 3.15.

También existe influencia de los poros que han adsorbido complejos cobre y cianuro. Se hizo un seguimiento de la disminución de peso del catalizador en cada uno de los usos que fue igual a la pérdida de cobre debido a que la forma de agitación utilizada en las pruebas no dio lugar a pérdidas por atrición del carbón activado y que tampoco hay una significativa adsorción.

Estos resultados, además del contenido de cobre en el carbón activado luego de cada reciclo se presentan en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17. Pérdida de peso de carbón y porcentaje de cobre presente en el carbón activado con cobre electrodepositado (C.A.E.) después de cada ensayo de reutilización

Número de uso	Peso de C.A.E. final	% Peso de Cu
1ero	67,00	18,84
2do	68,60	12,28
3ero	70,30	7,80
4to	73,40	7,05

Como indican los resultados de la Tabla 3.17, la disminución que sufre el porcentaje de cobre en el carbón activado es mayor en los primeros usos ya que se debe considerar que en todas estas pruebas el peso inicial de catalizador fue de 75 g y el porcentaje del cobre al comienzo de la primera prueba era de 27,5%.

Luego entre el tercer y cuarto ciclo hubo un variación mucho menor del contenido de cobre esto se debe a que en los primeros ciclos se van perdiendo las zonas de la capa de cobre que estuvieron menos adheridas y luego van quedando las partes que están más fuertemente ligadas al substrato que es el carbón activado.

3.4.4 OXIDACIÓN DE CIANURO EN EFLUENTES REALES CON CARBÓN ACTIVADO CON COBRE ELECTRODEPOSITADO

Para culminar el estudio del uso del catalizador de carbón activado con cobre electrodepositado se realizó una prueba a pequeña escala en el laboratorio para oxidar el cianuro presente en un efluente que se obtuvo de someter componentes metálicos de computadoras molidos a lixiviación con elevadas concentraciones de cianuro. Las características de este efluente tratado se presentan en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Concentraciones de cianuro libre y metales en el efluente, al inicio y al final del tratamiento

	Cianuro libre (mg/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	Cu (mg/L)
Inicio	540,6	3,28	28,3	33,44
Final	90,1	0,02	0,36	4,09

En la Figura 3.19 se presenta la variación de la concentración de cianuro libre con el tiempo que ocurrió durante el ensayo de oxidación para el efluente real.

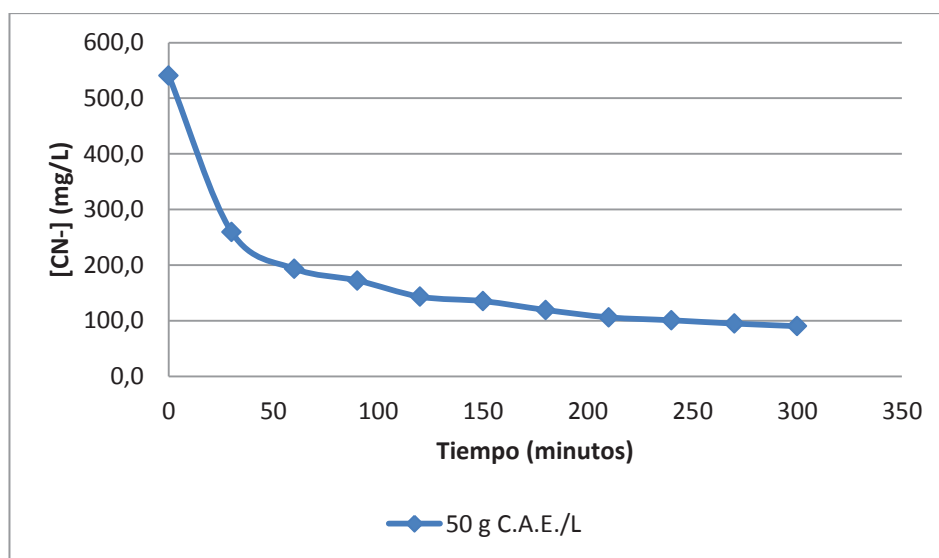


Figura 3.19. Oxidación de cianuro en efluente real con aire y carbón activado con cobre electrodepositado a escala de laboratorio

El uso del carbón activado con cobre electrodepositado permitió la eliminación de un significativo porcentaje de cianuro que fue del 83% respecto al valor inicial a diferencia de lo que se logró con una solución sintética de concentración similar en la que se llegó al 99%. El efecto de la adsorción de los complejos cianurados de metales en el carbón activado dificulta la acción catalizadora ocupando los sitios activos de la superficie del carbón y reduciendo la cinética y eso explica la reducción en el porcentaje de cianuro que se elimina que en este caso no resulto tan marcada.

3.5 CINÉTICAS DE REMOCIÓN DE CIANURO

La cinética de la oxidación del cianuro con aire y catalizada por carbón activado sigue un modelo de primer orden. Siguiendo este modelo, los parámetros de la cinética de reacción se determinaron aplicando regresión lineal a los datos de concentración de cianuro versus tiempo de reacción. La ecuación 1.23 que corresponde a una cinética de primer orden se aplica. La pendiente de la recta obtenida por regresión lineal es igual a la constante de velocidad de la reacción.

Cuando se usa carbón activado sin modificar, los datos se ajustan al modelo lineal pero en el caso de los carbones activados modificados, ocurre que en los primeros minutos de la reacción, la cinética de eliminación del cianuro es más rápida lo que se le atribuye a la formación de complejos cianuro metálicos que luego posteriormente son oxidados a cianato. Lo expresado anteriormente se muestra gráficamente en la Figura 3.20.

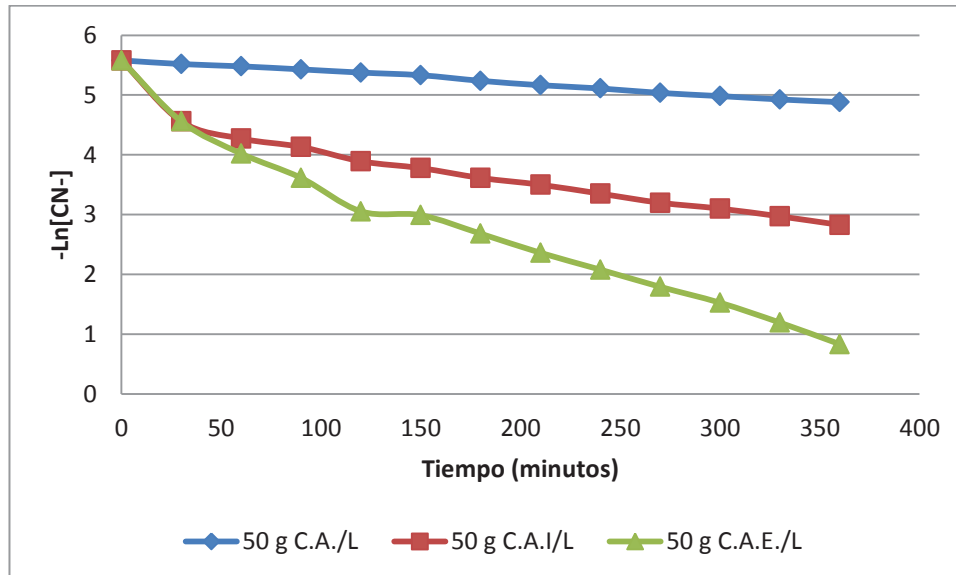


Figura 3.20. Comparación de la cinética de la oxidación de cianuro con carbón activado sin modificar (C.A.), carbón activado impregnado (C.A.I.) y electrodepositado (C.A.E.) al aplicar el modelo de primer orden

Condiciones: $[\text{CN}^-]_0 = 265 \text{ mg/L}$; $\text{pH} = 10,5$; Aire 650 L/h ;
Tamaño $2,4 - 4,7 \text{ mm}$; N. Yodo $310 \text{ mg I}_2/\text{g CA}$

Debido a esta variación en la cinética que ocasiona la presencia de metal en el carbón, se decidió tomar los valores de concentración de cianuro y tiempo a partir de la primera hora de reacción para cuando se utilizan los carbones activados modificados y de esta manera ajustarse de mejor manera al modelo de primer orden.

En la Figura 3.20 se evidencia que la mejor tendencia lineal se tiene con el carbón activado sin modificar pero el carbón activado impregnado también presenta una tendencia lineal si no se consideran el inicio de la curva correspondiente.

Los resultados de la cinética obtenida para los carbones impregnados de acuerdo con el modelo indicado para la oxidación de soluciones cianuradas de concentración inicial 0,5 g NaCN/L en planta piloto se presentan en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Resultados de la cinética de primer orden para los ensayos de oxidación de cianuro en planta piloto

Condiciones: $[CN^-]_0 = 265$ mg/L; pH = 10,5; Aire 650 L/h; Tamaño 2,4 – 4,7 mm; N. Yodo 310 mg I₂/g CA

Datos del ensayo	Concentración final (mg/L)	Oxidación (%)	k (min ⁻¹)	R ²
C.A.I. Cu(NO ₃) ₂ ; 50 g/L; 1er uso	29,7	89,37	0,0055	0,97
C.A.I. Cu(NO ₃) ₂ ; 50 g/L; 2do uso	82,9	68,75	0,0029	0,97
C.A.I. Cu(NO ₃) ₂ ; 50 g/L; 3er uso	101,9	61,56	0,0025	0,98
C.A.I. AgNO ₃ ; 50 g/L; 1er uso	96,7	65,74	0,0015	0,92
C.A.I. AgNO ₃ ; 50 g/L; 2do uso	123,4	53,55	0,0014	0,98
C.A.I. AgNO ₃ ; 50 g/L; 3er uso	156,3	40,31	0,0011	0,97

A nivel piloto, el carbón activado impregnado con nitrato cúprico tuvo un mejor desempeño en la oxidación de cianuro lo que se evidencia en el valor de las constantes de velocidad de primer orden.

Para el uso de carbón activado con cobre electrodepositado para oxidación de cianuro en pruebas de laboratorio de soluciones con concentración inicial de 0,5 g/L de NaCN, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 3.20 al plantear el modelo de reacción de primer orden. Estos resultados se contrastan con los del carbón activado impregnado en las mismas condiciones de reacción.

Tabla 3.20. Resultados de la cinética de primer orden para los ensayos de oxidación de cianuro en pruebas de laboratorio

Condiciones: $[\text{CN}^-]_0 = 265 \text{ mg/L}$; pH = 10,5; Aire 650 L/h; Tamaño 2,4 – 4,7 mm; N. Yodo 310 mg I₂/g CA

Datos del ensayo	Concentración final (mg/L)	Oxidación (%)	k (min ⁻¹)	R ²
C.A.E.; 50 g/L; 1er uso	1,0	99,63	0,0121	0,98
C.A.E.; 50 g/L; 2do uso	2,3	99,13	0,0101	0,99
C.A.E.; 50 g/L; 3er uso	6,3	97,63	0,0076	1,00
C.A.E.; 50 g/L; 4to uso	7,6	97,13	0,0068	0,98
C.A.I. Cu(NO ₃) ₂ ; 50 g/L; 1er uso	16,9	93,63	0,0047	0,99
C.A.I. AgNO ₃ ; 50 g/L; 1er uso	10,9	95,88	0,0060	0,99

En la Tabla 3.20 se puede apreciar como la reutilización del carbón activado con cobre electrodepositado afecta a la cinética de la reacción en la disminución del valor de la constante de reacción que como se puede observar resultó ser más alta en comparación con los carbones activados impregnados con nitrato cúprico y nitrato de plata. Una relativamente baja disminución en el porcentaje de oxidación de cianuro se traduce en una disminución mayor en la constante de reacción.

3.6 DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES CIANURADOS

3.6.1 FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA

A continuación se presenta el diseño de una planta de tratamiento de efluentes contaminados con 0,5 g de cianuro libre por litro de efluente, sobre la base de los datos obtenidos experimentalmente se establece que para el funcionamiento de dicha planta es necesario disponer de tres tanques de oxidación en serie que operan en modo batch, transcurrido el tiempo de tratamiento en el primer tanque de oxidación, 6 h, el efluente tratado pasa a una segunda oxidación en un tanque igual al primero donde permanece 6 horas para finalmente pasar a una tercera etapa de oxidación donde se asegura la completa remoción de cianuro libre, en caso necesario. Para cumplir con la demanda de tratamiento de 10 m³/día, se tiene que contar con 4 sistemas de tratamiento, en cada sistema se llevarán a cabo dos paradas donde se tratarán 1,25 m³ de efluente contaminado, es decir se realizarán 8 paradas, 2 en cada sistema.

El contacto entre el efluente y el carbón activado usado como catalizador en la oxidación del cianuro libre se mejora con el ingreso de una corriente de aire que permite que el lecho de carbón activado se agite además de suministrar el oxígeno necesario para la reacción. Cada sistema de tratamiento cuenta con un compresor de aire que permite tener la corriente de aire necesaria para el proceso de eliminación del cianuro dentro de los tanques de oxidación, este aire se difunde por medio de unos difusores circulares colocados en el fondo de los tanques; contruidos de la misma forma que el presentado en la Figura 2.4. Se deben emplear equipos de acero inoxidable debido a la naturaleza corrosiva del efluente y para mayor durabilidad. El balance de masa del proceso anteriormente explicado resume en la Tabla 3.21 y se ilustra mediante un diagrama de bloques en la Figura 3.21.

Tabla 3.21. Resumen global del balance de masa del tratamiento de agua con 0,5 g/L de cianuro libre (1250 kg/batch)

Proceso	Sustancia	Entrada (kg/batch)	Salida (kg/batch)
Oxidación 1	Efluente	1 250	1 250
	Cianuro libre	0,62	0,17
	Aire	257,04	257,04
Oxidación 2	Efluente	1 250	1 250
	Cianuro libre	0,17	0,03
	Aire	257,04	257,04
Oxidación 3	Efluente	1 250	1 250
	Cianuro libre	0,03	0
	Aire	85,68	85,68

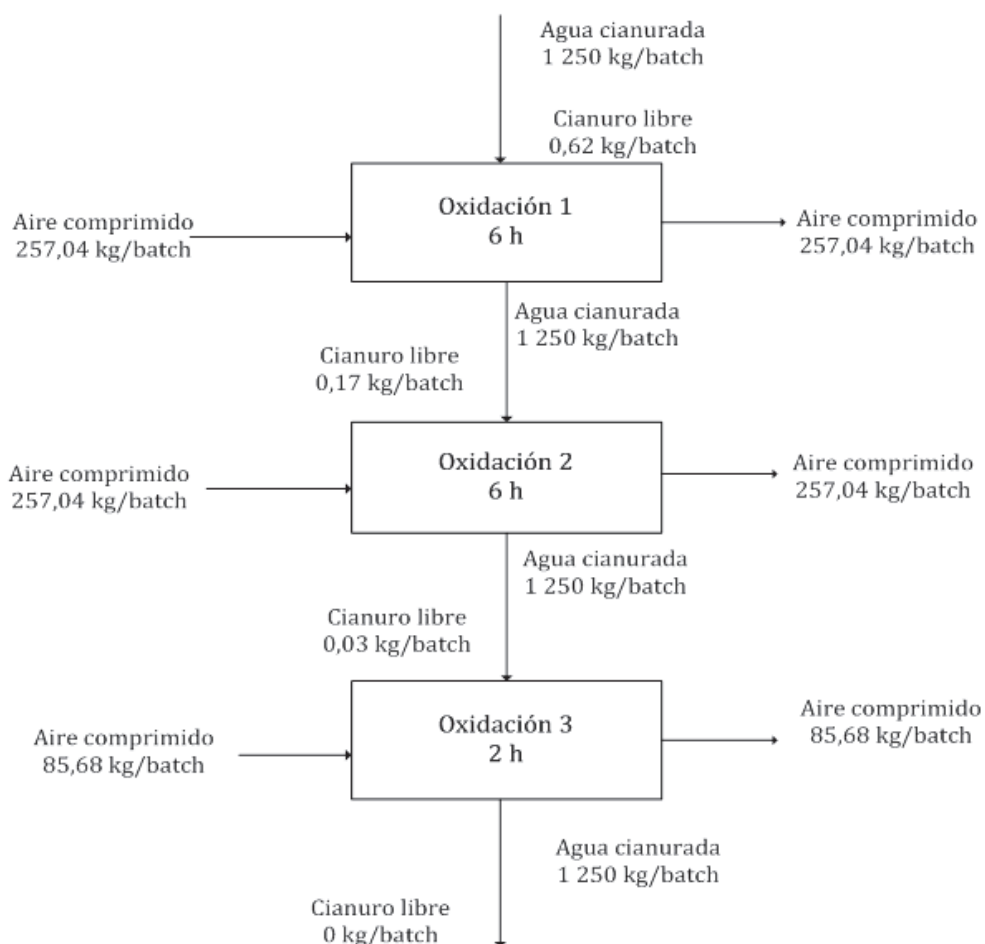


Figura 3.21. Diagrama de bloques del proceso de oxidación de cianuro a realizarse en la planta propuesta

El diagrama de la Figura 3.21 muestra el proceso que se efectúa en la planta de tratamiento de efluentes cianurados, las corrientes se encuentran expresadas en función del requerimiento por parada para los tanques batch de 1,25 m³ de capacidad, en cada sistema de tratamiento. En el escalamiento realizado se considera que los resultados pueden variar, es por esta razón que el porcentaje de remoción de cianuro es inferior en un 10% al valor alcanzado en las primeras dos etapas según los datos experimentales, cuyos porcentajes alcanzaron 82,26 y 99,99% respectivamente. La inclusión de una tercera fase de oxidación busca asegurar la remoción del cianuro libre presente en los efluentes.

En la Tabla 3.21 se resume las corrientes de entrada y salida a cada sistema de tratamiento, en este caso no se ha considerado corrientes de carbón activado ya que este material permanece en los tanques de oxidación hasta que los niveles de adsorción y capacidad de catalizador se vean alterados, para la cual se puede tomar la acción de lavado de carbón, seguida de una nueva impregnación o su remplazo por un carbón nuevo, la estrategia a ejecutarse dependerá del análisis coste-beneficio de cada alternativa.

El porcentaje de remoción en la primera etapa es de 72,26%, en la segunda oxidación de 89,99%, dichos porcentajes respecto a los valores obtenidos a nivel experimental como se explicó anteriormente. La inyección de aire a cada tanque de oxidación se realiza con el empleo de un compresor de aire industrial, el que permite obtener aire comprimido a 3 atm y se distribuye dentro de cada tanque a través de difusores circulares que se encuentran ubicados en la parte inferior del recipiente.

La cantidad de aire necesaria en la tercera fase de oxidación es inferior a las dos precedentes por la consideración de un tiempo de tratamiento de 2 horas en lugar de 6 como las dos primeras ya que se espera que la cantidad de cianuro a remover sea mínima. Este valor se estableció sobre la base del flujo de aire utilizado a nivel experimental 9500 L/h, a las condiciones de aire comprimido que permite el equipo industrial.

3.6.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO (PFD)

En el diagrama de flujo construido se explican las condiciones de las corrientes que ingresan y salen del sistema de tratamiento, se especifica el valor de temperatura y presión de las mismas; en el caso de la temperatura se considera que todo el proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente de 20°C. Dado la falta de procesos de calentamiento durante la oxidación del cianuro, no se hace necesario ningún tipo de aislamiento.

La presión en la corriente del efluente es la presión atmosférica, mientras que la del aire comprimido es de 3 atm, presión a la cual trabaja el compresor a utilizar. En las tres etapas de oxidación se puede apreciar una corriente de salida de aire, estas están referidas a la presión máxima de trabajo, es decir que por medio de válvulas de alivio la presión dentro del tanque no sobrepase la presión de diseño del tanque de oxidación, 0,3 atm. Es por ello que no se especifica el valor de dichas corrientes ya que estas varían de acuerdo a la presión dentro del tanque de oxidación, se colocan por seguridad. La Figura 3.22 ilustra el diagrama de flujo de proceso de la planta propuesta con cada uno de los equipos necesarios y con su codificación respectiva.

3.6.3 DIAGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN Y TUBERÍAS (PID)

En el diagrama de instrumentación y tuberías que se presenta en la Figura 3.23, se puede apreciar el valor del diámetro de tuberías empleadas para cada corriente tomando en cuenta las velocidades lineales de diseño especificadas en la parte cálculos, un mismo compresor abastece cada sistema de tratamiento, no existe un momento en el cual los tres tanques de oxidación de cada sistema se encuentren funcionando al mismo tiempo. Se cuenta con una bomba entre tanques de almacenamiento y oxidación, estas bombas se encienden únicamente para el llenado y vaciado de los tanques de oxidación y cada una de estas se requiere para superar una altura de bomba de 4,76 m considerando pérdidas friccionales.

A la entrada de cada tanque de oxidación se cuenta con una válvula hidráulica manual de tres vías debido a que no se requiere regulación en el caudal, esta se abre cuando se bombea el agua a tratar y se cierra durante el proceso de oxidación. Una válvula de alivio de presión está presente en cada tanque de oxidación con el fin de evitar cualquier sobrepresión durante el proceso.

3.6.4 EQUIPOS EN PLANTA Y SU DISTRIBUCIÓN

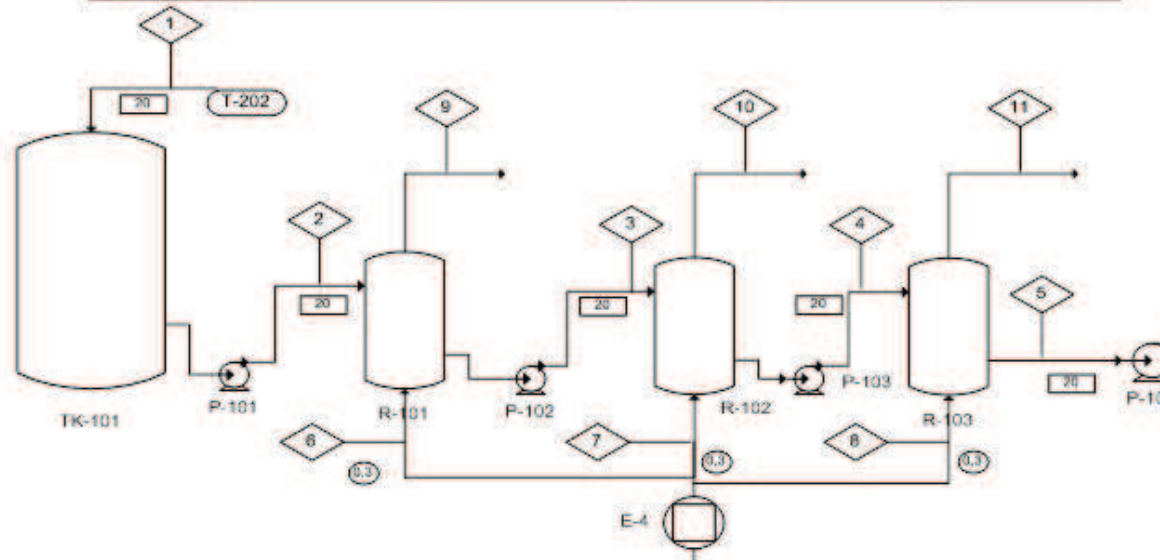
La distribución de planta presentada en la Figura 3.24 permite disminuir al máximo la distancia recorrida por las sustancias que intervienen en el proceso de tratamiento de efluentes cianurados, en este tipo de distribución el material es el que presenta movimiento dentro de la planta, es decir no hay movimiento de máquinas ni equipos, así como tampoco del personal que en ella labora, excepto para el proceso de renovación de carbón en los tanques de oxidación una vez agotado el mismo.

Este tipo de distribución permite una mayor facilidad en el control, permite un uso más efectivo de la mano de obra y reduce la congestión en toda el área de la planta. Se evitan cruces de flujo, es seguro para el acceso de personal y materiales. A la vez cada equipo se encuentra cercano a tanques de almacenamiento de agua o bodega, guardando las distancias respectivas entre sí (2,5 a 3 diámetros entre centro y centro).

De acuerdo a la escala establecida en el layout, el área requerida para la instalación de la planta es de 295 m², en donde se contará con el área de oxidación, área de almacenamiento de aguas no tratadas y tratadas, así como también área administrativas. 154 m² corresponde netamente a la planta de tratamiento y bodega, los 91 m² restantes al área de administración y control.

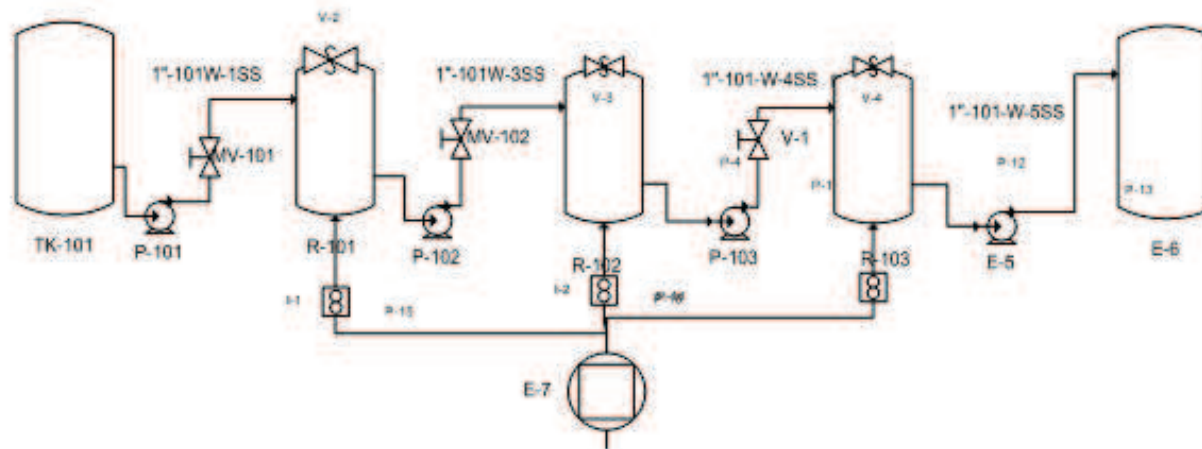
Los cálculos referentes al diseño y dimensionamiento de los equipos necesarios para la operación de la planta de tratamiento de efluentes cianurados se detallan en el Anexo IX.

