

Calidad de los efluentes líquidos en el proceso de optimización de las torres de enfriamiento de la refinería de zinc de Cajamarquilla, periodo 2013 a 2014

Quality of liquid effluents in the process of optimization of cooling towers of the zinc refinery of Cajamarquilla, period 2013 to 2014

Wilmer Silva Rivera, Vidal Aramburú Rojas

Recibido: Agosto 2015 - Aprobado: Diciembre 2015

RESUMEN

En la refinería de zinc Cajamarquilla, los sistemas de refrigeración de las torres de enfriamiento N° 1 (160 K y tower tech) y N