Lista de equipamiento					
Identificación	TK-101	R-101	R-102	R-103	E-101
Equipo	Tanque almacenamiento de efluente	Oxidador 1	Oxidador 2	Oxidador 3	Compresor
Bombas centrífugas	P-101	P-102	P-103	P-104	



Título:	Diagrama de flujo de procesos											
Creador:	Grupo Diseño de Plantas											
Fecha:	15/03/2013	Hora:	18h00	PG:	1	de:	1					
Observaciones:	Cantidades expresadas para una parada en serie											
Lista de corrientes												
Componentes	Unidades	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Agua cianurada	kg	1250	1250	1250	1250	1250						
Cianuro libre	kg		0.62									
Aire	kg						257,04	257,04	257,04	257,04	257,04	257,04

Figura 3.22. Diagrama de flujo de proceso (PFD) de la planta de tratamiento de efluentes



Título:	Diagrama de instrumentación y tuberías								
Creador:	Grupo Diseño de Plantas								
Fecha:	15/03/2013	Hora:	18h00	PG:	1	de:	1		
Lista de líneas									
Línea No	Diámetro nominal	Material	Desde	Hasta	Masa/batch	Temperatura	Presión	Aislado	Calentamiento por vapor
101-B	1"	1SS	TK-101/TK-102	R-101	1 250 kg	20 °C	14,7 Psi	No	No
101-D	1"	3SS	R-101	R-102	1 250 kg	20 °C	14,7 Psi	No	No
101-w	1"	4SS	R-102	R-103	1 250 kg	20 °C	14,7 Psi	No	No
101-DBD	1"	5SS	R-103	TK-103	1 250 kg	20 °C	14,7 Psi	No	No
101-L		6SS	E-101	R-101	42,84 kg/h	22 °C	4,41 Psi	No	No
101-DDB		7SS	E-101	R-102	42,84 kg/h	22 °C	4,41 Psi	No	No
101-mps		8SS	E-101	R-103	42,84 kg/h	22 °C	4,41 Psi	No	No

Figura 3.23. Diagrama de instrumentación y tuberías (PID) de la planta de tratamiento de efluentes cianurados

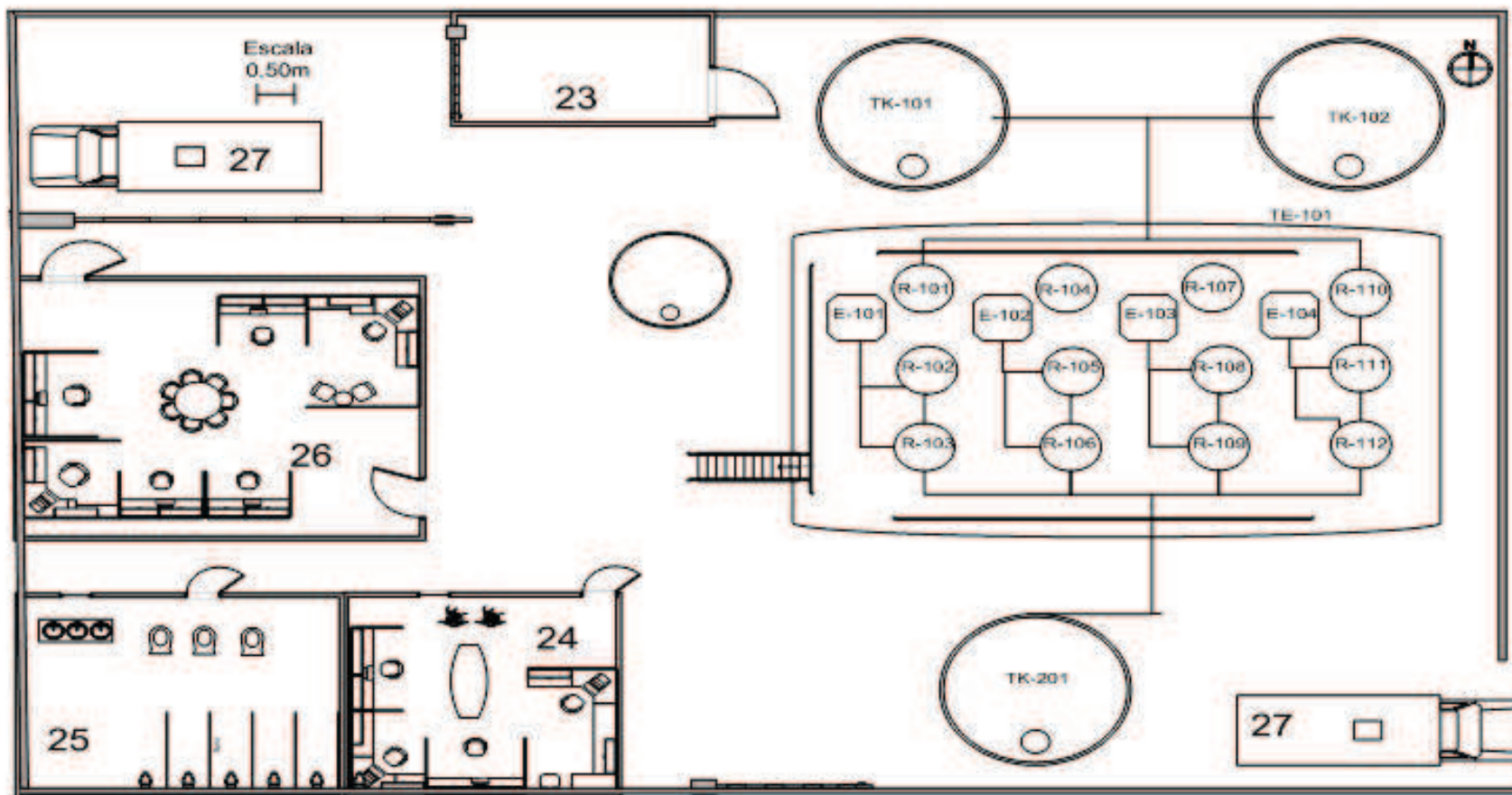


Figura 3.24. Layout de la planta de tratamiento de efluentes cianurados

En la Tabla 3.22 se detalla la nomenclatura de equipos y áreas para identificar y describir lo expuesto en la Figura 3.24.

Tabla 3.22. Nomenclatura de equipos y áreas de la planta

LISTA DE IDENTIFICACIÓN	
NÚMERO	EQUIPO/SITIO
TK-101	Tanque de almacenamiento de efluentes cianurados
TK-102	Tanque de almacenamiento de efluentes cianurados
R-101	Tanque de oxidación 1 (sistema 1)
R-102	Tanque de oxidación 2 (sistema 1)
R-103	Tanque de oxidación 3 (sistema 1)
R-104	Tanque de oxidación 1 (sistema 2)
R-105	Tanque de oxidación 2 (sistema 2)
R-106	Tanque de oxidación 3 (sistema 2)
R-107	Tanque de oxidación 1 (sistema 3)
R-108	Tanque de oxidación 2 (sistema 3)
R-109	Tanque de oxidación 3 (sistema 3)
R-110	Tanque de oxidación 1 (sistema 4)
R-111	Tanque de oxidación 2 (sistema 4)
R-112	Tanque de oxidación 3 (sistema 4)
E-101	Compresor (sistema 1)
E-102	Compresor (sistema 2)
E-103	Compresor (sistema 3)
E-104	Compresor (sistema 4)
TK-201	Tanque de almacenamiento de agua tratada
23	Bodega de almacenamiento de material para proceso (carbón activado)
24	Oficinas y sala de reunión
25	Baños
26	Cuarto de control
27	Vehículos de abastecimiento

Para complementar la información presentada en el layout de la planta, Figura 3.24 y Tabla 3.22, se incluye un listado de la distribución de los equipos en la Tabla 3.23. Las especificaciones técnicas de estos equipos están en el Anexo VII.

Tabla 3.23. Lista de equipos distribuidos por áreas

LISTA DE IDENTIFICACIÓN		
NÚMERO	EQUIPO/SITIO	ÁREA
TK-101	Tanque de almacenamiento de efluente cianurado	Área 100
R-101	Tanque de oxidación (Sistema 1)	
R-102	Tanque de oxidación (Sistema 1)	
R-103	Tanque de oxidación (Sistema 1)	
R-104	Tanque de oxidación (Sistema 2)	
R-105	Tanque de oxidación (Sistema 2)	
R-106	Tanque de oxidación (Sistema 2)	
R-107	Tanque de oxidación (Sistema 3)	
R-108	Tanque de oxidación (Sistema 3)	
R-109	Tanque de oxidación (Sistema 3)	
R-110	Tanque de oxidación (Sistema 4)	
R-111	Tanque de oxidación (Sistema 4)	
R-112	Tanque de oxidación (Sistema 4)	
E-101	Compresor de aire (Sistema 1)	
E-102	Compresor de aire (Sistema 2)	
E-103	Compresor de aire (Sistema 3)	
TK-201	Tanque de almacenamiento de efluente tras proceso de oxidación de cianuro	Área 200
22	Bodega	
23	Sala de reuniones	
24	Oficinas	
25	Baños	
26	Cuarto de control	
27	Camiones de abastecimiento	

3.6.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para evaluar económicamente la implementación de la planta de tratamiento de efluentes cianurados, se comienza por presentar los datos generales de la planta. La Tabla 3.24 de la evaluación económica presenta los datos generales de la planta, que permiten establecer parámetros importantes que relacionan costos de materia prima anual.

Tabla 3.24. Datos generales de la planta

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad de la planta	3000	m ³ /año
Días de operación al año	300	días/año
Tipo de industria	sólido - líquido	
Tasa de interés	10%	

3.6.5.1 Inversión

En la Tabla 3.25 se muestra el desglose de los equipos requeridos para el funcionamiento de la planta, como se ha mencionado se establecieron 4 sistemas de tratamiento cada uno de ellos cuenta con 3 tanques de oxidación por lo que se necesitan 12 recipientes de este tipo, los tanques de almacenamiento son dos de agua sin tratar, en caso de existir algún problema en el tratamiento diaria requerido se tiene un tanque de almacenamiento extra, un tanque de agua tratada. Se requiere de 4 compresores, uno por cada sistema de tratamiento, de existir algún problema con uno de los compresores, el resto de líneas no se paran, finalmente se requieren bombas que permiten el llenado y vaciado de los tanques de oxidación, por cada sistema se demanda 4 bombas para dar un total de 16 bombas. La inversión para equipos es de \$33 402,40, sobre este dato se calcularán los costos directos e indirectos mediante el uso de factores que responden a características importantes para la instalación de la planta, estos costos se presentan en la Tabla 3.25.

Tabla 3.25. Inversión en equipos

Equipo principal puesto en la planta	Unidades	Precio Unitario (\$)	Total (\$)
Tanque de oxidación R-101 hasta R-112	12	500,20	6 002,40
Tanque almacenamiento TK-101, TK-102 y Tk-201 de 10 m ³	3	7 000	21 000,00
Compresor de aire	4	400	1 600,00
Bombas	16	300	4 800,00
I_{EF}			33 402,40

En la Tabla 3.26 se presenta el cálculo de la inversión total fija. Para el cual se consideraron los costos directos e indirectos aplicando el factor correspondiente sobre el monto total de la inversión en equipos. Luego de sumados los costos directos e indirectos se obtuvo el valor de la inversión fija sobre el cual se aplicó un 10% extra por servicios industriales y se llegó a determinar un valor de \$ 116107,72 como inversión total fija. Los cálculos correspondientes se incluyen en el Anexo IX.

Tabla 3.26. Costos directos, costos indirectos, inversión fija y capital de trabajo

Parámetro	Valor (\$)
Costos Directos ($\Sigma fd=2,02$)	63 464,56
Costos Indirectos ($\Sigma fi=1,26$)	42 087
Inversión Fija (I_E)	105 551,56
Servicios Industriales ($\Sigma fs=10\%$)	10 555,16
Capital de Trabajo ($f_{trabajo}=0,75$)	116 107,72

La simbología f_d y f_i representan los factores correspondientes a los ítems que están relacionados con los costos directos e indirectos, respectivamente, estos valores se pueden apreciar en el Anexo VIII.

Se considera que la planta de tratamiento es procesadora de sólido-fluido, por lo que se toman en cuenta los factores correspondientes a este tipo de planta.

En el caso de costos directos se descartó el factor correspondiente a mejoras exteriores, la sumatoria de factores en este caso es de 1,9, el mismo que se puede compensar con el ítem de Instrumentación y control instalados debido a que en la planta no se cuenta con un control muy fino. En el caso de costos indirectos la sumatoria de factores da un valor de 1,26.

Cada factor multiplicado por el costo de equipo requerido permite determinar los costos directos e indirectos como se muestra en la Tabla 3.26 y la suma de estos dos valores proporciona el valor de capital fijo de inversión. Sobre dicho capital se calcula lo referente a servicios industriales que es 10%, este último valor junto con el capital de inversión fijo proporcionan el capital total de inversión.

3.6.5.2 Costos de producción

Los costos de producción son los que se muestran en la Tabla 3.27, el C_Q se refiere a la materia prima, en este caso se toma 25 kg/día tomando en cuenta que el carbón es reutilizado durante algunos ciclos, también se considera un cierto consumo de cal que no es muy alto debido a que los efluentes esperados ya vienen con un pH cercano a 10,5 que es el valor de trabajo.

En el caso de C_L se refiere al costo de mano de obra anual junto con el gasto en energía en el que se consideró el uso de las bombas con 2 h de funcionamiento por día cada una y también el consumo de energía de los 4 compresores con 12 h diarias de funcionamiento cada uno.

Tabla 3.27. Costos de producción

Parámetro	Valor (\$)
C_Q	22 800,00
C_L	21 888,40
Costos totales de producción	44 688,40

Los datos referentes al costo y consumo tanto del carbón activado modificado como de cal; el consumo diario de energía eléctrica y la fuerza laboral necesaria fueron considerados también en la estimación de costos de producción. Estos datos se presentan en las Tablas 3.28 y 3.29.

Tabla 3.28. Requerimiento de materias primas y servicios industriales

Parámetro	Valor	Unidad	Precio unitario
Requerimiento de Carbón activado modificado	25	kg/día	\$3,00 / kg
Requerimiento de Cal para regular pH	2	kg/día	\$0,50 / kg
Consumo diario de energía eléctrica	2,76	kWh/día	\$0,08 / kWh

Tabla 3.29. Fuerza laboral

Parámetro	Valor	Unidad
Número de obreros en planta	4	personas
Sueldo mensual de obreros	350,00	\$/obrero

Los cálculos que fueron realizados para la determinación de los costos de producción de la planta se presentan en el Anexo IX.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- El uso de carbón activado impregnado con nitrato de cobre al 0,45% en peso de cobre, permitió alcanzar porcentajes de eliminación de cianuro cercanos al 90% en 6 horas de oxidación a escala piloto y que superaron a los porcentajes logrados por el carbón impregnado con nitrato de plata al 0,27% de plata.
- El efecto de aumentar la concentración de carbón activado modificado, significó solo un ligero incremento en la velocidad de oxidación del cianuro pero por otro lado, el aumentar la cantidad de sólidos suspendidos en la solución tratada, dificultó el funcionamiento de la agitación neumática.
- El carbón activado con cobre electrodepositado se presenta como una alternativa muy efectiva al uso de carbón activado impregnado del mismo metal porque el contenido de cobre se incrementó más de 50 veces aplicando la técnica de electrodeposición. Un mayor contenido de cobre significó una constante de velocidad más alta y menos efecto adverso en la reutilización de este catalizador.
- El carbón activado impregnado con nitrato de plata se vio más afectado en las reutilizaciones sucesivas que las otras variedades de carbón activado modificado usadas debido principalmente a su menor contenido inicial de metal y en menor medida a la descomposición del nitrato de plata por efecto de la luz.
- El uso exclusivo de agitación por aireación evitó que el carbón activado usado como catalizador sufriera pérdidas significativas por atrición, las pérdidas de masa se debieron principalmente a la solubilización de las sales impregnadas en el caso del carbón activado impregnado y a sitios

donde la electrodeposición no alcanzó a crear una capa de cobre sólidamente adherida en el caso del carbón activado con cobre electrodepositado.

- La corriente es definitivamente una de las variables más importantes que tuvieron los ensayos de electrodeposición. Esta variable está relacionada directamente a la cantidad de material que se deposita en una unidad de tiempo. Se comenzó probando valores de corriente relativamente bajos y subiendo gradualmente hasta que se evidenció la formación de una capa de cobre sobre el carbón en un tiempo relativamente corto de manera que el proceso se hizo más eficiente.
- En los ensayos de electrodeposición de cobre se llegó a obtener una concentración porcentual de cobre en el carbón activado igual al 26,77% aplicando un voltaje de 4,0 V y 5 cm de separación entre los electrodos y luego de una hora de ensayo, lo que permite obtener una significativa cantidad de cobre presente para los ensayos de oxidación de cianuro.
- Tanto el carbón activado impregnado con nitrato de cobre como el que tiene cobre electrodepositado se mostraron como buenos catalizadores para la oxidación del cianuro presente en efluentes reales. El catalizador con cobre electrodepositado pudo reducir un porcentaje de 83% de cianuro a partir de una solución que contenía un aproximado de 1,0 g NaCN / L en solo 5 horas.
- La oxidación del cianuro libre en un efluente real de cianuración fue posible con el uso de carbón activado impregnado con nitrato cúprico a escala piloto y permitió una reducción alta del compuesto tóxico, superior al 80%, a partir de una concentración inicial del 0,55 g NaCN/L en 6 horas. Para alcanzar una concentración de 0,1 ppm de cianuro libre se necesitó de una segunda etapa de oxidación de igual duración.

- En la planta diseñada se debe contar con cuatro sistemas de tratamiento, cada uno conformado por tres tanques de oxidación, en cada sistema se harán dos paradas para tratar $1,25 \text{ m}^3$ de efluente contaminado en cada una, de tal manera que con dos paradas por sistema al día se alcance a tratar 10 m^3 de efluente considerando todos los sistemas.
- La inversión total de capital para una planta de eliminación de cianuro por oxidación con carbón activado como la propuesta es de aproximadamente \$116 000, mientras que el costo anual de producción es de \$44 688,40.

4.2. RECOMENDACIONES

- Implementar una forma de producir carbón activado con cobre electrodepositado a mayor escala y con similares características al proceso de electrodeposición presentado en este trabajo, de manera que se obtenga un catalizador que ha probado tener buen funcionamiento para la oxidación de cianuro.
- Durante la electrodeposición no resulta conveniente usar voltajes muy elevados a pesar de que esta variable es muy importante en el proceso pero un voltaje elevado produce una corriente elevada en la celda la misma que descompone el ánodo de cobre en poco tiempo.
- Investigar posibles formas de regeneración del catalizador luego de haber sido empleado en un cierto número de usos, en especial para el carbón activado con cobre electrodepositado por ser el más durable y el que menor desgaste sufre.
- Emplear materias primas recicladas para elaborar el carbón activado con cobre electrodepositado o impregnado, ya sea para fabricar la sal de cobre o conseguir ánodos para la electrodeposición.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adams, M. (1990). The chemical behavior of cyanide in the extraction of gold
1. Kinetics of cyanide loss in the presence and absence of activated carbon. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 90(2), 37-44. Recuperado de <http://www.saimm.co.za/Journal/v090n02p037.pdf> (Enero, 2013)
2. Adhoum, N. y Monser, L. (2002). Removal of Cyanide from Aqueous Solution using Impregnated Activated Carbon. *Chemical Engineering and Processing*, 41, 17-21. doi: 10.1016/S0255-2701(00)00156-2
3. Askeland, D. (1988). *The science and engineering of materials*. Londres, Reino Unido: Taylor & Francis.
4. Baird, C. (2004). *Química Ambiental*. (8va. ed.). Barcelona, España: Reverté.
5. Bilurbina, L., Liesa, F. y Iribarren, J. (2003). *Corrosión y protección*. (1era. ed.). Barcelona, España: Edicions UPC.
6. Brown, T. (2004). *Química la Ciencia Central*. (9na. ed.). México D.F., México: Pearson Education.
7. Castillo, F. y Roldán, M. (2005). *Bioteología Ambiental*. Madrid, España: Editorial Tébar.
8. Clugston, M. y Flemming R. (2000). *Advanced Chemistry*. Oxford, Reino Unido: Oxford University Press.
9. Crompton, T.R. (1996). *Determination of Anion: A Guide for the Analytical Chemist*. Berlin, Alemania: Springer.

10. Dash, R., Balomajumder, C. y Kumar, A. (2009). Removal of cyanide from wastewater using granular activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 146(3), 408-413. doi: 10.1016/j.cej.2008.06.021
11. Deveci, H., Yazıcı, E., Alp, I. y Ulsu, T. (2006). Removal of Cyanide from Aqueous Solutions by Plain and Metal-Impregnated Granular Activated Carbons. *International Journal of Mineral Processing*, 79(3), 198-208. doi:10.1016/j.minpro.2006.03.002
12. Eisler, R. (2007). *Eisler's Encyclopedia of Environmentally Hazardous Priority Chemicals*. Ámsterdam, Holanda: Elsevier.
13. Gaviria, A. y Meza, L. (2006). Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del Municipio de Segovia, Antioquia y en la planta de beneficio de la empresa Mineros Nacionales, Municipio de Marmato, Caldas. *Dyna: Revista de la Universidad Nacional de Colombia*, 73(149), 31-34. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/496/49614904.pdf> (Febrero, 2013)
14. Hanrahan, G. (2011). *Key Concepts in Environmental Chemistry*. (6ta. ed.). Waltham, Massachusetts, Estados Unidos: Academic Press.
15. Kavanaugh, M. C. (2003). *Cyanide Formation and Fate in Complex Effluents and its Relation to Water Quality Criteria*. Londres, Reino Unido: IWA Publishing.
16. Khodadadi, A., Abdolahi, M. y Teimoury, P. (2005). Detoxification of cyanide in gold processing wastewater by hydrogen peroxide. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2(3), 177-182. Recuperado de <http://ijehse.tums.ac.ir/index.php/ijehse/article/view/47/46> (Febrero, 2013)

17. Logsdon, M., Hagelstein y K., Mudder, T. (1999). *The Management of Cyanide in Gold Extraction*. Recuperado de <http://www.icmm.com/document/124> (Enero, 2013)
18. Lottermoser, B. (2010). *Mine Wastes Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. (3ra Edición). Berlin. Editorial Springer.
19. Lou, H. y Huang, Y. (2006). *Encyclopedia of Chemical Processing*. doi: 10.1081/E-ECHP-120007747
20. Marsden J. y House I. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*. (2da. ed.). New York, Estados Unidos: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
21. Marsh, H. y Rodríguez, F. (2006). *Activated Carbon*. (1era. ed.). Oxford, Reino Unido: Elsevier.
22. Mas, M., Aguirre, F., Amaya, G., Torres, F. y Marchevsky, N. (2009). *Procesos de destrucción de complejos cianurados*. Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CLICAP). San Rafael, Argentina. Recuperado de <http://www.fcai.uncu.edu.ar/upload/14amtc-mas-unlp.pdf> (Febrero, 2013)
23. Menéndez, J. (2012). *El Carbón en la Vida Cotidiana*. (1era. ed.). Oxford, Reino Unido: Elsevier.
24. Mooiman, M.B. y Miller, J.D. (1986). The chemistry of gold solvent extraction from cyanide using modified amines. *Hidrometallurgy*, 1. doi:10.1016/0304-386X(86)90001-0
25. Moyer, B. y Singh R. (2004). *Fundamentals and Applications of Anion Separations*. New York, Estados Unidos: Springer.

26. Mudder, T., Botz, M., Smith, A. (2001). *Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes*. (2da edición). Londres, Reino Unido: Mining Journal Books, Ltd.
27. Mular, A., Halbe, D. y Barratt, D. (2002). *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control Proceedings, Volume 1*. Littleton, Colorado, Estados Unidos: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME)
28. National Research Council (U.S.). Committee on Prudent Practices in the Laboratory. (2011). *Prudent Practices in the Laboratory: Handling and Management of Chemical Hazards*. Washington D.C., Estados Unidos: National Academies Press.
29. Paunovic, M. y Schlesinger, M. (2006). *Fundamentals of Electrochemical Deposition*. (2da. ed.). New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
30. Pesántez, D. (2010). *Estudio de la Influencia de Sales de Cobre en la Oxidación del Ion Cianuro con Aire y Carbón Activado*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
31. Peters, M. y Timmerhaus, K. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. (4ta. ed.). Singapur, Singapur: McGraw-Hill, Inc.
32. Pilco, Y. (2008). *Estudio de la Oxidación de Efluentes Cianurados en Presencia de Aire y Carbón Activado*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
33. Rajeshwar, K. e Ibanez, J. (1997). *Environmental Electrochemistry Fundamentals and Applications in Pollution Abatement*. San Diego, California, Estados Unidos: Academic Press, Inc.

34. Ramachandra, S. (2006). *Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes*. Oxford, Reino Unido: Elsevier.
35. Rodríguez, R. y García-Cortés, A. (2006). *Los residuos minero metalúrgicos en el medio ambiente*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.
36. Shafer, D. (2006). *Hazardous Materials Characterization: Evaluation Methods, Procedures, and Considerations*. (3ra. ed.). New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
37. Smith, A. y Mudder, T. (1991). *Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes*. Londres, Reino Unido: Mining Journal Books.
38. Tünay, O., Kabdasli, I. y Arslan-Alaton, I. (2010). *Chemical Oxidation Applications for Industrial Wastewaters*. (1era. ed.). Londres, Reino Unido: IWA Publishing.
39. Wang, B., Lan, X., Song, Y. y Li, Y. (2009). Copper Electrowinning from Gold Plant Cyanide-Containing Solution. *Materials Science Forum*, 610-613, 41-47. doi: 10.4028/http://www.scientific.net/MSF.610-613.41
40. Yahya, N. (2010). *Carbon and Oxide Nanostructures: Synthesis, Characterization and Applications*. Berlin, Alemania: Springer.
41. Young, A. y Jordan, T. (1995). Cyanide Remediation: Current and Past Technologies. *Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research*, 104-129. Recuperado de <https://www.engg.ksu.edu/HSRC/95Proceed/young.pdf> (Enero, 2013)

ANEXOS

ANEXO I

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE YODO

MÉTODO

1. Pulverizar una muestra representativa de carbón. (>95% a 45 μm).
2. Secar la muestra de carbón por un tiempo mayor a 4 horas a 110°C y enfriar a temperatura ambiente.
3. Pesar 1,00 g de carbón tratado en un Erlenmeyer de 100 mL limpio, seco y con tapa.
4. Pipetear 10 mL de una solución al 5% de ácido clorhídrico y adicionar al Erlenmeyer. Mover delicadamente el Erlenmeyer tapado con el fin de que todo el carbón pulverizado se humedezca.
5. Calentar la mezcla sobre una plancha de calentamiento hasta que llegue a ebullición nucleada. Mantener en ebullición por 30 segundos, luego retirar y enfriar el Erlenmeyer a temperatura ambiente.
6. Pipetear 100 mL de una solución valorada de yodo / yoduro de potasio 0,1 N, añadir a la mezcla fría y tapar inmediatamente el Erlenmeyer. Agitar vigorosamente el contenido por 30 segundos.
7. Filtrar el contenido del Erlenmeyer sobre papel filtro cuantitativo. Descartar los primeros 20 a 30 mL iniciales y recolectar el filtrado remanente.
8. Tomar 50 mL de muestra del filtrado final y colocarlos en un nuevo Erlenmeyer limpio y seco.

9. Titular con solución valorada de tiosulfato de sodio 0,1 N hasta que la solución contenida en el Erlenmeyer adquiriera una coloración amarilla pálida.

10. Agregar 2 mL de solución de almidón (1 g/L) y seguir titulado hasta que la solución quede incolora.

ANEXO II

CALIBRACIÓN DEL ELECTRODO ESPECÍFICO DE CIANURO

Se prepara una solución estándar de cianuro de sodio disolviendo 1,0 g de cianuro de sodio en agua destilada y aforando a un litro, es importante que la solución posea un pH alcalino, lo que se consigue mediante la adición de pocos mililitros de una solución Ca(OH)_2 para que las condiciones sean más similares a las de las soluciones a tratar hasta un valor dentro del intervalo de 10,5 a 11,0 que se medirá con un pH-metro.

Se toma una alícuota de 10 ml de la solución anterior y se afora a un volumen de 100 ml, nuevamente controlando que el pH se encuentre entre 10,5 a 11 por la adición de la solución de Ca(OH)_2 . Esta solución tendrá una concentración de 100 mg/L de NaCN.

Semejante al punto anterior se realizan soluciones estándares de 10, 1 y 0,1 mg/L NaCN. El electrodo de cianuro se calibra mediante la obtención de la ecuación y/o gráfica de la concentración de NaCN en escala logarítmica en contra de la lectura de diferencia de potencial en mili voltios (mV) que proporciona el equipo acoplado al electrodo. Las dos gráficas obtenidas y con las que se trabajó, se muestran a continuación.

Mediante regresión exponencial de la gráfica se obtiene la ecuación con la que se puede calcular las concentraciones de las soluciones con las que se trabajó en el desarrollo de la investigación.

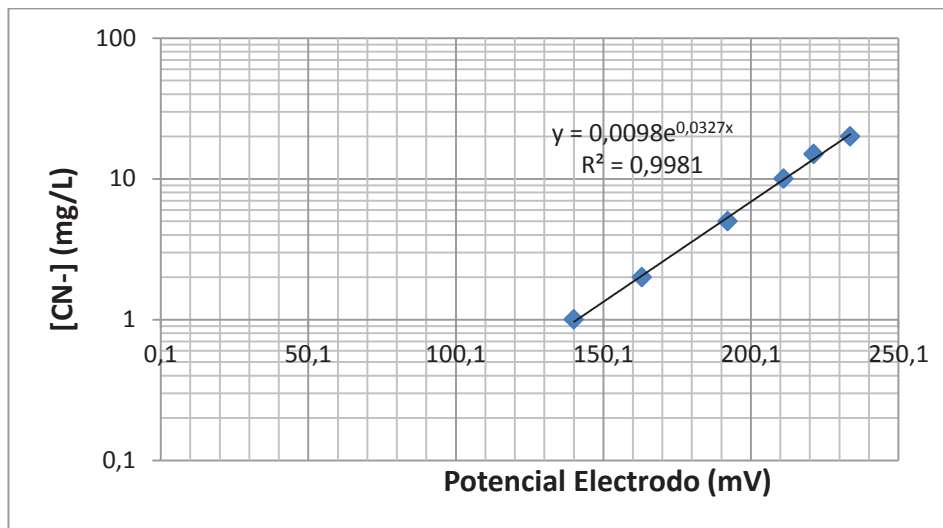


Figura AII.1. Curva de calibración del electrodo selectivo de cianuro 9606BNWP IonPlus Cyanide Electrode

Aplicando este método se llega a que la ecuación para obtener la concentración de cianuro en función del potencial es:

$$[\text{CN}^-] = 0,0098 * e^{0,0327 * V} \quad [\text{I.1}]$$

También es posible graficar el potencial versus el logaritmo de la concentración, en ese caso se obtiene una relación lineal que producirá los mismos resultados.

$$\text{Ln}[\text{CN}^-] = 0,0327 * V - 4,6623 \quad [\text{I.2}]$$

ANEXO III

DETERMINACIÓN DEL CIANURO LIBRE POR TITULACIÓN

PROCEDIMIENTO

Se utilizó una solución estándar de nitrato de plata (AgNO_3) disolviendo 4,33 g de AgNO_3 en agua destilada y aforando a un litro. Esta solución debió diluirse en proporción 1:10 para poder tener lecturas más precisas de su gasto en las titulaciones.

Al principio se obtiene una alícuotas de 2,5 o 5,0 mL de la solución de cianuro y se las diluye, el volumen de las alícuotas luego es variable dependiendo de como va cambiando la concentración de la solución. Se titula utilizando la solución estándar diluida de nitrato de plata. El punto de final de titulación está indicado por la formación de una opacidad blanquecina marcada que enturbia el brillo y transparencia original de la solución por lo que es preciso trabajar contra un fondo oscuro.

Debido a la inexistencia de una total transparencia de la solución, en algunas ocasiones, es difícil detectar el punto de viraje. En este caso se utilizan 2 a 3 gotas de yoduro de potasio al 10% como indicador. Aquí el punto de viraje se produce con el aparecimiento de un precipitado amarillo debido a la formación de yoduro de plata. También se puede utilizar rodamina que produce una coloración rosada más intensa que el blanco que se obtiene cuando no se utiliza indicador.

Cálculo de la concentración del cianuro en ppm

La reacción que se produce en la titulación es:





La estequiometria de la reacción anterior, indica que 169,87 g de AgNO_3 consumen 98 g de NaCN. Para 1 litro (1000 mL) de solución de AgNO_3 donde existen 0,433 g de AgNO_3 que reaccionarán con 0,25 g de NaCN, por tanto se tiene que: 1 mL de solución titulante consumirá 0,00025 g de NaCN.

Para determinar la concentración de cianuro en la muestra se aplica la siguiente fórmula basada en igualar los gramos de cianuro presentes y los que reaccionan:

$$C_x * V_a = C * V_g \quad [\text{III.4}]$$

Donde:

Cx: concentración desconocida (en g NaCN / L)

Va: volumen de alícuota

Vg: volumen gastado de solución titulante de AgNO_3

C es un factor que representa los gramos de cianuro de sodio que reaccionan con 1 litro de la solución titulante, en este caso es igual a:

$$C = 0,25 \frac{\text{g NaCN}}{\text{L sol. AgNO}_3}$$

Si se mantienen las misma unidades para el volumen, se puede utilizar directamente este valor en la ecuación y así obtener directamente la concentración de cianuro de sodio en g /L. Si lo que se busca es la concentración de cianuro, a este resultado se lo deberá multiplicar por 530.

EJEMPLO DE CÁLCULO

Datos:

Volumen de alícuota: 10 mL

Volumen de solución gastado: 0,8 mL

$$C_x = C * \frac{V_g}{V_a} = 0,25 * \frac{0,8}{10} = 0,02 \frac{\text{g NaCN}}{\text{L}}$$

$$0,02 \frac{\text{g NaCN}}{\text{L}} * \frac{530 \text{ mg CN}^-}{\text{g NaCN}} = 10,6 \frac{\text{mg CN}^-}{\text{L}}$$

ANEXO IV

CÁLCULO DEL CONTENIDO METÁLICO DEL CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE ABSORCIÓN ATÓMICA DE LAS SOLUCIONES DE DISGREGACIÓN ÁCIDA DE LAS MUESTRAS CALCINADAS

EJEMPLO DE CÁLCULO

Datos:

Peso exacto de muestra inicial de carbón: 5,0025 g C.A.I. $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Peso de muestra al final de la calcinación: 3,2971 g de muestra calcinada (m. cal.)

Peso de muestra al que se le aplica la disgregación ácida: 0,1008 g m. cal.

Volumen de la solución de disgregación: 100 mL

Lectura de A.A.: 6,67 mg/L

Las soluciones obtenidas luego de la disgregación ácida tienen un volumen de 100 mL y en cada una se disgregaron aproximadamente 0,1 gramos de muestra.

El primer cálculo consiste en determinar los miligramos de metal presentes en la muestra y se consigue multiplicando el volumen de la solución de disgregación (100 mL = 0,1 L) por la concentración de metal obtenida por absorción atómica.

$$6,67 \frac{\text{mg Cu}}{\text{L}} * 0,1\text{L} = 0,667 \text{ mg}$$

Este resultado se relaciona con la cantidad de muestra que fue llevada a disgregación y luego con el peso de muestra luego de la calcinación para determinar la cantidad de metal que estuvo presente en la muestra inicial de aproximadamente 5 g de carbón activado impregnado con cobre en este caso.

$$\frac{0,667 \text{ mg Cu}}{0,1008 \text{ g m. cal.}} * 3,2971 \text{ g m. cal} = 21,82 \text{ mg Cu}$$

Finalmente se divide este resultado para el peso inicial de muestra, se cambia de unidades los miligramos a gramos y se multiplica por 100 para obtener el porcentaje que representa el contenido metálico en el carbón activado.

$$\frac{0,02182 \text{ g Cu}}{5,0025 \text{ g C. A. I.}} = 4,36 * 10^{-3} \frac{\text{g Cu}}{\text{g C. A. I.}}$$

$$4,36 * 10^{-3} * 100 = 0,436\%$$

ANEXO V

CÁLCULO DE LA MASA ELECTRODEPOSITADA TEÓRICA Y LA EFICIENCIA DEL PROCESO

EJEMPLO DE CÁLCULO

Datos:

Tiempo de duración del ensayo: 60 min

Peso inicial del carbón activado: 10,1493 g

Peso inicial del electrodo: 12,5790 g

Peso final del carbón activado (luego del lavado): 13,8603 g

Peso electrodo final: 13,3140 g

Tabla AV.1. Datos de intensidad de corriente para el ensayo de electrodeposición del ejemplo

Tiempo (minutos)	Intensidad (A)
0	4,08
30	4,17
60	4,29

Para obtener la masa de cobre electrodepositada teórica se debe calcular la intensidad media:

$$I_{\text{media}} = \frac{4,08 + 4,17 + 4,29}{3} = 4,18\text{A}$$

Luego con la intensidad media se procede a aplicar la ecuación se procede a aplicar la ley de Faraday mediante la ecuación 1.39 de la siguiente manera:

$$G = \frac{ItM}{Fn} \quad [V.1]$$

$$t = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$$

$$M = 63,55 \text{ (para el cobre)}$$

$$n = 2, \text{ El cambio de valencia es de ion cúprico (+2) a cobre metálico (0)}$$

$$F = 96500 \text{ c}$$

G es la masa electrepositada que se busca.

$$G_{\text{teórico}} = \frac{4,18 * 3600 * 63,55}{96500 * 2} = 4,9549 \text{ g}$$

A continuación se procede a determinar el valor experimental de la masa de cobre electrodepositada durante el ensayo. Se debe considerar que hay electrodeposición tanto en el electrodo metálico (escoba o placa) como en el carbón activado. Por esta razón se restan los valores final e inicial de peso del carbón activado y del electrodo, luego los resultados se suman y se obtiene el valor experimental de la masa de cobre electrodepositada.

$$m_{c.f.} - m_{c.i.} = 13,8603 \text{ g} - 10,1493 \text{ g} = 3,711 \text{ g}$$

$$m_{e.f.} - m_{e.i.} = 13,3140 \text{ g} - 12,5790 \text{ g} = 0,735 \text{ g}$$

$$G_{\text{experimental}} = 3,711 \text{ g} + 0,735 \text{ g} = 4,446 \text{ g}$$

Luego se divide el valor experimental para el teórico y se multiplica por 100 para obtener el porcentaje de eficiencia del proceso de electrodeposición.

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{G_{\text{experimental}}}{G_{\text{teórico}}} * 100 \quad [V.2]$$

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{4,446 \text{ g}}{4,9549 \text{ g}} * 100 = 89,73\%$$

El porcentaje de cobre en el carbón final se obtiene dividiendo la masa de cobre electrodepositada en el carbón únicamente para el peso del carbón final y multiplicando el resultado por 100.

$$\% \text{Cu} = \frac{3,711 \text{ g}}{13,8603 \text{ g}} * 100 = 26,77\%$$

ANEXO VI

FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS

Ficha Técnica Nº 1

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 1,0 g/L

Carbón Activado: 5000 g

Flujo de Aire: 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.1. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 1

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{prom}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,50	237,0	236,5	236,8	531,7	0,00
30	10,60	233,0	234,5	233,8	489,7	7,89
60	10,50	230,7	231,8	231,3	456,7	14,11
90	10,50	225,5	226,4	226,0	392,1	26,26
120	10,50	223,4	221,7	222,6	354,3	33,36
150	10,50	218,6	219,0	218,8	315,8	40,61
180	10,50	216,0	215,6	215,8	287,1	46,00
210	10,45	214,5	215,0	214,8	277,6	47,80
240	10,57	213,0	211,6	212,3	256,1	51,84
270	10,46	208,7	209,6	209,2	230,2	56,71
300	10,58	206,3	209,1	207,7	218,8	58,84
330	10,40	204,5	204,9	204,7	196,6	63,02
360	10,50	202,5	204,4	203,5	187,8	64,68

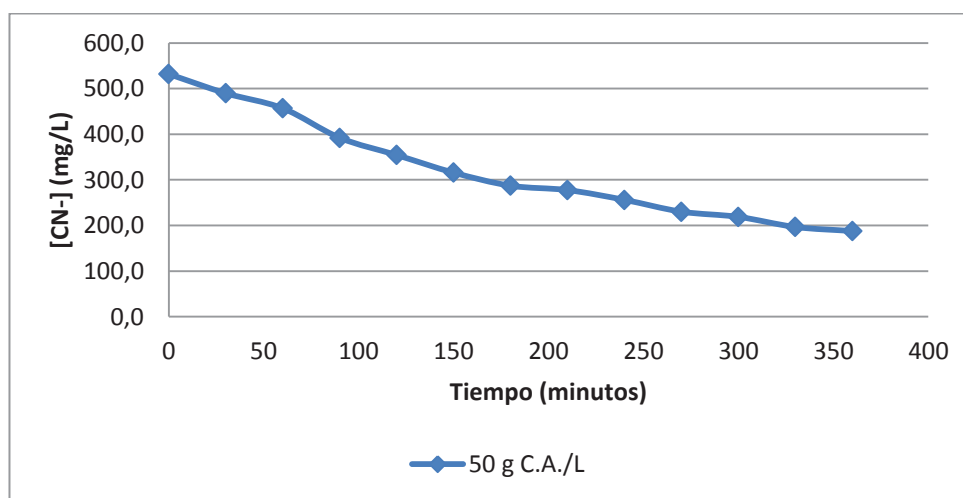


Figura AVI.1. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado por litro de solución

Ficha Técnica N° 2

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 1,0 g/L

Carbón Activado: 8000 g

Flujo de Aire: 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.2. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 2

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{prom}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,50	236,8	236,6	236,7	531,0	0,00
30	10,50	228,0	234,6	231,3	456,9	13,95
60	10,41	229,2	227,6	228,4	421,5	20,62
90	10,50	223,4	222,1	222,8	356,8	32,80
120	10,59	220,2	217,3	218,8	315,3	40,62
150	10,54	211,6	219,2	215,4	283,4	46,63
180	10,67	211,0	213,3	212,2	254,9	51,99
210	10,59	212,6	209,8	211,2	247,1	53,46
240	10,54	208,9	208,3	208,6	225,9	57,46
270	10,50	205,0	205,8	205,4	201,8	61,99
300	10,38	206,1	203,0	204,5	195,4	63,20
330	10,59	200,0	203,1	210,6	175,0	67,05
360	10,50	198,3	202,0	200,2	165,8	68,77

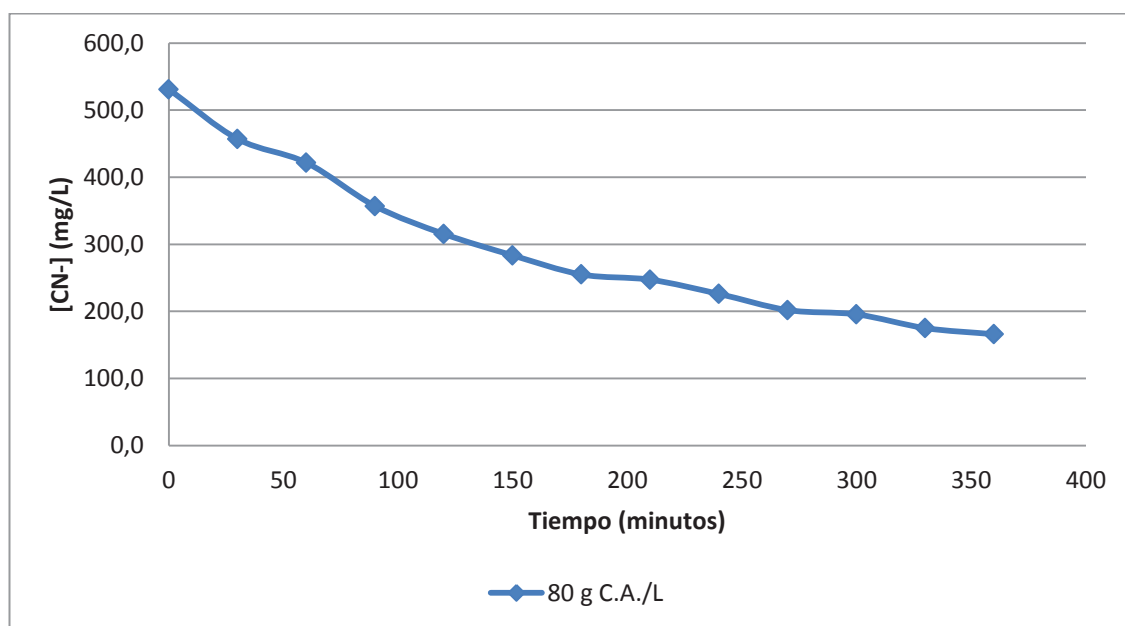


Figura AVI.2. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 80 gramos de carbón activado por litro de solución

Ficha Técnica N° 3

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 1,0 g/L

Sin catalizador

Flujo de Aire: 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.3. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 3

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{prom}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,50	234,0	239,4	236,7	531,0	0,00
30	10,48	236,0	235,4	235,7	516,7	2,70
60	10,46	237,1	233,0	235,0	507,6	4,40
90	10,50	235,1	234,4	234,7	503,4	5,20
120	10,50	236,8	232,3	234,6	500,7	5,70
150	10,52	234,9	233,6	234,2	496,5	6,50
180	10,47	231,9	235,9	233,9	491,2	7,50
210	10,46	230,7	236,2	233,5	485,9	8,50
240	10,50	234,9	231,4	233,1	481,1	9,40
270	10,51	234,4	231,3	232,8	477,4	10,10
300	10,50	234,4	230,9	232,6	474,7	10,60
330	10,45	235,1	230,0	232,6	473,7	10,80
360	10,50	230,4	234,6	232,5	473,1	10,90

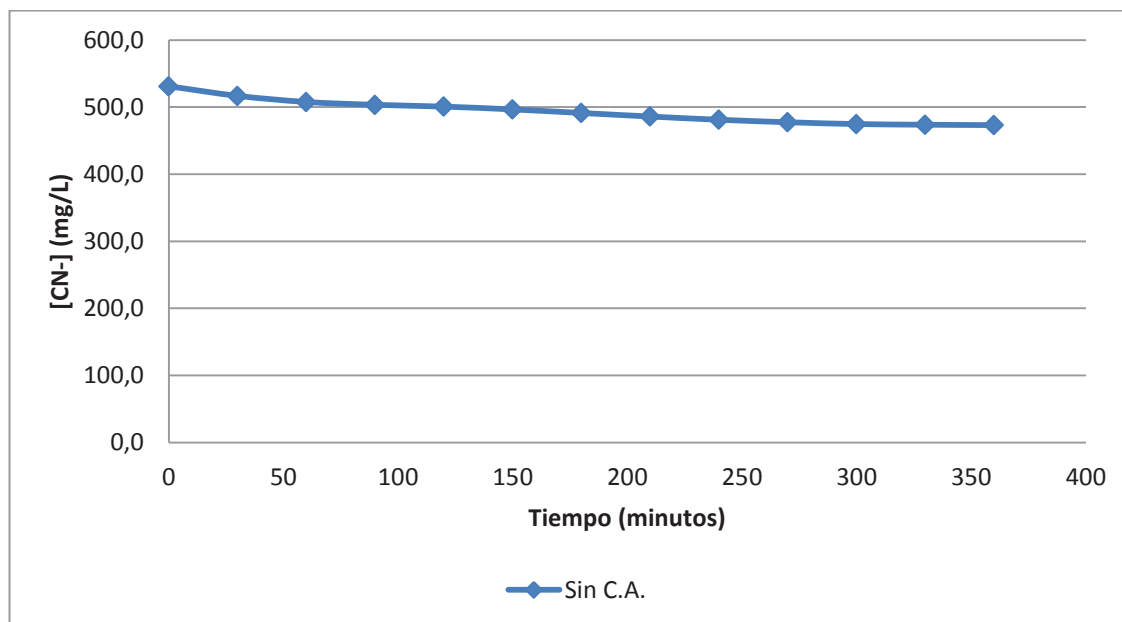


Figura AVI.3. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, sin emplear ningún tipo de carbón activado, únicamente aire

Ficha Técnica N° 4

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 5000 g

Flujo de Aire: 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.4. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 4

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{prom}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,50	213,0	213,6	213,3	264,7	0,00
30	10,40	211,7	210,6	211,2	246,4	6,92
60	10,52	208,0	208,4	208,2	222,7	15,87
90	10,50	207,0	207,5	207,3	215,4	18,63
120	10,45	206,6	206,1	206,4	208,6	21,18
150	10,50	205,0	204,7	204,9	197,7	25,32
180	10,51	203,7	203,6	203,7	189,2	28,53
210	10,55	202,8	202,8	202,8	183,3	30,75
240	10,57	200,9	200,5	200,7	169,3	36,04
270	10,47	200,3	199,8	200,1	165,1	37,63
300	10,50	199,3	199,2	199,3	160,0	39,54
330	10,45	198,0	198,3	198,2	153,2	42,12
360	10,50	196,5	197,0	196,8	144,8	45,30

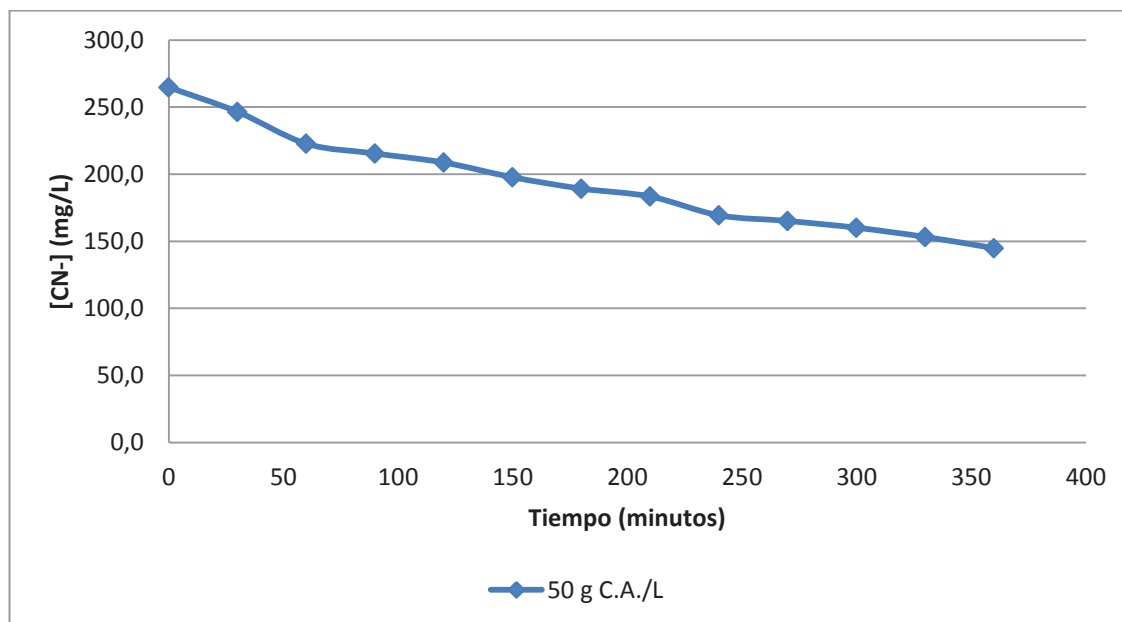


Figura AVI.4. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado por litro de solución

Ficha Técnica N° 5

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 8000 g

Aire: Flujo de 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.5. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 5

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{prom}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,50	213,8	212,8	213,3	264,7	0,00
30	10,44	207,2	212,8	210,0	236,6	10,63
60	10,53	205,7	207,9	206,8	211,6	20,05
90	10,50	204,3	207,1	205,7	203,5	23,13
120	10,45	206,7	201,5	204,1	192,0	27,47
150	10,50	205,1	200,7	202,9	184,0	30,49
180	10,56	205,4	198,8	202,1	178,6	32,54
210	10,55	201,9	199,7	200,8	170,0	35,80
240	10,57	201,7	197,5	199,6	162,2	38,71
270	10,47	196,6	200,0	198,3	154,1	41,77
300	10,51	200,8	195,2	198,0	152,0	42,58
330	10,48	193,1	196,7	194,9	134,1	49,34
360	10,50	192,5	194,5	193,5	126,1	52,38

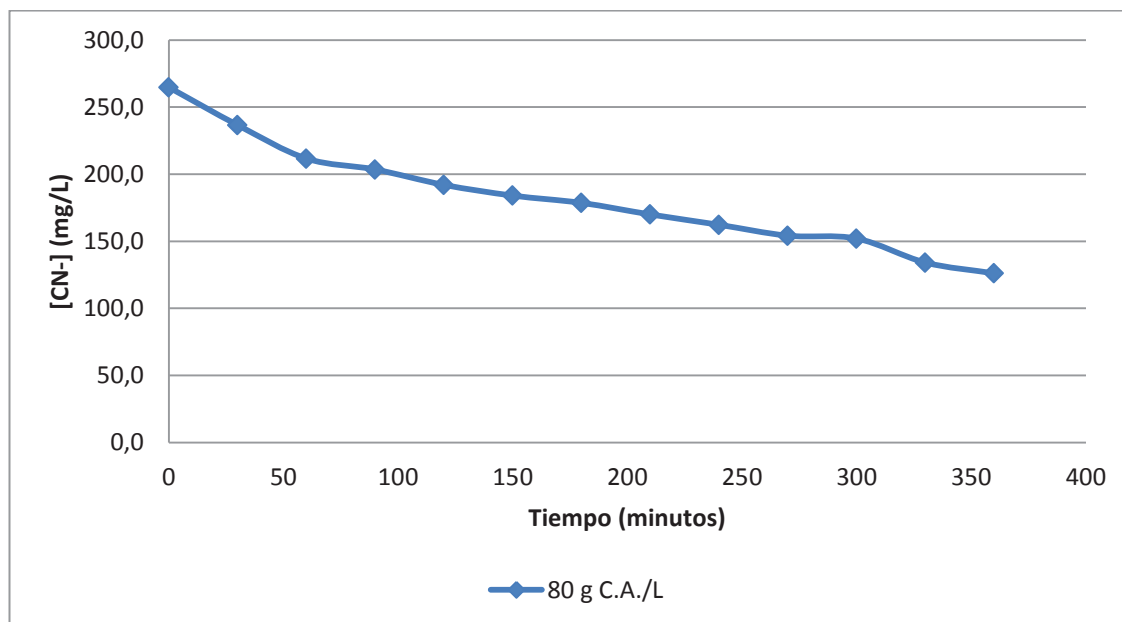


Figura AVI.5. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 80 gramos de carbón activado por litro de solución

Ficha Técnica N° 6

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Sin catalizador

Aire: Flujo de 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.6. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 6

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{prom}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,50	213,5	213,1	213,3	265,0	0,00
30	10,44	212,1	213,7	212,9	261,2	1,43
60	10,53	213,1	212,7	212,9	261,2	1,43
90	10,50	212,7	212,9	212,8	260,4	1,74
120	10,45	214,5	210,7	212,6	258,7	2,38
150	10,50	215,7	209,1	212,4	256,9	3,06
180	10,56	211,5	212,7	212,1	254,4	4,00
210	10,55	210,4	213,6	212,0	253,5	4,34
240	10,57	212,4	211,2	211,8	251,8	4,98
270	10,47	211,2	211,6	211,4	248,5	6,23
300	10,51	210,8	212,0	211,4	248,5	6,23
330	10,48	210,7	211,1	210,9	244,3	7,81
360	10,50	211,0	210,6	210,8	243,5	8,11

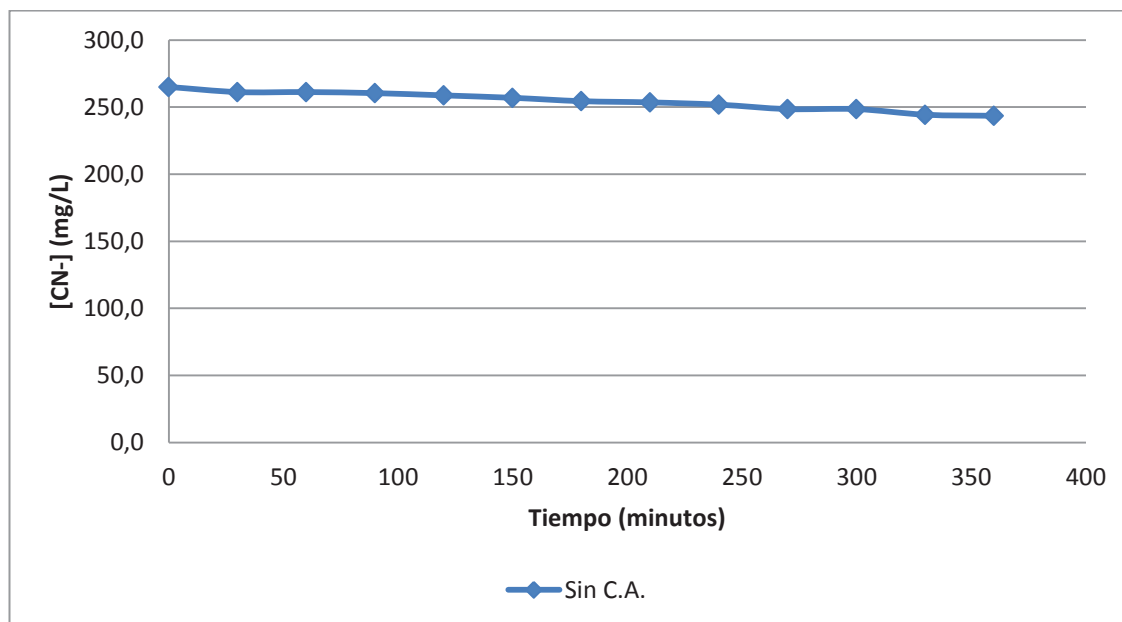


Figura AVI.6. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, sin emplear ningún tipo de carbón activado, únicamente aire

Ficha Técnica N° 7

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 1,0 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$: 5000 g

Aire: Flujo de 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.7. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 7

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{\text{prom}}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,49	236,5	236,8	236,7	530,3	0,00
30	10,49	214,1	213,8	214,0	270,4	49,00
60	10,60	197,8	198,6	198,2	153,5	71,05
90	10,50	190,6	191,1	190,9	112,4	78,81
120	10,50	185,7	187,3	186,5	91,3	82,78
150	10,50	183,4	183,9	183,7	78,8	85,14
180	10,51	181,9	182,5	182,2	72,8	86,28
210	10,58	179,6	180,7	180,2	64,6	87,82
240	10,56	178,2	178,8	178,5	58,4	88,99
270	10,52	177,3	177,4	177,4	54,2	89,78
300	10,50	176,5	176,3	176,4	50,8	90,42
330	10,62	174,0	174,4	174,2	43,4	91,82
360	10,59	172,5	173,8	173,2	40,0	92,46

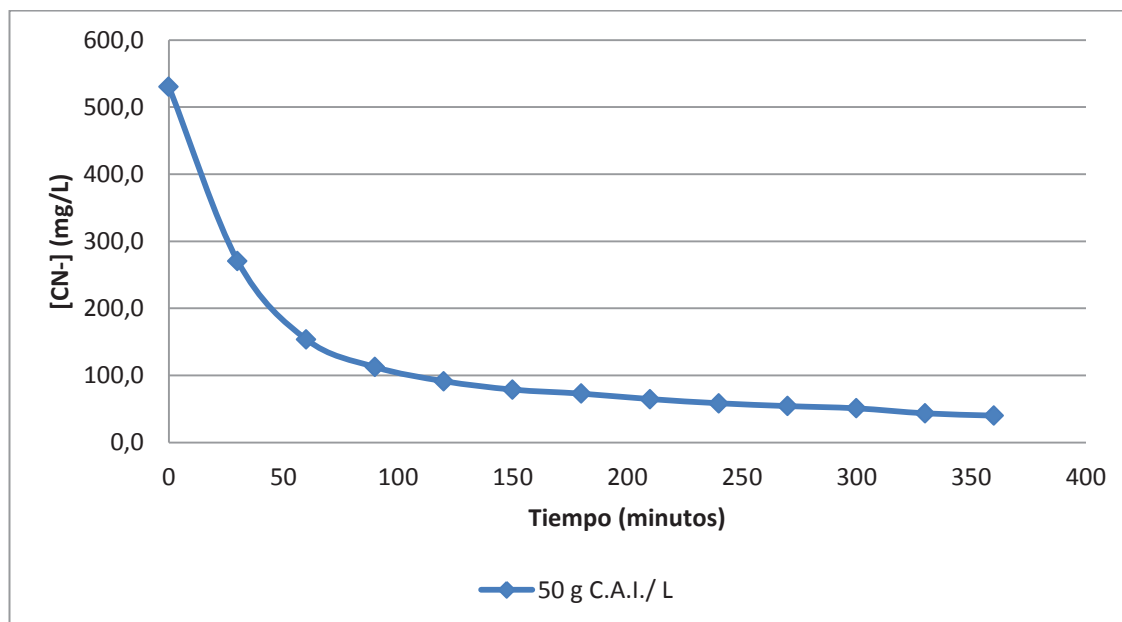


Figura AVI.7. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de solución

Ficha Técnica N° 8

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 1,0 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$: 8000 g

Aire: Flujo de 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.8. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 8

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{\text{prom}}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,53	235,1	238,2	236,7	531,0	0,00
30	10,47	202,2	204,2	203,2	186,1	64,96
60	10,41	188,6	184,8	186,7	92,2	82,63
90	10,35	179,7	181,5	180,6	66,4	87,50
120	10,40	174,7	179,1	176,9	52,6	90,10
150	10,34	173,5	175,9	174,7	45,0	91,52
180	10,28	173,5	173,7	173,6	41,4	92,20
210	10,61	170,9	172,5	171,7	35,4	93,33
240	10,39	170,3	170,7	170,5	31,8	94,01
270	10,60	169,5	169,9	169,7	29,5	94,45
300	10,48	168,9	169,7	169,3	28,3	94,67
330	10,57	168,8	168,8	168,8	26,9	94,93
360	10,43	168,7	168,7	168,7	26,6	94,99

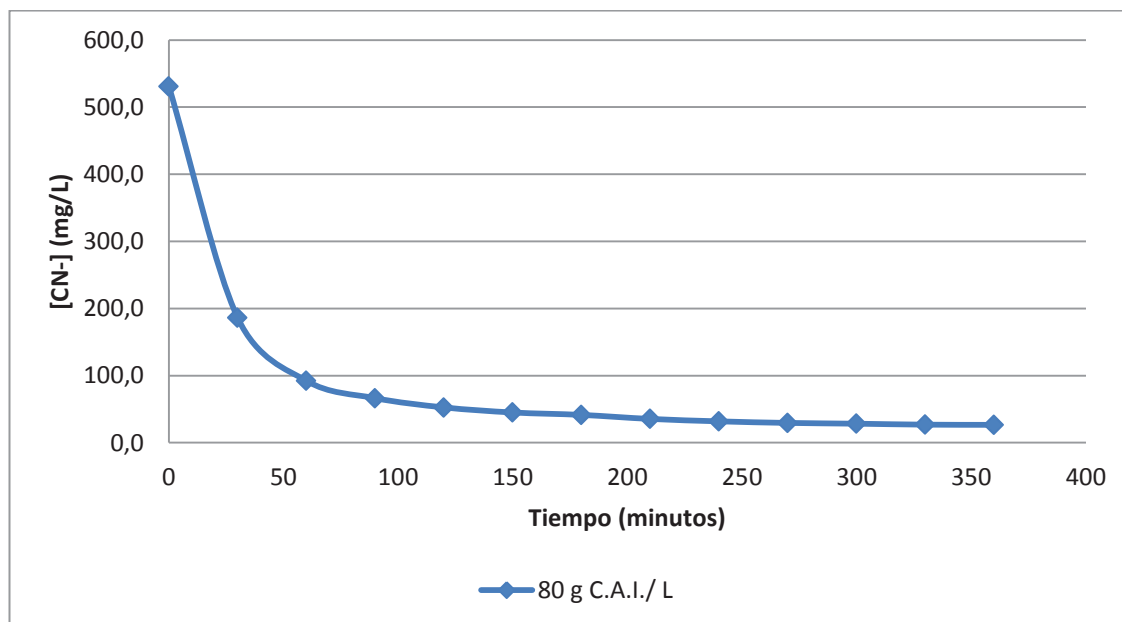


Figura AVI.8. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 80 gramos de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de solución

Ficha Técnica N° 9

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$: 5000 g

Aire: Flujo de 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.9. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 9

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{\text{prom}}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,56	215,0	213,0	214,0	279,5	0,00
30	10,42	202,6	202,6	202,6	201,1	28,03
60	10,55	190,5	192,7	191,6	143,4	48,70
90	10,45	183,6	185,0	184,3	113,7	59,32
120	10,62	180,4	178,6	179,5	97,0	65,30
150	10,59	173,0	173,0	173,0	77,5	72,25
180	10,61	165,5	166,5	166,0	60,5	78,34
210	10,61	161,3	160,5	160,9	50,2	82,05
240	10,42	158,8	157,8	158,3	45,4	83,75
270	10,60	152,6	153,0	152,8	36,7	86,87
300	10,59	148,7	150,7	149,7	32,5	88,38
330	10,57	148,0	148,8	148,4	30,7	89,01
360	10,54	147,2	147,8	147,5	29,7	89,37

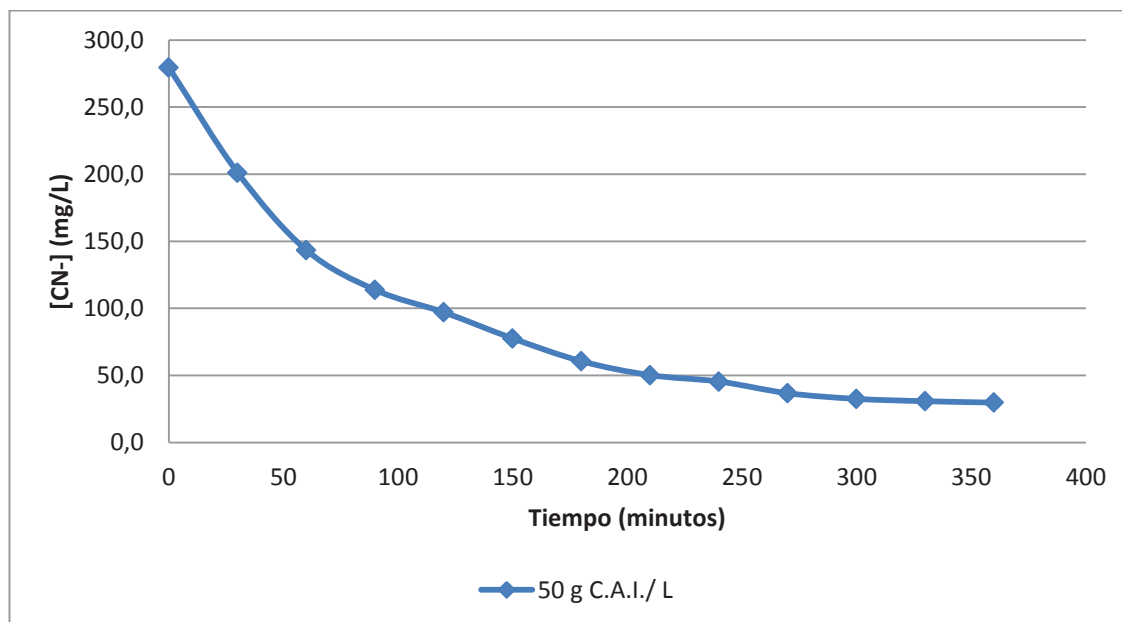


Figura AVI.9. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de reacción, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de solución

Ficha Técnica N° 10

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$: 8000 g

Aire: Flujo de 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.10. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 10

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{\text{prom}}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,50	212,4	214,3	213,4	265,1	0,00
30	10,39	202,0	202,1	202,1	178,2	32,78
60	10,53	192,9	191,7	192,3	119,9	54,78
90	10,55	186,5	185,5	186,0	89,1	66,41
120	10,60	181,2	182,4	181,8	71,1	73,17
150	10,53	177,0	177,9	177,5	54,5	79,43
180	10,38	172,6	174,0	173,3	40,4	84,74
210	10,63	169,9	171,7	170,8	32,7	87,66
240	10,43	168,6	169,6	169,1	27,7	89,54
270	10,57	167,8	166,6	167,2	22,5	91,52
300	10,53	166,1	166,3	166,2	19,8	92,52
330	10,50	165,2	165,6	165,4	17,7	93,31
360	10,50	165,0	165,2	165,1	17,0	93,59

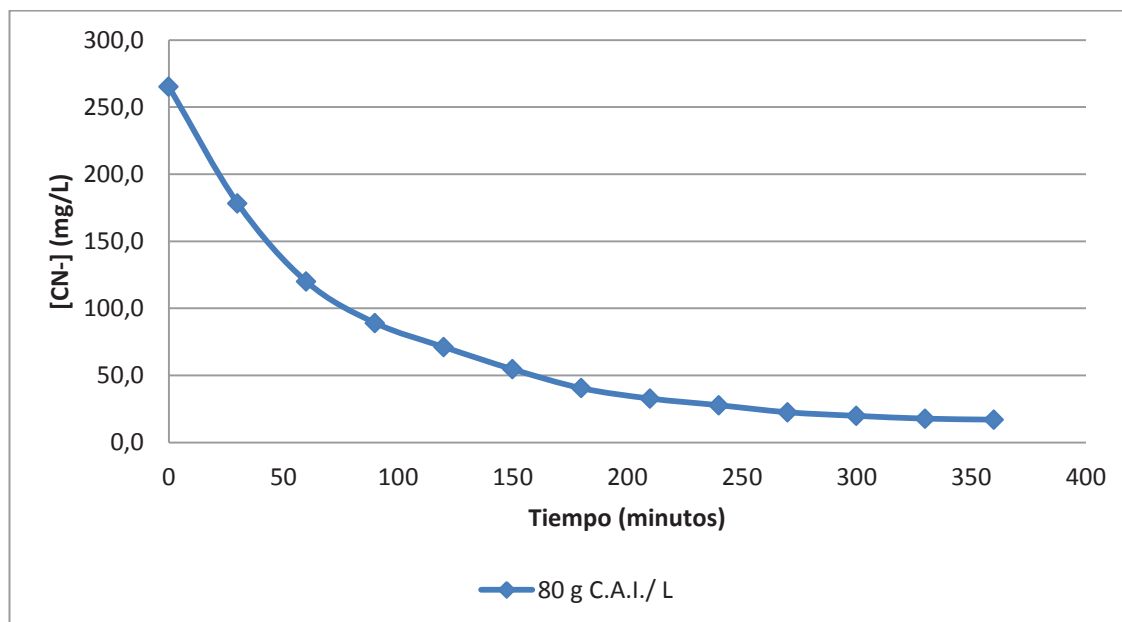


Figura AVI.10. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de reacción, empleando 80 gramos de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de solución

Ficha Técnica N° 11

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$: 5000 g, 2do uso.

Aire: Flujo de 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.11. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 11

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{\text{prom}}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,50	213,7	213,0	213,4	265,1	0,00
30	10,53	209,3	209,5	209,4	232,2	12,44
60	10,47	205,5	207,6	206,6	210,1	20,75
90	10,60	200,2	201,5	200,9	170,3	35,78
120	10,47	196,4	199,0	197,7	150,5	43,25
150	10,65	194,8	195,1	195,0	134,4	49,32
180	10,55	193,1	193,8	193,5	126,1	52,46
210	10,45	191,3	192,0	191,7	116,5	56,07
240	10,48	190,5	191,0	190,8	111,8	57,82
270	10,58	187,8	188,2	188,0	98,3	62,92
300	10,48	187,3	186,0	186,7	92,0	65,30
330	10,49	186,0	185,8	185,9	88,6	66,58
360	10,49	185,2	184,0	184,6	82,9	68,75

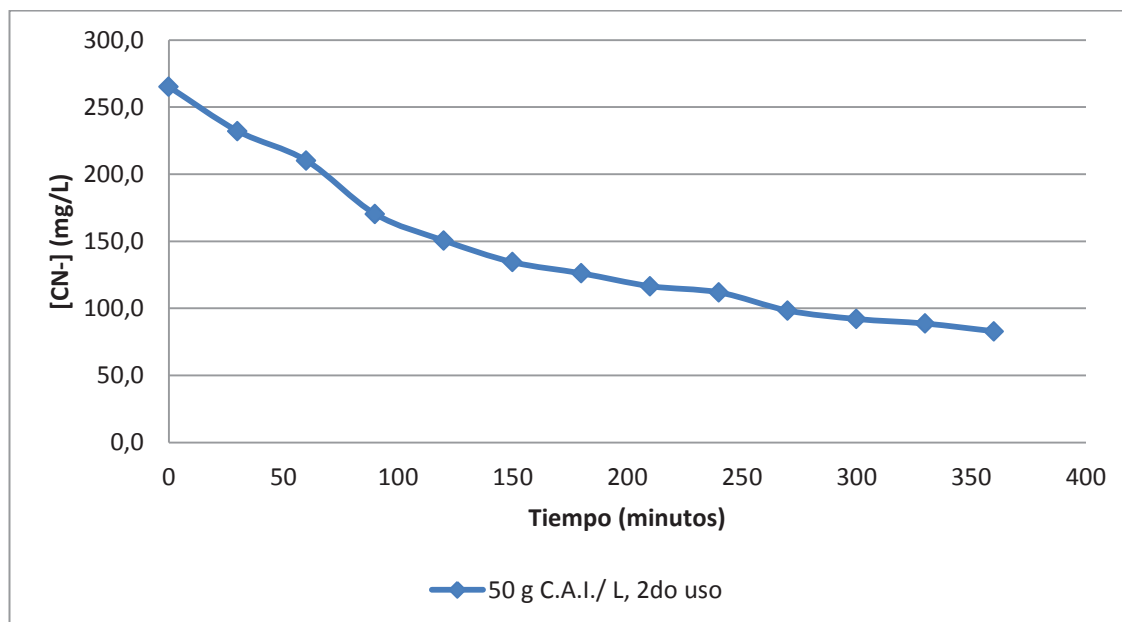


Figura AVI.11. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de reacción, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de solución, 2do uso

Ficha Técnica N° 12

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$: 5000 g, 3er uso.

Flujo de Aire: 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.12. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 12

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{\text{prom}}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,51	213,7	213,0	213,4	265,1	0,00
30	10,43	210,7	210,6	210,7	242,3	8,63
60	10,37	208,0	208,4	208,2	222,7	16,01
90	10,55	204,3	204,8	204,6	195,5	26,25
120	10,52	200,9	200,6	200,8	169,6	36,02
150	10,41	199,0	199,0	199,0	158,5	40,23
180	10,47	197,3	196,7	197,0	146,3	44,83
210	10,46	195,7	196,0	195,9	139,5	47,37
240	10,54	194,3	194,6	194,5	131,6	50,37
270	10,55	192,1	192,8	192,5	120,7	54,48
300	10,49	190,2	190,8	190,5	110,6	58,30
330	10,52	189,6	189,5	189,6	105,8	60,09
360	10,50	188,5	189,0	188,8	101,9	61,56

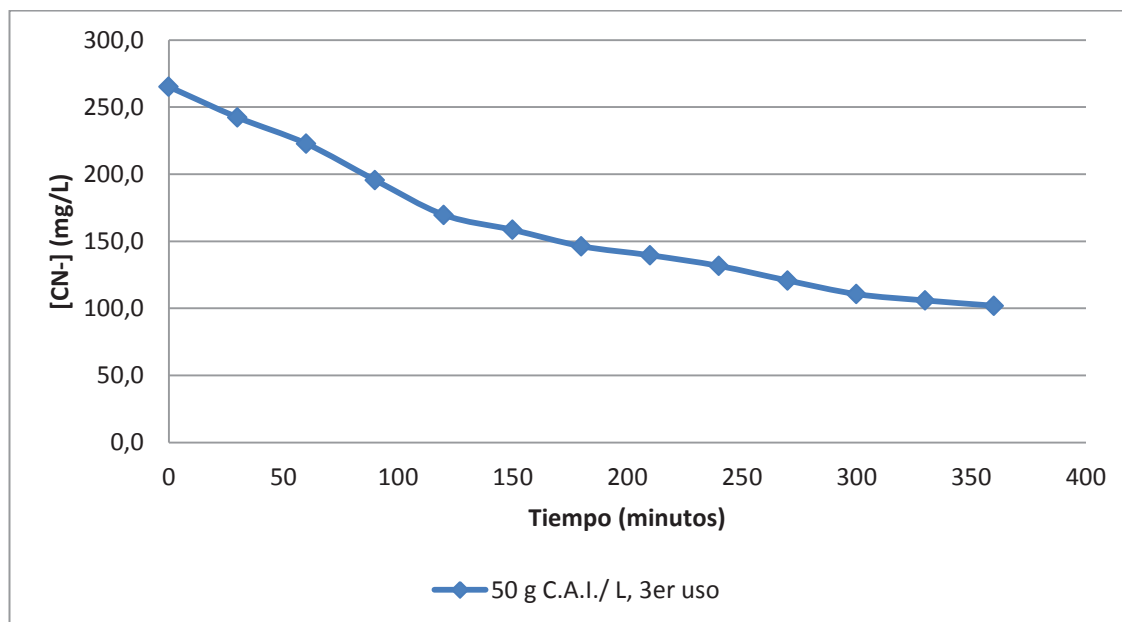


Figura AVI.12. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de reacción, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de solución, 3er uso

Ficha Técnica N° 13

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con AgNO₃: 5000 g, 1er uso.

Flujo de Aire: 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.13. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 13

Tiempo min.	pH	-ΔV ₁ (mV)	-ΔV ₂ (mV)	-ΔV _{prom} (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,51	213,7	215,0	214,4	282,2	0,00
30	10,55	200,4	200,8	200,6	189,3	32,94
60	10,24	196,0	195,3	195,7	162,8	42,32
90	10,28	191,5	193,0	192,3	146,5	48,10
120	10,54	188,2	187,8	188,0	128,0	54,64
150	10,27	186,6	185,9	186,3	121,0	57,13
180	10,65	199,5	198,3	198,9	119,9	57,53
210	10,55	198,0	199,3	198,7	119,0	57,85
240	10,31	185,5	183,1	184,3	113,5	59,77
270	10,42	183,0	182,2	182,6	107,4	61,95
300	10,47	182,0	181,6	181,8	104,6	62,95
330	10,47	180,6	181,0	180,8	101,2	64,16
360	11,51	179,2	179,7	179,5	96,7	65,74

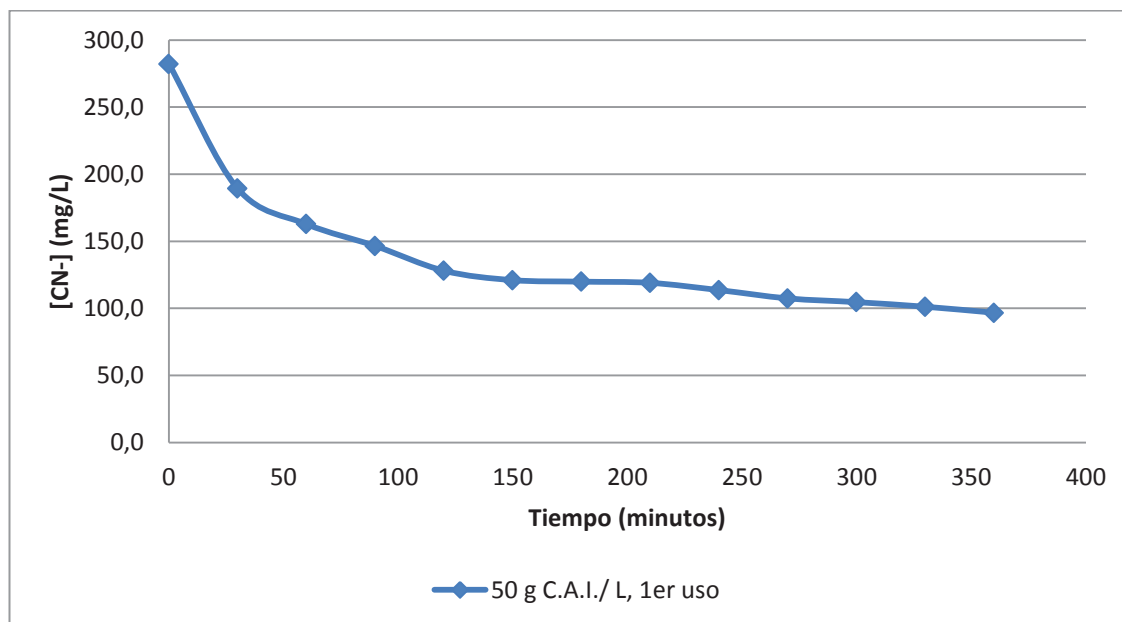


Figura AVI.13. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de reacción, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato de plata por litro de solución, 1er uso

Ficha Técnica N° 14

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con AgNO₃: 5000 g, 2do uso.

Flujo de Aire: 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.14. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 14

Tiempo min.	pH	-ΔV ₁ (mV)	-ΔV ₂ (mV)	-ΔV _{prom} (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,55	212,1	212,3	212,2	265,6	0,00
30	10,48	206,5	206,0	206,3	223,7	15,75
60	10,38	201,0	201,4	201,2	192,7	27,45
90	10,53	198,0	198,6	198,3	176,5	33,53
120	10,54	196,5	197,0	196,8	168,4	36,60
150	10,48	194,8	195,2	195,0	159,6	39,92
180	10,40	207,3	207,7	207,5	154,7	41,75
210	10,52	206,5	206,9	206,7	151,1	43,09
240	10,54	192,1	192,4	192,3	146,5	44,85
270	10,54	190,3	190,8	190,6	138,8	47,73
300	10,45	189,0	189,6	189,3	133,4	49,76
330	10,55	188,3	188,3	188,3	129,2	51,34
360	10,53	187,0	186,7	186,9	123,4	53,55

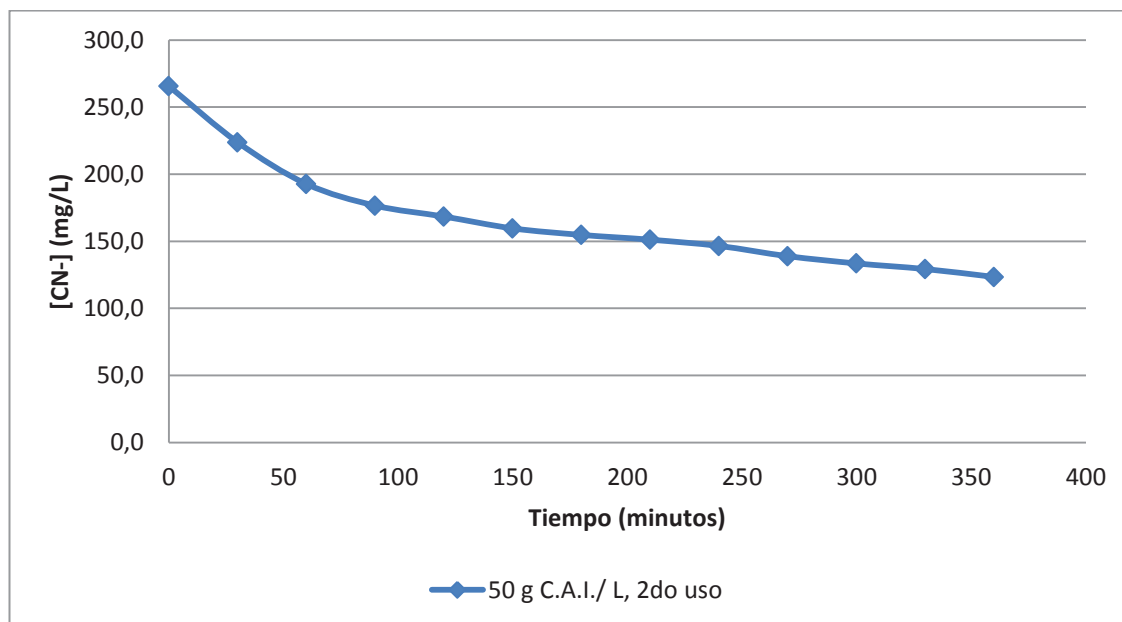


Figura AVI.14. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de reacción, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato de plata por litro de solución, 2do uso

Ficha Técnica N° 15

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con AgNO₃: 5000 g, 3er uso.

Flujo de Aire: 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.15. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 15

Tiempo min.	pH	-ΔV ₁ (mV)	-ΔV ₂ (mV)	-ΔV _{prom} (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,52	211,8	212,5	212,2	265,2	0,00
30	10,46	208,8	208,3	208,6	239,2	9,80
60	10,47	206,0	204,5	205,3	217,3	18,06
90	10,40	202,7	203,7	203,2	204,5	22,89
120	10,52	201,6	202,0	201,8	196,2	26,02
150	10,48	201,1	200,5	200,8	190,4	28,21
180	10,38	199,9	200,2	200,1	186,1	29,83
210	10,54	197,6	198,6	198,1	175,5	33,82
240	10,52	197,9	196,9	197,4	171,8	35,22
270	10,37	196,3	196,7	196,5	167,1	36,99
300	10,35	195,2	195,7	195,5	161,8	38,99
330	10,42	194,9	195,3	195,1	160,1	39,63
360	10,48	194,3	195,2	194,8	158,3	40,31

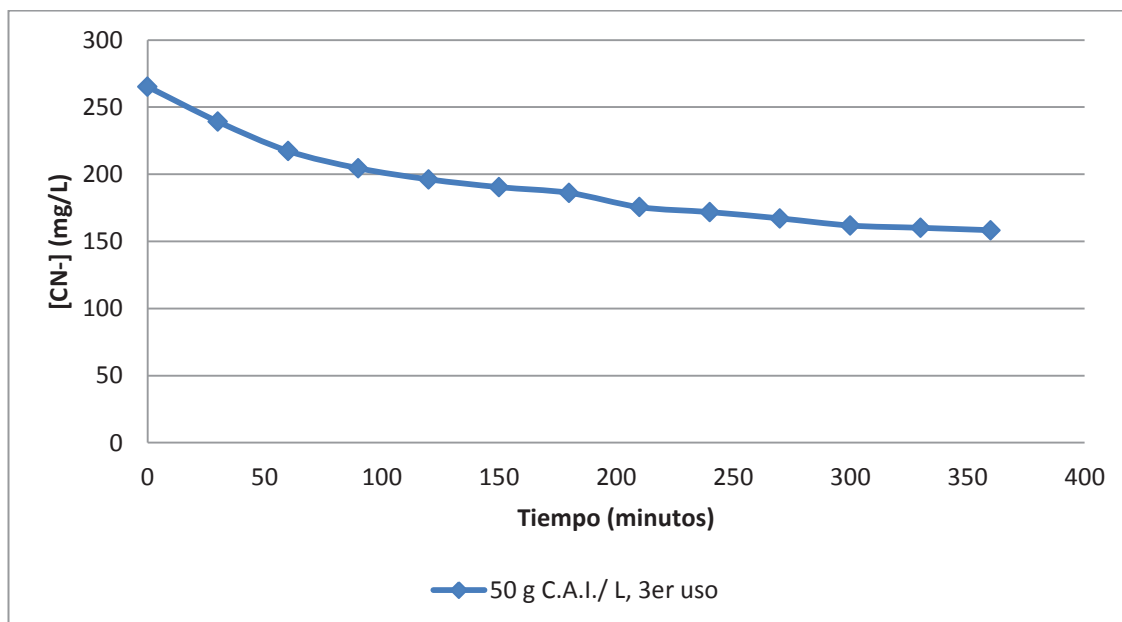


Figura AVI.15. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de reacción, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato de plata por litro de solución, 3er uso

Ficha Técnica N° 16

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de efluente real de cianuración de pulpa de un mineral
 Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$: 5000 g

Flujo de Aire: 9500 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.16. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 16

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{\text{prom}}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,57	215,3	215,7	215,5	291,5	0,00
30	10,55	194,2	195,6	194,9	159,1	45,42
60	10,44	182,7	183,3	183,0	108,8	62,68
90	10,37	178,0	178,4	178,2	92,7	68,20
120	10,65	173,5	174,3	173,9	80,0	72,56
150	10,60	170,2	171,6	170,9	72,0	75,30
180	10,54	169,5	168,6	169,1	67,5	76,84
210	10,31	167,3	167,0	167,2	63,0	78,39
240	10,62	166,0	165,8	165,9	60,2	79,35
270	10,58	164,6	164,2	164,4	57,0	80,45
300	10,47	163,7	164,1	163,9	56,0	80,79
360	10,45	161,9	161,6	161,8	51,7	82,26

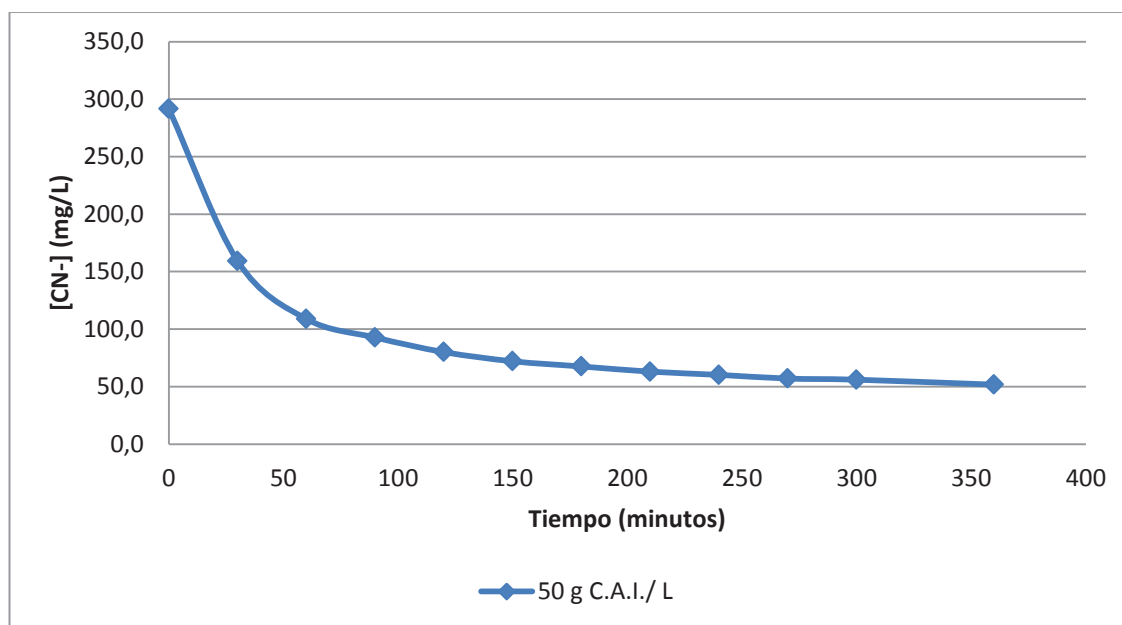


Figura AVI.16. Representación de la concentración de cianuro libre versus tiempo de reacción, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de efluente real

Ficha Técnica N° 17

Parámetros

Tanque: 100 L de solución de efluente real de cianuración de pulpa de un mineral
 Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$: 5000 g
 Flujo de Aire: 9500 L/h
 pH: 10,5

Tabla AVI.17. Datos de potencial y concentración de cianuro para el ensayo 17

Tiempo min.	pH	$-\Delta V_1$ (mV)	$-\Delta V_2$ (mV)	$-\Delta V_{\text{prom}}$ (mV)	[CN ⁻] mg/L	Oxidación %
0	10,45	162,0	161,0	161,5	51,2	0,00
30	10,44	145,8	144,8	145,3	27,1	47,12
60	10,42	127,2	126,6	126,9	12,0	76,62
90	10,41	119,0	118,4	118,7	8,0	84,37
120	10,35	113,6	112,8	113,2	6,0	88,26
150	10,35	108,7	107,9	108,3	4,6	91,01
180	10,34	100,1	101,7	100,9	3,0	94,13
210	10,30	93,3	92,1	92,7	1,8	96,48
240	10,60	85,1	83,1	84,1	1,0	98,04
270	10,57	75,6	74,2	74,9	0,5	99,03
300	10,52	65,0	63,8	64,4	0,2	99,61
330	10,50	46,4	46,0	46,2	0,0	99,95
360	10,50	35,2	33,0	34,1	0,0	99,99

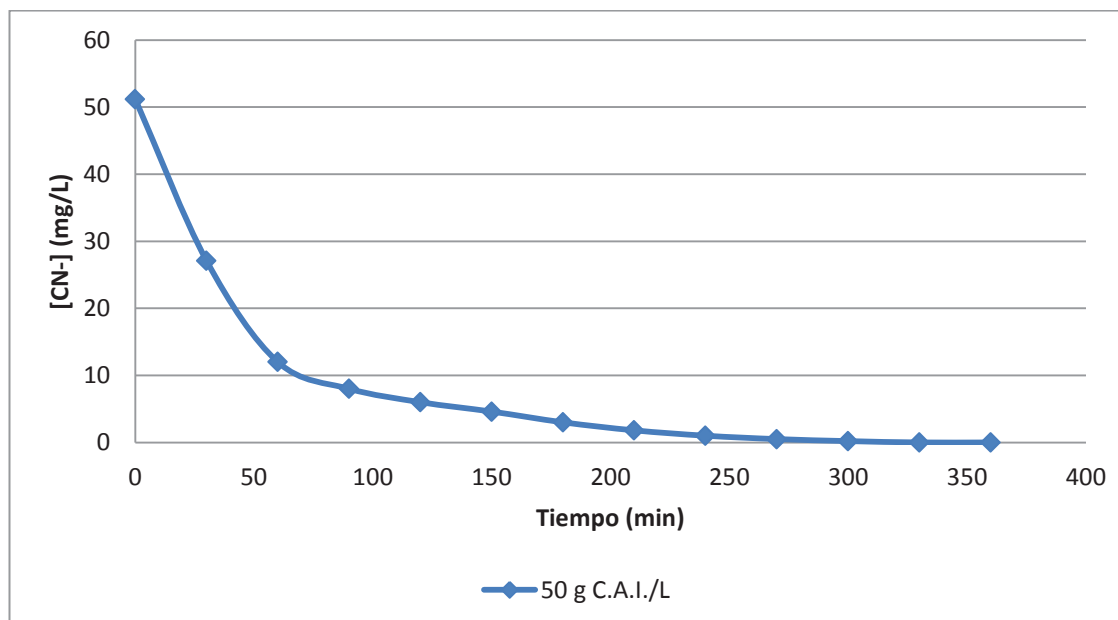


Figura AVI.17. Representación de la concentración de cianuro libre versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de efluente real. Continuación de la oxidación del efluente final usado en el ensayo 16

Ficha Técnica N° 18

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo escoba

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.18. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°1

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
0,25	10,0702	10,1757	3,6340	3,6648	0	0,21
					5	0,22
					10	0,23
0,50	10,0252	10,2526	3,7320	3,7888	0	0,39
					15	0,42
					30	0,45
1,00	10,0223	10,5614	3,6513	3,8310	0	0,88
					30	0,95
					60	0,99

Ficha Técnica N° 19

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo escoba

Distancia entre electrodos: 10 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.19. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°2

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
0,25	10,0681	10,0966	3,6015	3,6107	0	0,08
					5	0,10
					10	0,10
0,50	10,0195	10,0993	3,6394	3,6569	0	0,17
					15	0,20
					30	0,21
1,00	10,0953	10,2195	3,7236	3,7682	0	0,25
					30	0,27
					60	0,27

Ficha Técnica N° 20

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo escoba

Voltaje nominal aplicado: 1,00 V

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tabla AVI.20. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 3

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
1,00	10,1246	10,2149	3,6423	3,6576	0	0,94
					5	1,02
					10	1,10
1,00	9,9537	10,2618	3,6531	3,6713	0	0,90
					15	0,99
					30	1,02
1,00	10,0223	10,4915	3,7004	3,4958	0	0,88
					30	0,91
					60	1,06

Ficha Técnica N° 21

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo escoba

Voltaje nominal aplicado: 1,35 V

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tabla AVI.21. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 4

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
1,35	10,0717	10,1843	3,7502	3,7636	0	1,15
					5	1,18
					10	1,21
1,35	10,0921	10,5215	3,7653	3,7982	0	1,21
					15	1,25
					30	1,32
1,35	10,0034	10,6849	3,8060	3,5415	0	1,18
					30	1,25
					60	1,29

Ficha Técnica N° 22

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo escoba

Voltaje nominal aplicado: 1,55 V

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tabla AVI.22. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 5

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
1,55	10,0526	10,2087	3,5741	3,5079	0	1,36
					5	1,47
					10	1,58
1,55	10,0815	10,5893	3,5092	3,2274	0	1,31
					15	1,46
					30	1,55
1,55	10,0179	10,8674	3,2286	2,8215	0	1,37
					30	1,50
					60	1,66

Ficha Técnica N° 23

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo escoba

Voltaje nominal aplicado: 2,00 V

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tabla AVI.23. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 6

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
2,00	10,0424	10,2194	3,3911	3,3016	0	1,82
					5	1,94
					10	2,00
2,00	10,0310	10,8415	3,3024	2,9032	0	1,81
					15	1,90
					30	1,99
2,00	10,0478	11,5083	2,9052	2,1903	0	1,80
					30	1,97
					60	2,05

Ficha Técnica N° 24

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 10 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.24. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 7

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
1,00	10,0156	11,0518	12,4745	12,5008	0	1,09
					30	1,15
					60	1,24
1,25	10,0219	11,0764	13,2155	13,4783	0	1,24
					30	1,35
					60	1,35
1,45	10,0048	11,2212	10,2301	10,4241	0	1,35
					30	1,40
					60	1,46

Ficha Técnica N° 25

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 10 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.25. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 8

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
1,50	10,0248	11,3855	12,4889	12,6596	0	1,44
					30	1,46
					60	1,48
1,75	10,0669	11,4488	13,1891	13,2467	0	1,48
					30	1,52
					60	1,56
2,00	10,0861	11,6702	10,2263	10,2908	0	1,60
					30	1,63
					60	1,75

Ficha Técnica N° 26

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 10 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.26. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 9

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
2,25	10,1123	11,8147	12,4898	12,5159	0	1,69
					30	1,75
					60	1,80
2,50	10,0229	11,8873	13,2321	13,3032	0	1,76
					30	1,90
					60	1,98
3,00	10,1484	12,1032	12,4730	12,5443	0	2,02
					30	2,10
					60	2,15

Ficha Técnica N° 27

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 10 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.27. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N°

10

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
3,50	10,0554	12,3105	10,2304	10,3185	0	2,20
					30	2,29
					60	2,35
4,00	10,1547	12,6724	13,1822	13,2735	0	2,35
					30	2,36
					60	2,49
4,50	10,0930	12,4389	10,2624	10,7244	0	2,65
					30	2,68
					60	2,77

Ficha Técnica N° 28

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.28. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 11

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
1,00	10,2572	11,3473	12,4809	12,5159	0	1,21
					30	1,25
					60	1,26
1,25	10,1068	11,4416	10,2255	10,2870	0	1,39
					30	1,43
					60	1,47
1,50	10,1528	11,8301	12,4880	12,5451	0	1,65
					30	1,67
					60	1,75

Ficha Técnica N° 29

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.29. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 12

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
1,75	10,1418	12,1269	12,4907	12,5532	0	1,89
					30	2,09
					60	2,03
2,00	10,0589	12,0577	13,1862	13,2714	0	2,12
					30	2,22
					60	2,26
2,25	10,0171	12,1919	10,2244	10,7244	0	2,36
					30	2,48
					60	2,54

Ficha Técnica N° 30

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.30. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 13

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
2,25	10,0977	12,8255	13,1874	13,2623	0	2,40
					30	2,57
					60	2,65
2,75	10,0125	12,9768	10,2244	10,4602	0	2,79
					30	2,98
					60	3,02
2,75	10,0247	13,2246	12,4905	12,5243	0	2,90
					30	2,97
					60	3,04

Ficha Técnica N° 31

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.31. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 14

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
3,20	10,0351	13,1822	12,4829	12,8571	0	3,28
					30	3,35
					60	3,45
3,25	10,1483	13,3207	13,1903	13,8124	0	3,33
					30	3,51
					60	3,60
3,25	10,1167	13,5247	12,5798	13,0409	0	3,35
					30	3,58
					60	3,61

Ficha Técnica N° 32

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.32. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 15

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
3,50	10,1241	13,3988	12,4778	12,9346	0	3,62
					30	3,71
					60	3,80
3,75	10,0695	13,2677	12,4818	13,1379	0	3,77
					30	3,82
					60	3,82
3,75	10,0718	13,3269	13,1963	13,8274	0	3,71
					30	3,75
					60	3,79

Ficha Técnica N° 33

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.33. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 16

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
3,80	10,0785	13,6155	13,1888	13,8466	0	3,73
					30	3,87
					60	4,04
3,80	10,1696	13,7755	12,2608	12,9618	0	3,79
					30	3,81
					60	4,10
4,00	10,0380	14,0400	10,2156	10,5358	0	4,07
					30	4,16
					60	4,22

Ficha Técnica N° 34

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 5 cm

Tiempo de duración: 1 h

Tabla AVI.34. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 17

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
4,00	10,0941	14,2784	13,1709	13,3840	0	4,10
					30	4,21
					60	4,32
4,50	10,0844	14,7638	13,1822	13,3214	0	4,45
					30	4,62
					60	4,73
4,50	10,1298	14,9914	12,4829	12,6367	0	4,47
					30	4,69
					60	4,85

Ficha Técnica N° 35

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 5 cm

Voltaje aplicado: 2,50 V

Tabla AVI.35. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 18

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
2,50	10,1033	10,4717	12,4798	12,5645	0	2,55
					5	2,64
					10	2,70
2,50	10,0977	11,4617	13,1874	13,2249	0	2,50
					15	2,52
					30	2,60
4,50	10,0074	12,9075	12,4905	12,5130	0	2,66
					30	2,69
					60	2,75

Ficha Técnica N° 36

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 5 cm

Voltaje aplicado: 3,00 V

Tabla AVI.36. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 19

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
3,00	10,0149	10,4562	10,2238	10,2770	0	3,15
					5	3,19
					10	3,20
3,00	10,1172	11,6979	12,2610	12,5208	0	3,16
					15	3,20
					30	3,27
3,00	10,0929	13,0808	10,2212	10,6804	0	3,10
					30	3,22
					60	3,28

Ficha Técnica N° 37

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 5 cm

Voltaje aplicado: 3,50 V

Tabla AVI.37. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 20

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
3,50	10,0718	10,6133	13,1963	13,3025	0	3,69
					5	3,77
					10	3,79
3,50	10,0695	11,6686	12,4818	12,8099	0	3,70
					15	3,82
					30	3,88
3,50	10,1078	13,5260	12,4805	13,1610	0	3,67
					30	3,67
					60	3,85

Ficha Técnica N° 38

Electrodeposición de cobre sobre carbón activado utilizado un cátodo tipo placa

Distancia entre electrodos: 5 cm

Voltaje aplicado: 4,00 V

Tabla AVI.38. Datos del ensayo de electrodeposición de cobre sobre carbón activado N° 21

Voltaje (V)	Peso C.A. inicial (g)	Peso C.A. final (g)	Peso electrodo inicial (g)	Peso electrodo final (g)	Tiempo (min)	Intensidad (A)
4,00	10,0785	10,7014	13,1888	13,3047	0	4,06
					5	4,10
					10	4,13
4,00	10,1696	12,0927	12,2608	12,6347	0	4,08
					15	4,15
					30	4,25
4,00	10,1493	13,8603	12,5790	13,3140	0	3,67
					30	3,67
					60	3,85

Ficha Técnica N° 39

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado con Cobre Electrodepositado (C.A.E.): 37,50 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.39. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 18

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,50	5	10,0	10,0	10,00	265,0	0,00
30	10,12	5	5,8	6,0	5,90	156,4	41,00
60	10,60	5	3,0	3,0	3,00	79,5	70,00
90	10,33	5	2,0	2,0	2,00	53,0	80,00
120	10,65	5	1,6	1,7	1,65	43,7	83,50
150	10,42	5	1,3	1,4	1,35	35,8	86,50
180	10,30	5	1,0	1,1	1,05	27,8	89,50
210	10,51	10	1,6	1,6	1,60	21,2	92,00
240	10,46	10	1,3	1,3	1,30	17,2	93,50
270	10,40	10	0,9	1,0	0,95	12,6	95,25
300	10,50	10	0,7	0,8	0,75	9,9	96,25
360	10,45	10	0,3	0,4	0,35	4,6	98,25

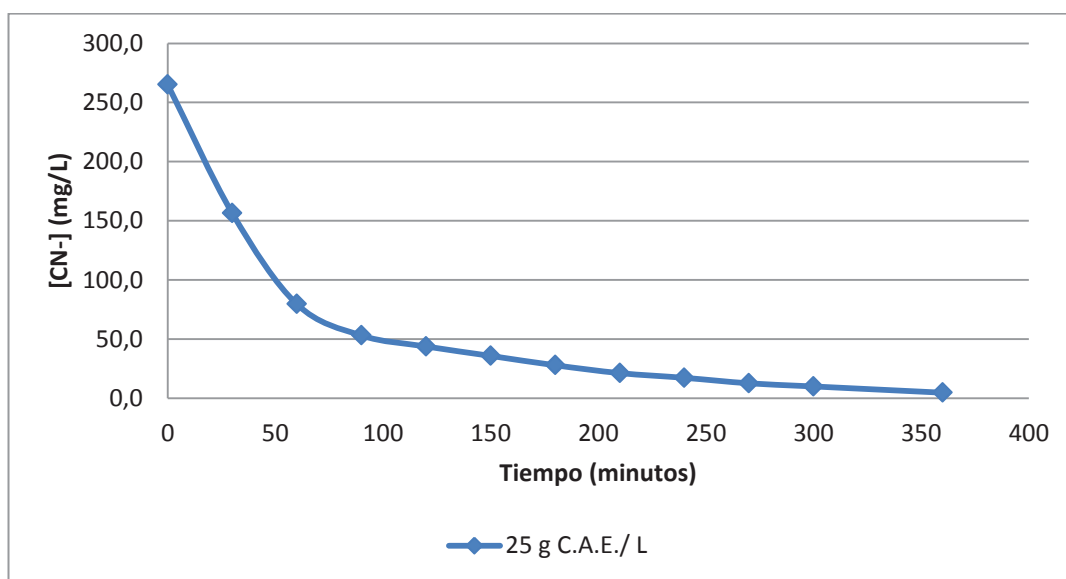


Figura AVI.18. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 25 gramos de carbón activado con cobre electrodepositado por litro de solución

Ficha Técnica N° 40

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado con Cobre Electrodepositado (C.A.E.): 75,00 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.40. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 19

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,52	5	10,0	10,0	10,00	265,0	0,00
30	10,29	5	3,0	3,0	3,00	79,5	70,00
60	10,62	5	2,0	2,0	2,00	53,0	80,00
90	10,48	5	1,0	1,2	1,10	29,2	89,00
120	10,32	5	0,7	0,7	0,70	18,6	93,00
150	10,55	10	1,3	1,3	1,30	17,2	93,50
180	10,45	10	1,0	1,1	1,05	13,9	94,75
210	10,30	10	0,8	0,8	0,80	10,6	96,00
240	10,58	10	0,5	0,4	0,45	6,0	97,75
270	10,55	10	0,3	0,3	0,30	4,0	98,50
300	10,50	20	0,4	0,5	0,45	3,0	98,88
360	10,47	20	0,1	0,2	0,15	1,0	99,63

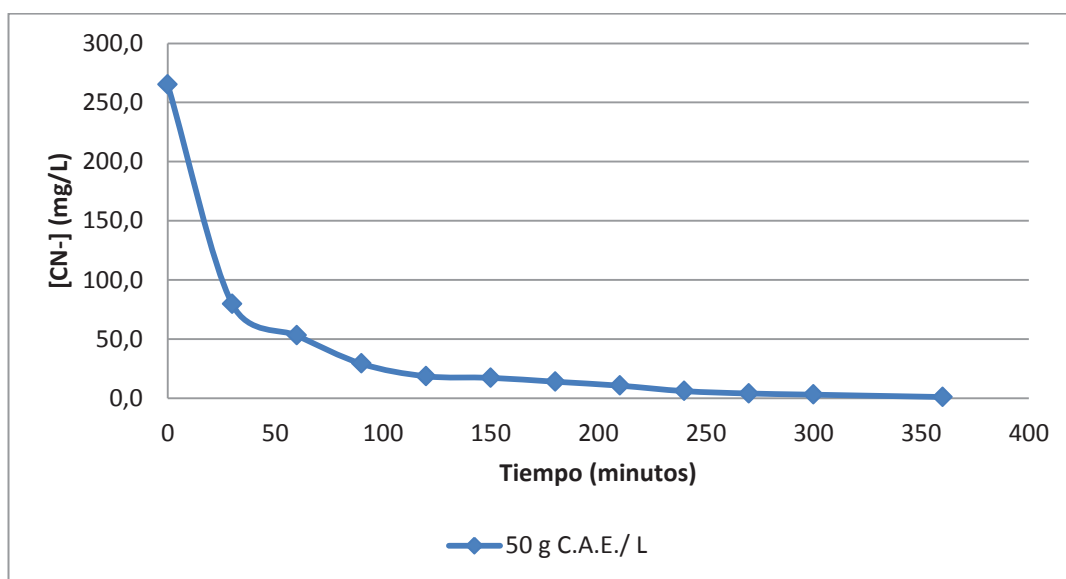


Figura AVI.19. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado con cobre electrodepositado por litro de solución

Ficha Técnica N° 41

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado con Cobre Electrodepositado (C.A.E.): 120,00 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.41. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 20

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,51	5	10,1	9,9	10,00	265,0	0,00
30	10,17	5	1,7	1,9	1,80	47,7	82,00
60	10,74	5	1,0	0,8	0,90	23,9	91,00
90	10,58	5	0,6	0,5	0,55	14,6	94,50
120	10,47	5	0,3	0,3	0,30	8,0	97,00
150	10,46	10	0,4	0,4	0,40	5,3	98,00
180	10,41	10	0,3	0,2	0,25	3,3	98,75
210	10,30	20	0,4	0,3	0,35	2,3	99,13
240	10,23	20	0,3	0,3	0,30	2,0	99,25
270	10,60	20	0,3	0,2	0,25	1,7	99,38
300	10,53	40	0,4	0,3	0,35	1,2	99,56
360	10,47	40	0,1	0,1	0,10	0,3	99,88

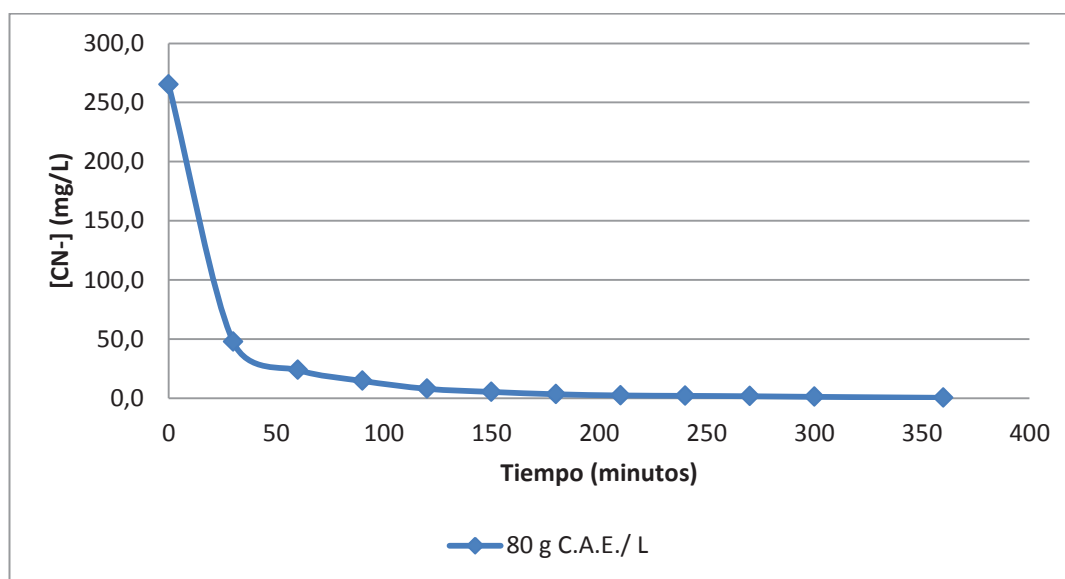


Figura AVI.20. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 80 gramos de carbón activado con cobre electrodepositado por litro de solución

Ficha Técnica N° 42

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 1,0 g/L

Carbón Activado con Cobre Electrodepositado (C.A.E.): 37,50 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.42. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 21

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,46	2,5	10,0	10,0	10,00	530,0	0,00
30	10,23	2,5	5,9	5,7	6,35	307,4	42,00
60	10,69	2,5	2,8	2,8	2,80	148,4	72,00
90	10,35	5	4,3	4,3	4,30	114,0	78,50
120	10,33	5	3,8	3,6	3,70	98,1	81,50
150	10,69	5	3,1	3,1	3,10	82,2	84,50
180	10,57	5	2,5	2,7	2,60	68,9	87,00
210	10,48	10	4,4	4,4	4,40	58,3	89,00
240	10,41	10	3,8	3,7	3,75	49,7	90,63
270	10,38	10	3,1	3,3	3,20	42,4	92,00
300	10,37	10	2,7	2,7	2,70	35,8	93,25
360	10,35	10	1,9	1,9	1,90	25,2	95,25

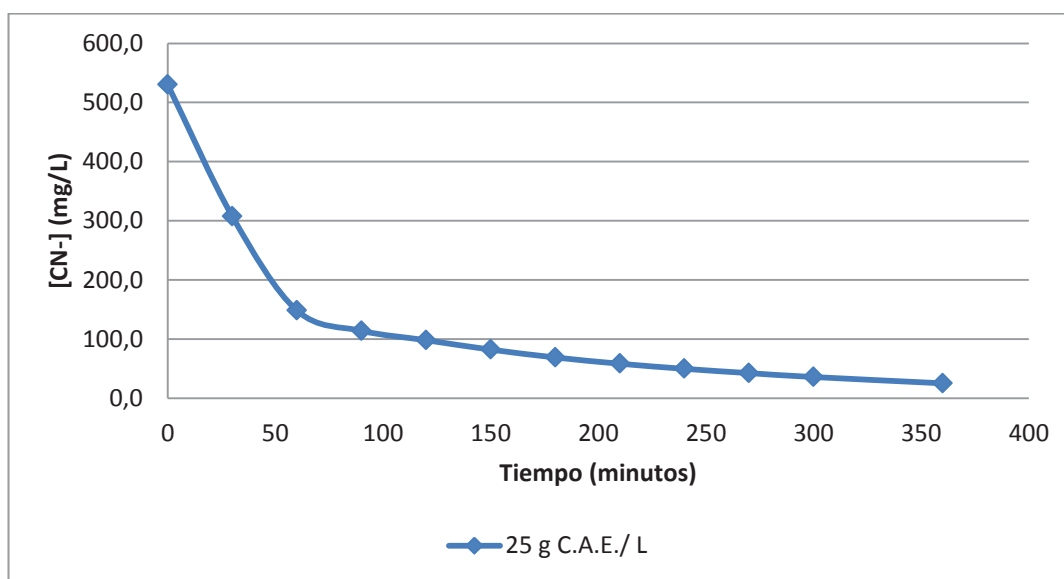


Figura AVI.21. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 25 gramos de carbón activado con cobre electrodepositado por litro de solución

Ficha Técnica N° 43

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 1,0 g/L

Carbón Activado con Cobre Electrodepositado (C.A.E.): 75,00 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.43. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 22

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,65	2,5	10,0	10,0	10,00	530,0	0,00
30	10,23	2,5	3,8	3,8	3,80	201,4	62,00
60	10,50	2,5	2,0	1,8	1,90	100,7	81,00
90	10,14	5	2,2	2,1	2,15	57,0	89,25
120	10,67	5	1,6	1,6	1,60	42,4	92,00
150	10,50	5	1,3	1,2	1,25	33,1	93,75
180	10,33	5	1,0	1,0	1,00	26,5	95,00
210	10,31	10	1,5	1,5	1,50	19,9	96,25
240	10,60	10	1,1	1,1	1,10	14,6	97,25
270	10,55	10	1,0	0,8	0,90	11,9	97,75
300	10,54	10	0,8	0,8	0,80	10,6	98,00
360	10,52	10	0,4	0,4	0,40	5,3	99,00

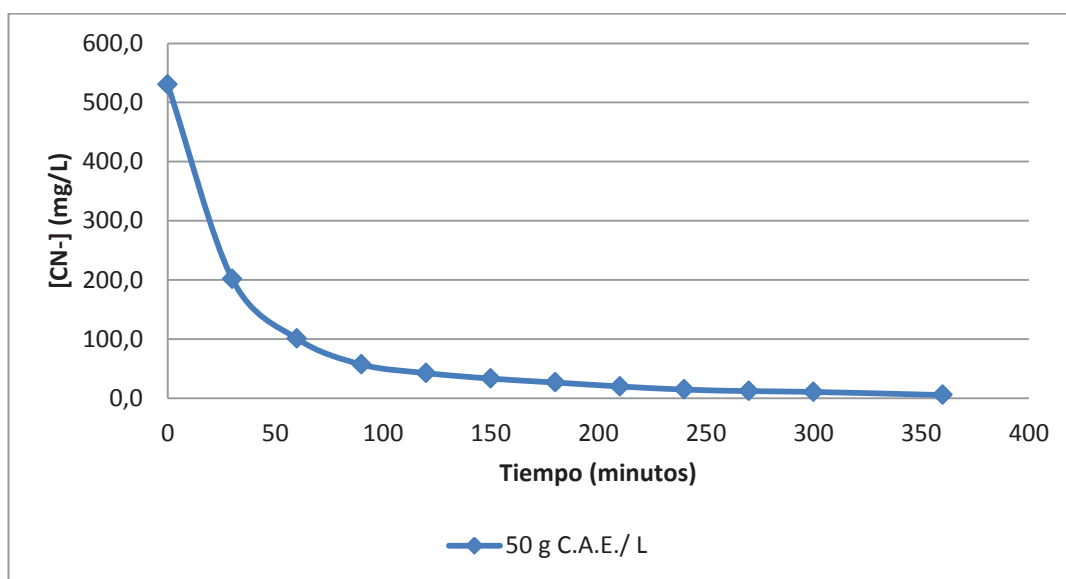


Figura AVI.22. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado con cobre electrodepositado por litro de solución

Ficha Técnica N° 44

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 1,0 g/L

Carbón Activado con Cobre Electrodepositado (C.A.E.): 120,00 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.44. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 23

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,55	2,5	10,0	10,0	10,00	530,0	0,00
30	10,25	2,5	2,7	2,8	2,75	145,8	72,50
60	10,68	2,5	0,8	0,9	0,85	45,1	91,50
90	10,49	5	0,9	0,8	0,85	22,5	95,75
120	10,39	5	0,7	0,6	0,65	17,2	96,75
150	10,63	5	0,4	0,5	0,45	11,9	97,75
180	10,40	5	0,3	0,4	0,35	9,3	98,25
210	10,58	10	0,5	0,6	0,55	6,9	98,69
240	10,33	10	0,4	0,4	0,40	5,2	99,03
270	10,60	10	0,3	0,3	0,30	3,8	99,28
300	10,53	20	0,4	0,5	0,45	3,0	99,44
360	10,49	20	0,3	0,2	0,25	1,7	99,69

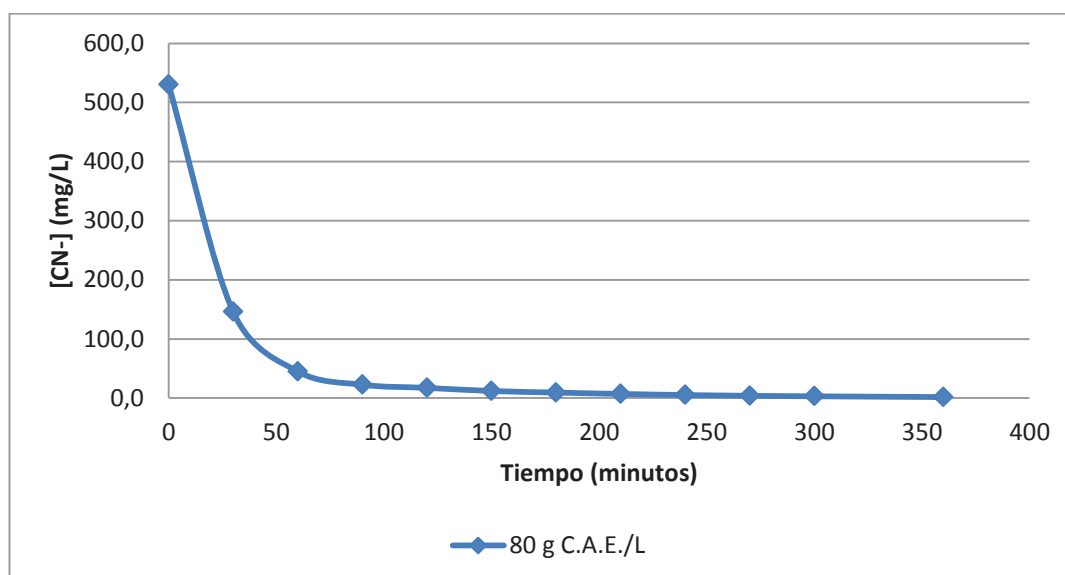


Figura AVI.23. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 80 gramos de carbón activado con cobre electrodepositado por litro de solución

Ficha Técnica N° 45

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 1,0 g/L

Carbón Activado: 75,00 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.45. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 24

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,50	2,5	10,0	10,0	10,00	530,0	0,00
30	10,49	2,5	9,3	9,2	9,25	489,3	7,67
60	10,47	2,5	8,7	8,8	8,75	463,9	12,48
90	10,45	2,5	8,3	8,3	8,30	440,7	16,85
120	10,52	2,5	7,8	7,7	7,75	411,0	22,45
150	10,53	5	14,9	14,9	14,90	394,2	25,62
180	10,50	5	13,8	13,7	13,75	364,1	31,30
210	10,50	5	13,4	13,2	13,30	352,4	33,52
240	10,46	5	13,0	12,8	12,90	342,4	35,40
270	10,46	5	12,0	11,9	11,95	316,4	40,30
300	10,45	5	11,3	11,3	11,30	299,8	43,44
330	10,50	5	10,8	10,6	10,70	283,2	46,57
360	10,50	5	10,2	10,1	10,15	268,8	49,28

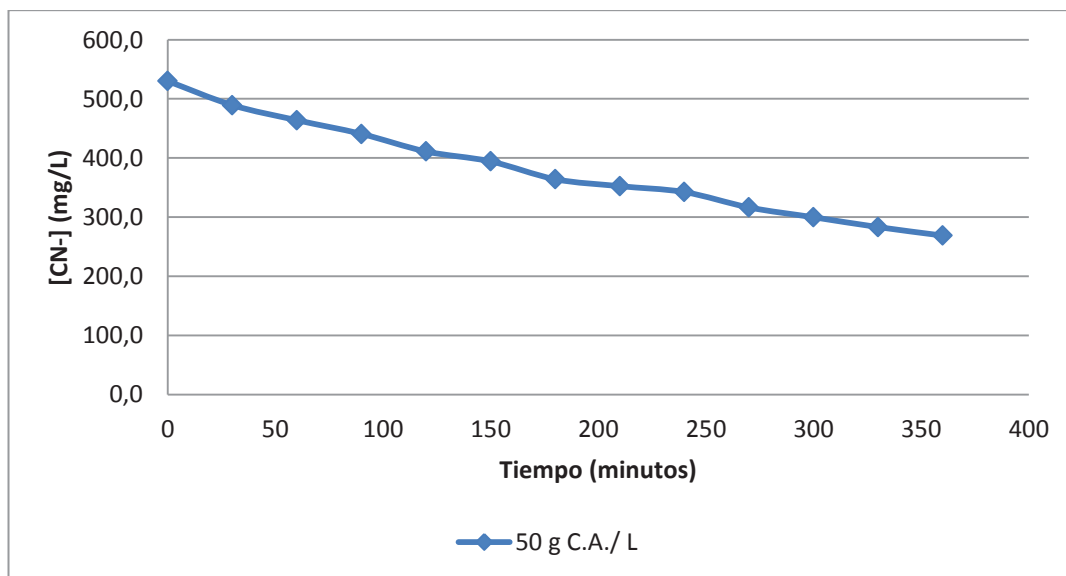


Figura AVI.24. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado por litro de solución

Ficha Técnica N° 46

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 75,00 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.46. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 25

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,53	2,5	5,0	5,0	5,00	265,0	0,00
30	10,52	2,5	4,7	4,7	4,70	249,1	6,00
60	10,52	5,0	9,1	9,0	9,05	239,8	9,50
90	10,50	5,0	8,6	8,6	8,60	227,9	14,00
120	10,48	5,0	8,2	8,1	8,15	216,0	18,50
150	10,48	5,0	7,8	7,8	7,80	206,7	22,00
180	10,55	5,0	7,1	7,1	7,10	188,2	29,00
210	10,55	5,0	6,6	6,6	6,60	174,9	34,00
240	10,53	5,0	6,3	6,2	6,25	165,6	37,50
270	10,53	5,0	5,8	5,8	5,80	153,7	42,00
300	10,53	5,0	5,5	5,5	5,50	145,8	45,00
330	10,50	10,0	10,4	10,4	10,40	137,8	48,00
360	10,50	10,0	10,0	9,9	9,95	131,8	50,25

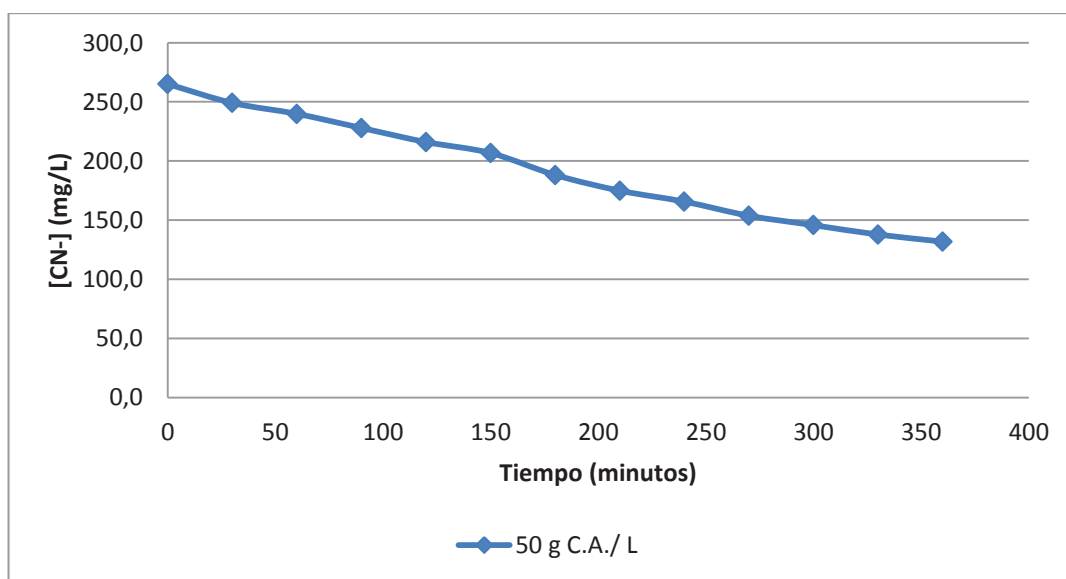


Figura AVI.25. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado por litro de solución

Ficha Técnica N° 47

Parámetros

Reactor con 1,5 litros de solución de NaCN 1,0 g/L
 Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$: 75,00 g
 Flujo de Aire: 650 L/h
 pH: 10,5

Tabla AVI.47. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 26

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,50	2,5	10,0	10,0	10,00	530,0	0,00
30	10,49	2,5	4,5	4,5	4,50	238,5	55,00
60	10,42	2,5	2,7	2,5	2,60	137,8	74,00
90	10,52	2,5	2,0	1,8	1,90	100,7	81,00
120	10,49	5,0	3,3	3,2	3,25	86,1	83,75
150	10,44	5,0	2,8	2,8	2,80	74,2	86,00
180	10,43	5,0	2,4	2,5	2,45	64,9	87,75
210	10,56	10,0	4,4	4,4	4,40	58,3	89,00
240	10,50	10,0	4,2	4,3	4,25	56,3	89,38
270	10,48	10,0	4,1	4,1	4,10	54,3	89,75
300	10,46	20,0	7,9	7,8	7,85	52,0	90,19
330	10,44	20,0	7,1	7,1	7,10	47,0	91,13
360	10,50	20,0	6,7	6,6	6,65	44,1	91,69

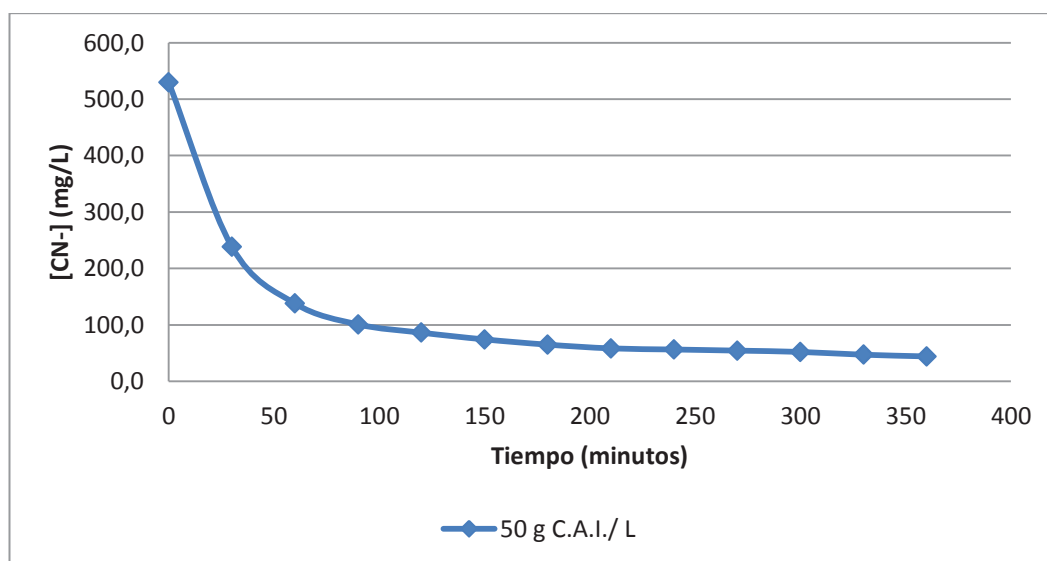


Figura A.26. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de solución

Ficha Técnica N° 48

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$: 75,00 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.48. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 27

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,50	2,5	5,0	5,0	5,00	265,0	0,00
30	10,42	2,5	1,8	1,8	1,80	95,4	64,00
60	10,53	2,5	1,4	1,3	1,35	71,6	73,00
90	10,51	5,0	2,3	2,4	2,35	62,3	76,50
120	10,48	5,0	1,8	1,9	1,85	49,0	81,50
150	10,46	5,0	1,7	1,6	1,65	43,7	83,50
180	10,55	5,0	1,4	1,4	1,40	37,1	86,00
210	10,52	10,0	2,5	2,5	2,50	33,1	87,50
240	10,50	10,0	2,1	2,2	2,15	28,5	89,25
270	10,44	10,0	1,8	1,9	1,85	24,5	90,75
300	10,53	20,0	3,3	3,4	3,35	22,2	91,63
330	10,50	20,0	2,9	3,0	2,95	19,5	92,63
360	10,50	20,0	2,5	2,6	2,55	16,9	93,63

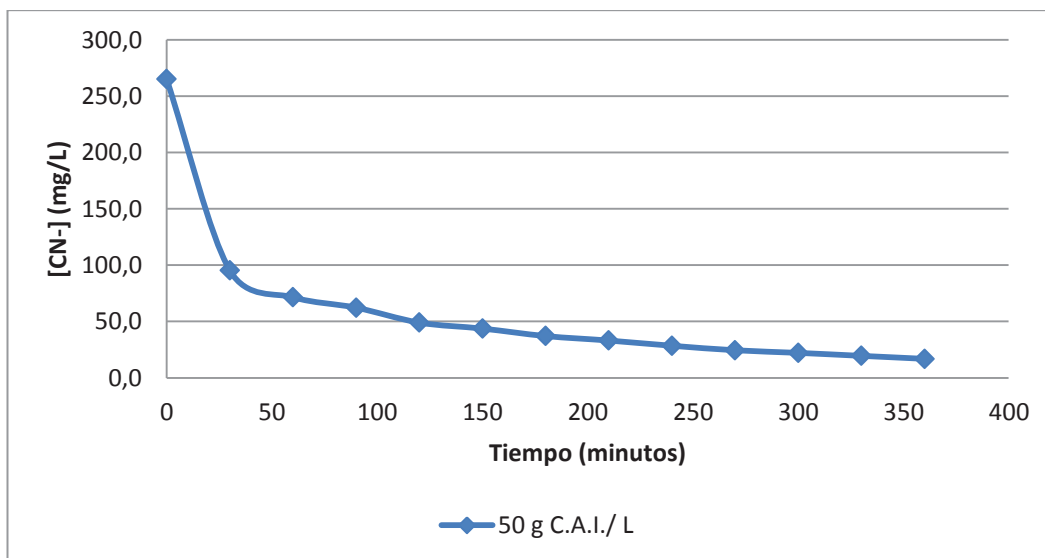


Figura AVI.27. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato cúprico por litro de solución

Ficha Técnica N° 49

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 1,0 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con AgNO₃: 75,00 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.49. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 28

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,49	2,5	10,0	10,0	10,00	530,0	0,00
30	10,47	2,5	4,3	4,2	4,25	225,3	57,50
60	10,43	2,5	3,5	3,4	3,45	182,9	65,50
90	10,50	2,5	3,0	3,0	3,00	159,0	70,00
120	10,49	5,0	5,5	5,5	5,50	145,8	72,50
150	10,48	5,0	4,5	4,7	4,60	121,9	77,00
180	10,45	5,0	4,0	4,0	4,00	106,0	80,00
210	10,54	5,0	3,7	3,8	3,75	99,4	81,25
240	10,50	10,0	6,6	6,5	6,55	86,8	83,63
270	10,46	10,0	5,5	5,5	5,50	72,9	86,25
300	10,55	10,0	4,9	4,8	4,85	64,3	87,88
330	10,54	10,0	4,7	4,6	4,65	61,6	88,38
360	10,52	20,0	8,8	8,8	8,80	58,3	89,00

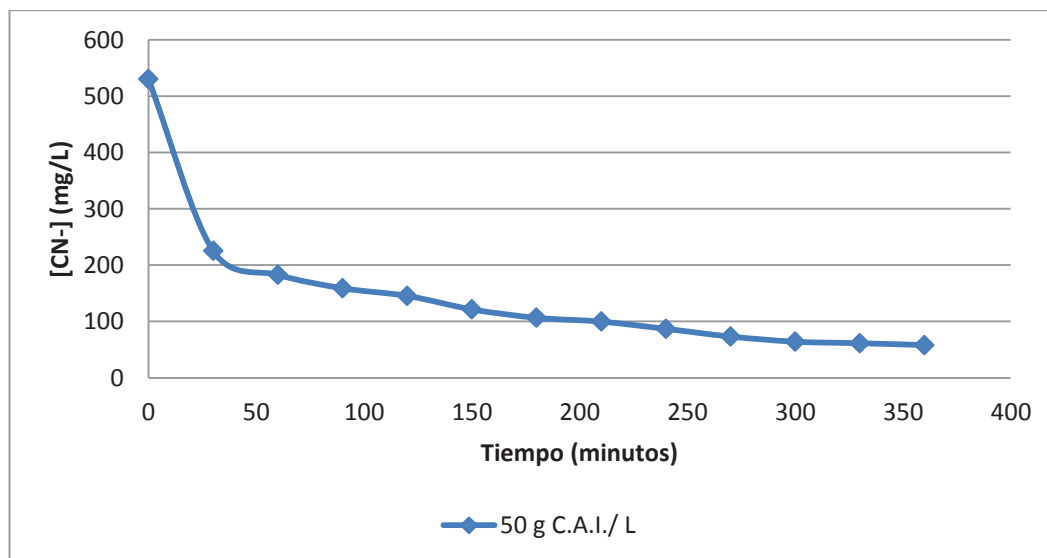


Figura AVI.28. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato de plata por litro de solución

Ficha Técnica N° 50

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado Impregnado (C.A.I.) con AgNO₃: 75,00 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.50. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 29

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,50	2,5	5,0	5,0	5,00	265,0	0,00
30	10,47	2,5	1,7	1,7	1,70	90,1	66,00
60	10,42	2,5	1,2	1,3	1,25	66,3	75,00
90	10,55	2,5	0,9	1,0	0,95	50,4	81,00
120	10,51	5,0	1,8	1,7	1,75	46,4	82,50
150	10,47	5,0	1,4	1,3	1,35	35,8	86,50
180	10,55	10,0	2,5	2,5	2,50	33,1	87,50
210	10,53	10,0	2,0	2,1	2,05	27,2	89,75
240	10,50	10,0	1,9	1,9	1,90	25,2	90,50
270	10,46	10,0	1,3	1,2	1,25	16,6	93,75
300	10,43	20,0	2,3	2,3	2,30	15,2	94,25
330	10,50	20,0	2,0	1,9	1,95	12,9	95,13
360	10,49	20,0	1,7	1,6	1,65	10,9	95,88

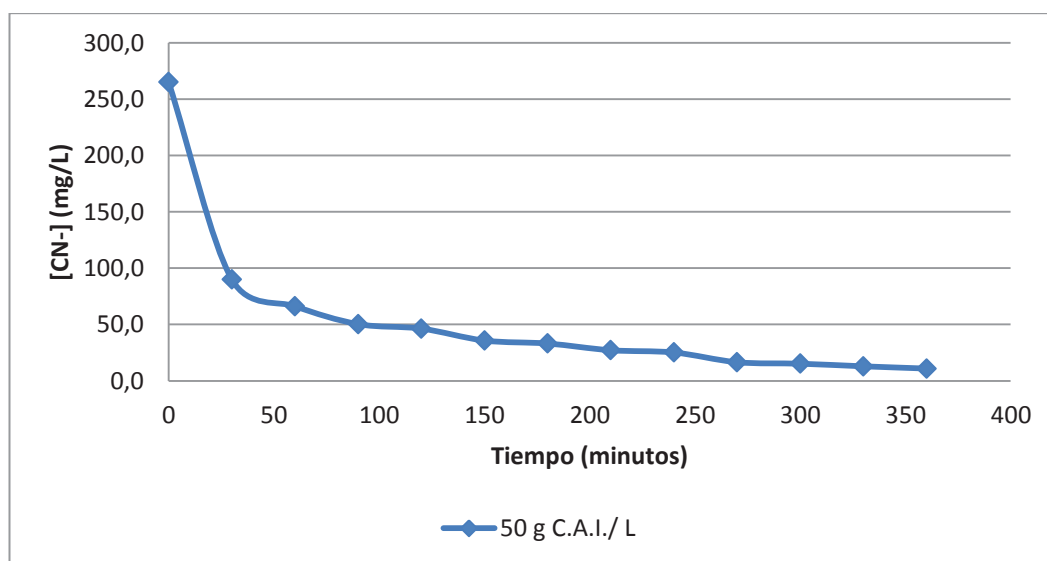


Figura AVI.29. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de oxidación, empleando 50 gramos de carbón activado impregnado con nitrato de plata por litro de solución

Ficha Técnica N° 51

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado con Cobre Electrodepositado (C.A.E.): 75,00 g, 2do uso.

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.51. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 30

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,55	2,5	5,0	5,0	5,00	265,0	0,00
30	10,52	2,5	1,8	1,8	1,80	95,4	64,00
60	10,47	2,5	1,0	1,1	1,05	55,7	79,00
90	10,54	2,5	0,7	0,7	0,70	37,1	86,00
120	10,50	2,5	0,4	0,4	0,40	21,2	92,00
150	10,48	5,0	0,8	0,7	0,75	19,9	92,50
180	10,57	5,0	0,6	0,5	0,55	14,6	94,50
210	10,55	5,0	0,4	0,4	0,40	10,6	96,00
240	10,50	5,0	0,3	0,3	0,30	8,0	97,00
270	10,45	10,0	0,5	0,4	0,45	6,0	97,75
300	10,43	10,0	0,3	0,4	0,35	4,6	98,25
330	10,56	20,0	0,5	0,5	0,50	3,3	98,75
360	10,53	20,0	0,3	0,4	0,35	2,3	99,13

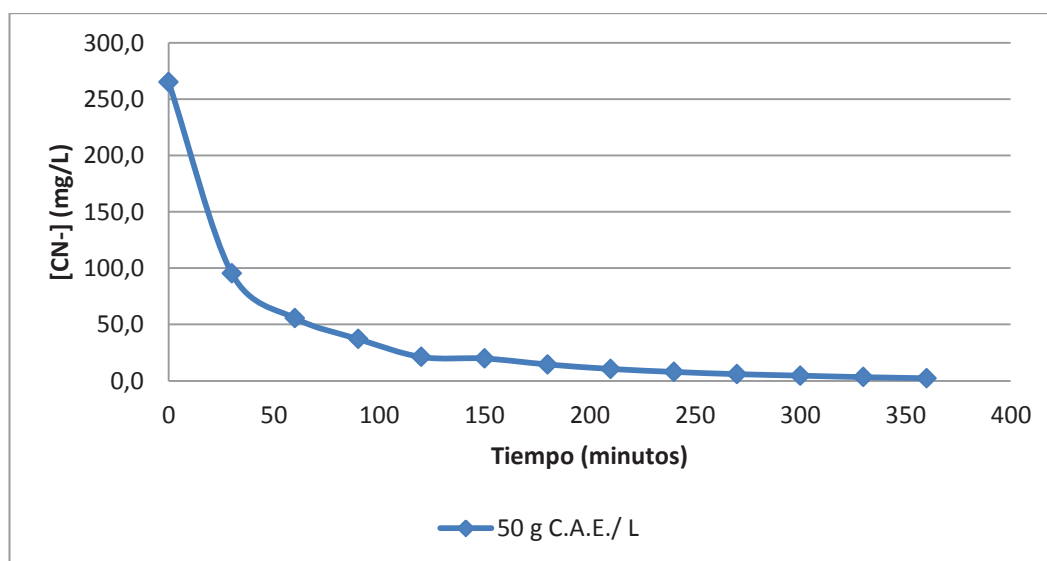


Figura AVI.30. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de reacción, empleando 50 gramos de carbón activado con cobre electrodepositado por litro de solución, 2do uso

Ficha Técnica N° 52

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado con Cobre Electrodepositado (C.A.E.): 75,00 g, 3er uso.

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.52. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 31

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,51	2,5	5,0	5,0	5,00	265,0	0,00
30	10,49	2,5	1,8	1,7	1,75	92,8	65,00
60	10,49	2,5	1,2	1,1	1,15	61,0	77,00
90	10,48	5,0	1,8	1,8	1,80	47,7	82,00
120	10,41	5,0	1,5	1,5	1,50	39,8	85,00
150	10,57	5,0	1,2	1,1	1,15	30,5	88,50
180	10,55	5,0	1,0	0,9	0,95	25,2	90,50
210	10,54	10,0	1,5	1,5	1,50	19,9	92,50
240	10,50	10,0	1,2	1,1	1,15	15,2	94,25
270	10,48	20,0	2,0	1,8	1,90	12,6	95,25
300	10,53	20,0	1,5	1,5	1,50	9,9	96,25
330	10,52	20,0	1,2	1,2	1,20	8,0	97,00
360	10,50	20,0	1,0	0,9	0,95	6,3	97,63

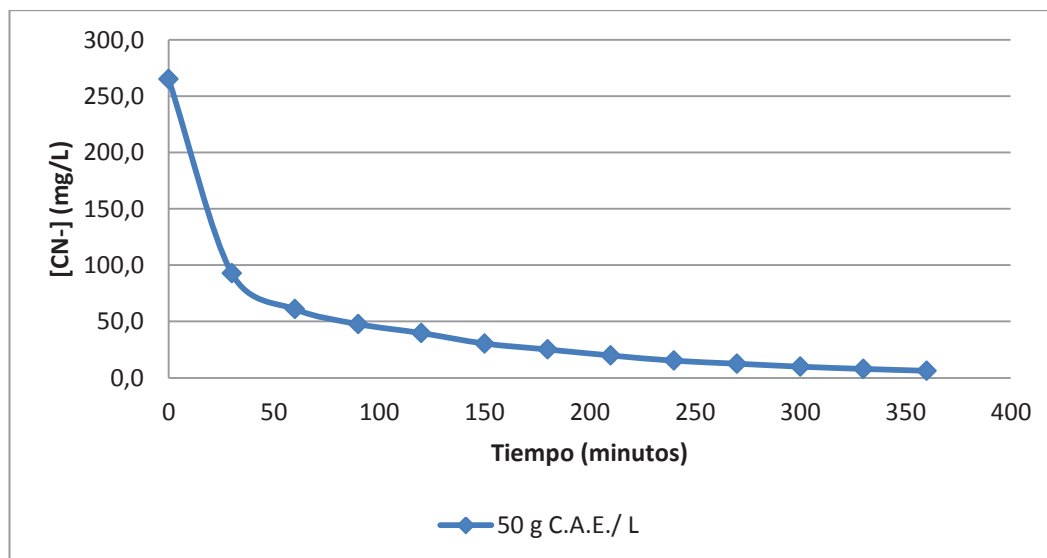


Figura AVI.31. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de reacción, empleando 50 gramos de carbón activado con cobre electrodepositado por litro de solución, 3er uso

Ficha Técnica N° 53

Parámetros

Reactor con 1,5 L de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado con Cobre Electrodepositado (C.A.E.): 75,00 g, 4to uso.

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.53. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 32

Tiempo	pH	Alicuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,50	2,5	5,0	5,0	5,00	265,0	0,00
30	10,48	2,5	1,9	1,9	1,90	100,7	62,00
60	10,47	2,5	1,3	1,3	1,30	68,9	74,00
90	10,53	2,5	1,1	1,0	1,05	55,7	79,00
120	10,52	2,5	0,9	0,8	0,85	45,1	83,00
150	10,52	5,0	1,5	1,5	1,50	39,8	85,00
180	10,46	5,0	1,3	1,2	1,25	33,1	87,50
210	10,54	5,0	1,1	1,0	1,05	27,8	89,50
240	10,53	5,0	0,9	0,9	0,90	23,9	91,00
270	10,50	10,0	1,5	1,4	1,45	19,2	92,75
300	10,43	10,0	1,1	1,1	1,10	14,6	94,50
330	10,53	20,0	1,7	1,7	1,70	11,3	95,75
360	10,52	20,0	1,1	1,2	1,15	7,6	97,13

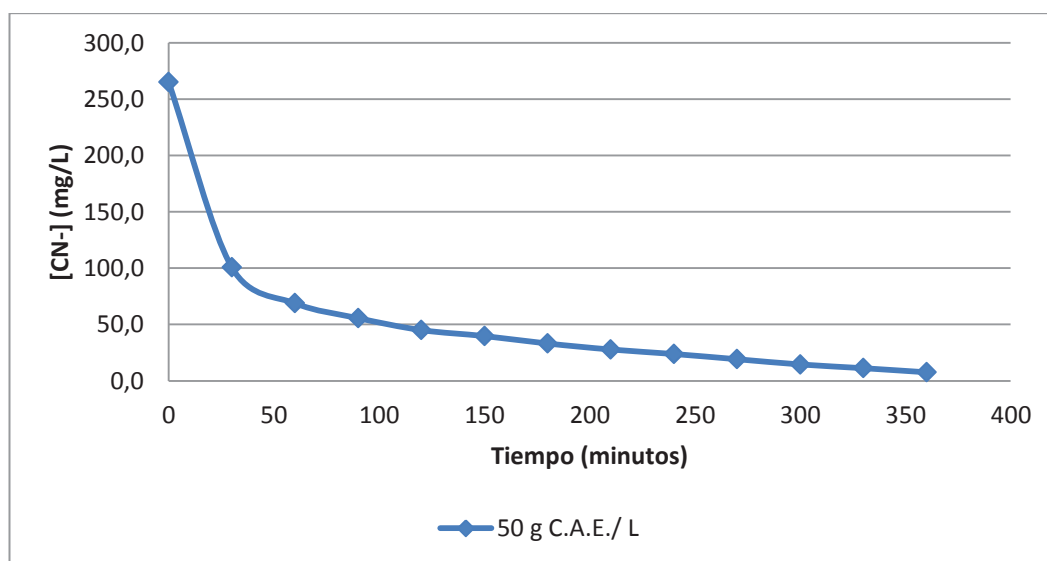


Figura AVI.32. Representación de la concentración de cianuro versus tiempo de reacción, empleando 50 gramos de carbón activado con cobre electrodepositado por litro de solución, 4to uso

Ficha Técnica N° 54

Parámetros

Reactor con 1,5 L de efluente de cianuración de componentes metálicos de computadores $[\text{NaCN}]_0 \approx 1,0 \text{ g/L}$

Carbón Activado con Cobre Electrodepositado (C.A.E.): 75,00 g

Flujo de Aire: 650 L/h

pH: 10,5

Tabla AVI.54. Datos de titulación y concentración para el ensayo de oxidación de cianuro N° 33

Tiempo	pH	Alícuota 1 y 2	AgNO ₃ 1era titulación	AgNO ₃ 2da titulación	Gasto AgNO ₃ promedio	[CN ⁻]	Oxidación
min.		mL	mL	mL	mL	mg/L	%
0	10,50	2,5	10,3	10,1	10,20	540,6	0,00
30	10,47	2,5	4,9	4,9	4,90	259,7	51,96
60	10,40	2,5	3,7	3,6	3,65	193,6	64,22
90	10,57	2,5	3,3	3,2	3,25	171,7	68,14
120	10,52	2,5	2,7	2,7	2,70	143,1	73,53
150	10,51	5,0	5,2	5,0	5,10	135,1	75,00
180	10,46	5,0	4,5	4,5	4,50	119,8	77,94
210	10,54	5,0	4,0	4,0	4,00	106,2	80,39
240	10,53	5,0	3,8	3,8	3,80	100,7	81,37
270	10,50	10,0	7,2	7,1	7,15	95,0	82,48
300	10,48	10,0	6,8	6,8	6,80	90,0	83,33

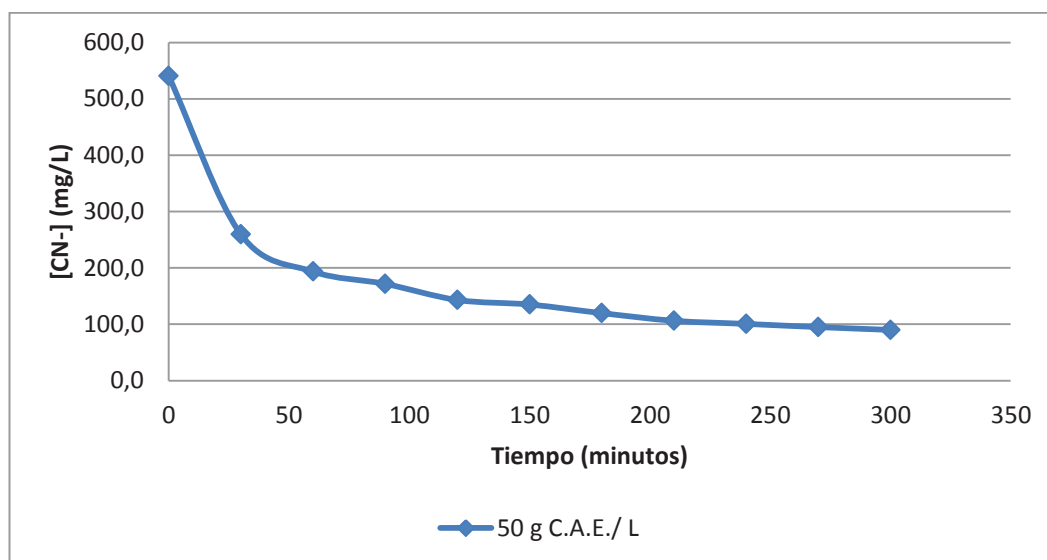


Figura AVI.33. Representación de la concentración de cianuro libre versus tiempo de reacción, empleando 50 gramos de carbón activado con cobre electrodepositado por litro de efluente real

ANEXO VII

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS

Tabla AVII.1. Especificaciones técnicas de los tanques de oxidación
(del R-101 al R-112)

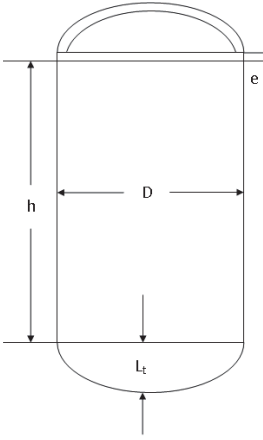
Reactor de Oxidación	
Identificación:	
Fabricante: N/A	N° Requerido: 12
Equipo: Reactor	Fecha: 2012-05-22
Función: Llevar a cabo la oxidación de cianuro libre presente en efluentes en presencia de carbón activado como catalizador	
Operación: Batch	
Área: 100	
Datos de diseño:	
Capacidad (m ³)	1,25
Dimensiones (m)	Diámetro (D): 0,84 Altura (h): 2,52 Espesor (e): 0,002
Potencia (KW)	N/A
Aireadores en la parte inferior	16" de altura para su ubicación
Tapa cóncava estándar	
Número de patas de Di 1" y 0,5 m de altura	3
Diámetro de orificio de descarga	2,30 cm
	
Material: Acero inoxidable 304	
Principios Operativos:	
Para lograr un mejor contacto con las partículas del catalizador se inyecta aire por la parte inferior del tanque, la distribución de la corriente gaseosa, 3 atm, se realiza a través de un difusor de aire ubicado en la parte inferior del tanque.	

Tabla AVII.2. Especificaciones técnicas de los tanques de almacenamiento de agua por tratar y agua tratada (TK-101 y TK-102)

Tanque de Almacenamiento de agua	
Identificación:	
Fabricante: N/A	N° Requerido: 2
Equipo: Tanque de Almacenamiento	Fecha: 2013-03-18
Función: Almacenamiento de agua a tratar	
Área: 100	
Datos de diseño:	
Capacidad (m ³)	10
Dimensiones (m)	Diámetro: 3,05 Altura: 4,6 Espesor: 0,002
Potencia (KW)	N/A
Tapa Cóncava Estándar (m)	Altura: 0,09
Material: Acero inoxidable 304	

Tabla AVII.3. Tanque de almacenamiento de agua tratada (TK-201)

Tanque de Almacenamiento	
Identificación:	
Fabricante: N/A	N° Requerido: 1
Equipo: Tanque de Almacenamiento	Fecha: 2013-03-18
Función: Almacenamiento de agua tratada, después de la oxidación de cianuro	
Área: 200	
Datos de diseño:	
Capacidad (m ³)	10
Dimensiones (m)	Diámetro: 3,05 Altura: 4,60 Espesor: 0,002
Potencia (KW)	N/A
Tapa Cóncava Estándar (m)	Altura: 0,62
Material: Acero al carbono	

ANEXO VIII

**FACTORES CORRESPONDIENTES PARA CÁLCULOS DE COSTOS
SOBRE LA BASE DE LA INVERSIÓN EN EQUIPOS**

Tabla AVIII.1. Factores para cálculo de costos sobre la inversión de equipos

Tipo de planta	Fracción sobre la inversión de equipos		
	Planta procesadora de sólidos	Planta procesadora sólido-fluido	Planta procesadora de fluidos
Costos directos			
Instalación de equipos adquiridos	0,45	0,39	0,47
Instrumentación y control (instalados)	0,18	0,26	0,36
Sistema de tubería (instalado)	0,16	0,31	0,66
Sistema eléctrico (instalado)	0,10	0,10	0,11
Construcciones	0,25	0,29	0,18
Mejoras exteriores	0,15	0,12	0,10
Instalaciones de servicio	0,40	0,55	0,70
Total costos directos			
Costos indirectos			
Ingeniería y supervisión	0,33	0,32	0,33
Gastos de construcción	0,39	0,34	0,41
Gastos legales	0,04	0,04	0,04
Cargo de contratista	0,17	0,19	0,22
Contingencia	0,35	0,37	0,44
Total costos indirectos			
Inversión en capital fijo			
Costo de capital de trabajo	0,70	0,75	0,89
Capital total invertido			

(Peters y Timmerhaus, 1991, p.183)

ANEXO IX

MEMORIA DE CÁLCULOS DE DISEÑO DE LA PLANTA

BALANCE DE MASA

Para el diseño de la planta de tratamiento de aguas cianuradas cuya capacidad será de $10\text{m}^3/\text{día}$, se tomaron como base los datos experimentales obtenidos previamente. Para este propósito se trabajó con los datos de las Fichas Técnicas 16 y 17 que fueron obtenidas del tratamiento de un efluente real de un proceso de cianuración a escala piloto.

Se estima una operación de 300 días al año durante 24 horas. Sobre la base de la experimentación realizada se establece que se requieren dos tanques de oxidación en serie, tras 6 horas de tratamiento en el primer tanque de oxidación, se bombeará el efluente al segundo tanque de oxidación donde permanecerá por 6 horas más. Adicionalmente se propone un tercer tanque de oxidación que será utilizado en el caso de que tras la segunda oxidación no se alcance una remoción prácticamente total de cianuro libre. En función del tiempo de tratamiento en cada etapa y que las dimensiones del tanque para tratar la carga total del efluente es poco práctica, es necesario el funcionamiento de segundo sistema de tratamiento como el ya descrito. Cada tanque de oxidación tendrá una capacidad de $1,25\text{ m}^3$, por lo que en cada sistema de tratamiento se realizarán dos paradas por día, con lo que se logra el tratamiento de $10\text{ m}^3/\text{día}$.

Para el diseño de la planta de tratamiento se toma en cuenta que la concentración inicial de cianuro libre es de $0,5\text{ g/L}$, en la primera oxidación se logra una remoción del 82% y en la segunda oxidación se alcanza 99,99%.

En este caso para asegurar la remoción total del cianuro se establece que la remoción en cada tanque de oxidación es 10% menos al alcanzado en las pruebas a escala piloto, por lo que se tiene una tercera etapa de oxidación en cada sistema de tratamiento en el cual se alcanza la oxidación total.

1er. Tanque de oxidación**Entrada:**

$$\frac{0,5 \text{ g de cianuro libre}}{\text{L de efluente}} * 1\,250 \text{ L} = 0,62 \text{ kg de cianuro libre}$$

Salida:

$$\text{Cianuro libre tras 6 horas de oxidación} = (1 - 0,72) * 0,62 = 0,17 \text{ kg}$$

2do. Tanque de oxidación**Entrada:**

0,17 kg de cianuro libre

Salida:

$$\text{Cianuro removido tras 6 horas de oxidación} = 0,17 * (1 - 0,8999) = 0,03 \text{ kg}$$

3er. Tanque de oxidación**Entrada:**

0,03 kg de cianuro libre

Salida:

0,00 kg de cianuro libre

BALANCE DE ENERGÍA

Dado que el proceso de tratamiento se lleva a cabo a temperatura ambiente y no se requieren procesos de acondicionamiento previo que involucren calentamiento o enfriamiento no se hace necesario el desarrollo de un balance de energía. La cantidad energía requerida en el proceso, energía eléctrica, está dada por las bombas y compresores que permiten la alimentación del efluente a cada tanque de oxidación y el ingreso de aire para lograr la fluidización del lecho de carbón activado.

COSTOS DE PRODUCCIÓN

$$C_{Q1} = 25 \frac{\text{kg de carbón activado}}{\text{día}} * 300 \text{ días} * 3 \frac{\$}{\text{kg de carbón activado}} = 22\,500 \frac{\$}{\text{año}}$$

$$C_{Q2} = 2 \frac{\text{kg de cal}}{\text{día}} * 300 \text{ días} * 0,5 \frac{\$}{\text{kg de carbón activado}} = 300 \frac{\$}{\text{año}}$$

$$C_Q = \$22\,800,00 \text{ por año de operación}$$

$$C_{L1} = 350 \frac{\$}{\text{obrero al mes}} * 4 \text{ obreros} * 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} = \$16\,800 \text{ por años}$$

$$C_{L2}' = 0,04316 \frac{\text{kW}}{\text{bomba}} * 16 \text{ bombas} * 2 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 300 \text{ días} * 0,08 \frac{\$}{\text{kWh}} = 33,15 \frac{\$}{\text{año}}$$

Para los compresores se considera una potencia de 5 HP y eficiencia del 85%

$$\begin{aligned} C_{L2}'' &= \frac{5 \text{ hp}}{0,85 \text{ comp}} * 4 \text{ comp} * 0,746 \frac{\text{kW}}{\text{hp}} * 12 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 300 \text{ días} * 0,08 \frac{\$}{\text{kWh}} \\ &= 5055,25 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

Se suma C_{L1} , C_{L2}' y C_{L2}'' y se obtiene el costo total de producción C_L .

$$C_L = \$21\,888,40 \text{ por año de operación}$$

Tabla AIX.1. Consideraciones de diseño de equipos

Abreviatura	Significado
H_p	Altura del reactor a escala de laboratorio
D_p	Diámetro del reactor a escala de laboratorio
H_e	Altura del reactor escalado para planta de tratamiento
D_e	Diámetro del reactor escalado para planta de tratamiento
V_e	Volumen del reactor escalado para planta de tratamiento
V_{ca}	Volumen de carbón activado en el tanque de tratamiento (batch)
V_{ef}	Volumen del efluente en el tanque de tratamiento (batch)
$H_{efluente}$	Altura del efluente dentro del tanque de oxidación
A_t	Área transversal del tanque de oxidación
V_{batch}	Volumen de efluente a tratar por parada el tanque de oxidación
P	Presión de diseño
K	Resistencia de trabajo del material
E	Eficiencia de la junta o soldadura
C	Factor de tolerancia a la corrosión
A_n	Área transversal del orificio de descarga
C_d	Coefficiente de descarga
t_d	Tiempo de descarga
g	Gravedad
D_d	Diámetro del orificio de descarga
$\rho_{efluente}$	Densidad del efluente
D_{eq}	Diámetro equivalente
S_o	Superficie de las tapas

Dimensionamiento tanque de oxidación

Para el escalamiento se debe tomar en cuenta las características del reactor a nivel laboratorio

- a) Geometría. Debe tener las mismas proporciones que el de laboratorio
- b) Cinética y dinámica. Debe tener las mismas condiciones hidráulicas, número de Reynolds, etc.

Consideraciones

- Presión constante
- Factor de seguridad = 10%
- Volúmenes aditivos

Parámetros de diseño

Presión de trabajo = Presión hidrostática

Presión de diseño = 1,2* Presión de trabajo

Altura libre sobre el líquido en el recipiente = 13 pulgadas

Datos de equipo utilizado en la experimentación

$$D_p = 0,40 \text{ m}$$

$$H_p = 1,20 \text{ m}$$

Respecto a la similitud geométrica esta se obtiene al cumplirse la siguiente relación:

$$\frac{H_e}{H_p} = \frac{D_e}{D_p} \quad [IX.1]$$

El volumen del tanque de tratamiento para la capacidad requerida se establece considerando el volumen de carbón activado y el del efluente a tratar en el proceso batch.

$$V_e = V_{ca} + V_{ef} \quad [IX.2]$$

La cantidad de carbón activado utilizado en la experimentación fue de 50 g/L de agua tratada, dicho parámetro se mantiene para el diseño de la planta, si se toma en cuenta el tratamiento por parada de 1,25 m³ por día, se tiene que:

$$\frac{50 \text{ g de carbón activado}}{\text{L de efluente tratado}} * 1250 \text{ L de efluente} = 62,5 \text{ kg de carbón activado}$$

El volumen que ocuparía el carbón activado dentro del tanque de oxidación sin ser expandido se obtiene con su densidad aparente, 450 kg/m³, este volumen es de 0,14 m³.

Se propone una configuración en serie de tanques de oxidación de tres etapas, en la primera y segunda etapa el efluente permanecerá 6 horas dentro de cada tanque de oxidación, la última etapa removerá el cianuro libre restante, con 2 horas de tratamiento.

El volumen de los tanques de oxidación debe contener el volumen de efluente a tratar por parada así como también el carbón activado requerido en el proceso

$$V_e = V_{ca} + V_{ef} = 0,14 \text{ m}^3 + 1,25 \text{ m}^3 = 1,39 \text{ m}^3$$

$$V_e = A_t * H_e \quad [IX.3]$$

$$V_e = \frac{\pi}{4} D_e^2 * H_e \quad [IX.4]$$

$$\frac{H_p}{D_p} = \frac{H_e}{D_e} \Rightarrow H_e = \frac{1,20}{0,40} * D_e$$

$$V_e = \frac{\pi}{4} D_e^2 * \frac{1,20}{0,40} * D_e$$

$$D_e = \sqrt[3]{\frac{0,40}{1,20} * \frac{4}{\pi} * V_e} = 0,84 \text{ m} = 33,07 \text{ pulgadas}$$

$$H_e = \frac{H_p * D_e}{D_p}$$

$$H_e = \frac{1,20}{0,40} * 0,84 = 2,52 \text{ m}$$

Considerando factor de seguridad 16 in (0,40 m) como longitud libre desde la superficie del fluido se tiene que la altura de la columna es finalmente:

$$H_e = 2,92 \text{ m}$$

El tanque de oxidación será de acero inoxidable 304, debido a que se trabajan con aguas corrosivas por la presencia de cianuro libre. Se considera que el reactor presenta tapas bridadas y cóncavas estándar, entonces se llegan a las siguientes dimensiones:

Cálculo del espesor

Al utilizar la ecuación API-ASME, se tiene:

$$e = \frac{P * D_e}{2 * K * E} + C \quad [IX.5]$$

$$K = 1000 \text{ kgf/cm}^2 = 14\,193.5 \text{ PSI}$$

$$E = \text{eficiencia de la soldadura} = 0,7$$

$$C = 3/32 \text{ in}$$

$$P \text{ hidrostática} = \rho_{\text{efluente}} * g * H_{\text{efluente}} \quad [\text{IX.6}]$$

$$H_{\text{efluente}} = \frac{V_{\text{batch}}}{A_t} \quad [\text{IX.7}]$$

$$H_{\text{efluente}} = \frac{V_{\text{batch}}}{\frac{\pi}{4} * D_e^2} = \frac{1,25 \text{ m}^3}{\frac{\pi}{4} * 0,84^2 \text{ m}^2} = 2,26 \text{ m}$$

$$P \text{ hidrostática} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 2,26 \text{ m}$$

$$P \text{ hidrostática} = 22 \ 148 \text{ Pa} \approx 3,21 \text{ psi}$$

$$P \text{ diseño} = 1,2 * P \text{ hidrostática} = 3,85 \text{ psi}$$

$$e = \frac{3,85 \text{ psi} * \frac{33,07 + (33,07 + 2e)}{2}}{2 * 14 \ 193,5 * 0,7} + \frac{3}{32} \text{ in}$$

$$e = 0,10 \text{ in}$$

Como el espesor es menor a 3/16 in, se seleccionan planchas de 1/16 y 1/8 in para la construcción de los tanques.

Dimensionamiento del orificio para descarga

Se espera tener un tiempo de vaciado de 30 minutos. Se asume que el coeficiente de descarga para boquilla borda 0,51.

$$\text{Altura llena} = H_{\text{efluente}} = 2,26 \text{ m} = 7,41 \text{ ft}$$

$$D_e = 2,76 \text{ ft}$$

La ecuación que se presenta a continuación se emplea para calcular el tiempo requerido para el vaciado de un recipiente (Thomas C. FASTER), está referida para un recipiente cilíndrico vertical como es el caso de los tanques de oxidación que se proponen. La ecuación IX.8 se usa con las dimensiones expresadas en pies.

$$A_n = \frac{\pi * D_e^2 * \sqrt{H_{efluente}}}{\sqrt{8} * C_d * t_d * \sqrt{g}} \quad [IX.8]$$

$$A_n = \frac{\pi * 2,76^2 * \sqrt{7,41}}{\sqrt{8} * 0,51 * 30 * 60 * \sqrt{32,2}} = 0,0044 \text{ft}^2$$

$$A_n = \frac{\pi * D_d^2}{4} = 0,0044 \text{ft}^2$$

$$D_d = \sqrt{\frac{4 * 0,0044 \text{ft}^2}{\pi}} = 0,075 \text{ft} = 2,30 \text{cm}$$

Se establece que el orificio de descarga de cada tanque es de 2,30 cm esto se calculó con el fin de poder cumplir con el tiempo asignado para el vaciado en caso de que la bomba sufra un desperfecto.

Dimensionamiento de las patas

Se toma una longitud de la pata de 0,50 m. Esto con el fin tener un espacio por el cual se puedan colocar tuberías como las que conducen el aire comprimido. Para la fabricación de los tubos, se utilizan tubos de cédula 40, con las siguientes especificaciones:

Tabla AIX.2. Especificaciones de los tubos para las patas de los tanques

Cédula	Diámetro interno (pulg-m)	Diámetro externo (m)
40	1-0,025	0,0284

Las patas de cada tanque de oxidación deben estar en la capacidad de soportar el peso que aporta el fluido presente durante la oxidación, el peso de la cantidad de carbón activado y también el peso del tanque con las dimensiones ya establecidas.

$$P. \text{ total recip.} = P. \text{ efluente} + P. \text{ lecho de carbón} + P. \text{ recip.} \quad [\text{IX.9}]$$

$$\text{Peso recipiente} = \text{Peso tapas} + \text{Peso cilindro} \quad [\text{IX.10}]$$

Para el material de construcción del acero inoxidable, la densidad es de alrededor de 7850 kg/m^3 .

$$\text{Peso efluente} = \text{Volumen de efluente por parada} * \rho_{\text{efluente}} \quad [\text{IX.11}]$$

$$\text{Peso efluente} = 1,25 \text{ m}^3 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1250 \text{ kg}$$

$$\text{Peso cilindro} = \rho_{\text{acero}} * 2\pi * \frac{D_e}{2} * H_e * e \quad [\text{IX.12}]$$

$$\text{Peso cilindro} = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2\pi * \frac{0,84 \text{ m}}{2} * 2,95 \text{ m} * \left(0,10 \text{ in} * \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ in}} \right) = 155,22 \text{ kg}$$

A continuación se presenta como se calcula el volumen de las tapas el mismo que permitirá la determinación del volumen de estas y con ello el peso total del recipiente, es de gran importancia establecer el número de patas que debe tener el recipiente ya que esto proporciona estabilidad al mismo y por tanto seguridad durante el proceso de tratamiento.

La superficie de las tapas queda expresada por:

$$S_o = \frac{\pi * D_{eq}^2}{4} \quad [\text{IX.13}]$$

R_K es un parámetro que se define como 0,06 veces el diámetro del tanque de oxidación, su valor se compara con el triple del espesor del recipiente y con esto se establece la fórmula que se debe usar para el cálculo del diámetro equivalente, valor que se usa en la fórmula para el cálculo de la superficie de las tapas como se muestra en la anterior ecuación.

$$R_K = 0.06 * D_e \quad [IX.14]$$

$$R_K = 0.06 * 0,84 \text{ m} = 0,05 \text{ m}$$

Se establece el valor de tres veces el espesor ya determinado que es de:

$$3e = 3 * \left(0,10 \text{ in} * \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ in}} \right) = 0,003 \text{ m}$$

$$R_K = 0,05 \text{ m} > 3e = 0,003 \text{ m}$$

Como, se ha llegado a esa relación para el cálculo del diámetro equivalente se emplea la siguiente relación:

$$D_{eq} = \frac{25}{24} * D_e + 2e \quad [IX.15]$$

$$D_{eq} = \frac{25}{24} * 0,84 \text{ m} + 2 * \left(0,10 \text{ in} * \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ in}} \right) = 0,88 \text{ m}$$

$$S_o = \frac{\pi * (0,88 \text{ m})^2}{4} = 0,61 \text{ m}^2$$

$$\text{Peso tapas} = 2 * S_o * e * \rho_{\text{acero}} \quad [IX.16]$$

$$\text{Peso tapas} = 2 * 0,61 \text{ m}^2 * \left(0,10 \text{ in} * \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ in}} \right) * 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 24,33 \text{ kg}$$

$$\text{Peso total del recipiente} = 1\,250 + 155,22 + 24,33 + 62,5 = 1\,492,05 \text{ kg}$$

De acuerdo a las especificaciones, se tiene que la resistencia de la pata de acero es:

$$R = \frac{600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{1,55 + 0,0005 \left(\frac{L_{\text{pata}}}{D_{\text{pata}}} \right)} \quad [\text{IX.17}]$$

$$R = \frac{600 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{1,55 + 0,0005 \left(\frac{0,5 \text{ m}}{0,0284 \text{ m}} \right)} = 384,91 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

La resistencia de la pata se calcula en función, del diámetro interno y externo del tubo con el que se realiza la pata, el tubo escogido es acero de cédula 40 cuyas dimensiones se especifican en la tabla anterior.

$$\text{Superficie llena de la pata} = \frac{\pi * D_{\text{ext}}^2}{4} - \frac{\pi * D_{\text{int}}^2}{4} \quad [\text{IX.18}]$$

$$\text{Superficie llena de la pata} = \frac{\pi}{4} * (2,84^2 - 2,5^2) \text{cm}^2 = 1,43 \text{ cm}^2$$

$$\text{Peso que soporta cada pata} = R * \text{Superficie llena de la pata} \quad [\text{IX.19}]$$

$$\text{Peso que soporta cada pata} = 384,91 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 1,43 \text{ cm}^2 = 548,87 \text{ kg}$$

$$\# \text{ patas} = \frac{1492,05 \text{ kg}}{548,87 \frac{\text{kg}}{\text{pata}}} \approx 3 \text{ Patas}$$

Entonces para el tanque de oxidación se requieren 3 patas

Dimensionamiento tanque de almacenamiento de aguas para tratamiento

Consideraciones:

2 días de almacenamiento

Factor de seguridad del 15%

Datos:

$$\text{Densidad efluente} = 1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cada día se tiene 10 m³ de efluente a tratar por lo que se trabaja con dos el tanques de almacenamiento del doble de capacidad, uno para trabajar por día y otro de reserva. Se selecciona un tanque de 5 300 gal de capacidad, acero inoxidable 304. Para el dimensionamiento se aplica la relación L/D=1,5 para tanques menores a 21 000 galones a presión atmosférica. Dada su gran capacidad se seleccionan tanques de fondo y tapa plana. De esto se llegan a las dimensiones:

$$L_v = 16 \text{ in}$$

$$V_{\text{efluente almacenado}} = V_{\text{cilindro}} - V_{\text{libre}} \quad [\text{IX.20}]$$

$$V_{\text{efluente almacenado}} = \pi * \frac{D^2}{4} (L_c - L_v) \quad [\text{IX.21}]$$

$$20 \text{ m}^3 = \pi * \frac{D^2}{4} (1,5 * D - 16 * 0,0254)$$

$$D = 2,66 \text{ m}$$

$$D' = 1,15 * 2,66 \text{ m} = 3,05 \text{ m} = 120,00 \text{ in}$$

$$L_c = 1,5 * 3,05 \text{ m} = 4,6 \text{ m} = 181,10 \text{ in}$$

Cálculo del espesor

Al utilizar la ecuación API-ASME, se tiene:

$$e = \frac{P \cdot D_m}{2 \cdot K \cdot E} + C \quad [\text{IX.22}]$$

$$K = 1000 \text{ kgf/cm}^2 = 14\,193.5 \text{ PSI}$$

E = eficiencia de la soldadura = 0.7

$$C = 3/32 \text{ in}$$

$$P_{\text{hidrostática}} = \rho_{\text{mezcla}} \cdot g \cdot (L_f + L_{cc}) = \frac{m_{\text{total}}}{V_{\text{mezcla}}} \cdot g \cdot (L_c) \quad [\text{IX.23}]$$

$$P_{\text{hidrostática}} = 1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (4.60 - 16 \cdot 0.0254) \text{ m}$$

$$P_{\text{hidrostática}} = 41\,097.30 \text{ Pa} \approx 5.96 \text{ psi}$$

$$P_{\text{diseño}} = 1.2 \cdot P_{\text{hidrostática}}$$

$$P_{\text{diseño}} = 7.15 \text{ psi}$$

$$e = \frac{7.15 \text{ psi} \cdot \frac{120 + (120 + 2e)}{2}}{2 \cdot 14\,193.5 \cdot 0.7} + \frac{3}{32} \text{ in}$$

$$e = 0.14 \text{ in}$$

Se seleccionan planchas de 1/16 y 1/8 in

Dimensionamiento del orificio para descarga

Se espera tener un tiempo de vaciado de 60 minutos

Se asume que el coeficiente de descarga es de 0.51

$$\text{Altura llena} = 181.10 - 16 = 165.10 \text{ in} = 13.76 \text{ ft}$$

Diámetro = 10 ft

$$Ah = \frac{\pi * D^2 * \sqrt{L}c}{\sqrt{8} * Cd * t * \sqrt{g}} \quad [IX.24]$$

$$Ah = \frac{\pi * 10^2 * \sqrt{13,76}}{\sqrt{8} * 0,51 * 60 * 60 * \sqrt{32,2}} = 0,04 \text{ ft}^2$$

$$Ah = \frac{\pi * D^2}{4} \quad [IX.25]$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0,04 \text{ ft}^2}{\pi}} = 0,23 \text{ ft} = 7,0 \text{ cm}$$

Dimensionamiento de las bombas de distribución

Para el dimensionamiento de las bombas se hicieron las siguientes consideraciones:

- Se empleó la ecuación del balance de energía de Bernoulli tomando en cuenta que todos los equipos están expuestos a la presión atmosférica y que los fluidos están estáticos en los puntos en los que se realizan los balances.
- Todas las bombas deben vencer un valor de pérdidas friccionales, localizadas y por accesorios de aproximadamente 3 m.
- El nivel de referencia es el piso y se considera únicamente las alturas que ocupan los líquidos en cada uno de los equipos.

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_B = \frac{P_2}{\gamma_2} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \text{pérdidas} \quad [IX.26]$$

$$H_B = z_2 - z_1 + \text{pérdidas} \quad [IX.27]$$

$$H_B = 2,26 \text{ m} - 0,50 \text{ m} + 3 \text{ m} = 4,76 \text{ m}$$

$$\text{Potencia hidráulica} = \dot{Q} * H_B * \gamma \quad [\text{IX.28}]$$

El caudal buscado es el necesario para llenar 20 m³ en 8 horas lo que equivale a 1,25 m³ cada 30 minutos.

$$\dot{Q} = \frac{1,25 \text{ m}^3}{30 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}} = 0,000694 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{Potencia hidráulica} = 0,000694 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 4,76 \text{ m} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 32,37 \text{ W}$$

Considerando una eficiencia de la bomba $\eta = 85\%$

$$\eta = \frac{\text{Potencia hidráulica}}{\text{Potencia del motor}} \quad [\text{IX.29}]$$

$$\text{Potencia del motor} = \frac{32,37 \text{ w}}{0,75} = 43,16 \text{ W} = 0,06 \text{ HP}$$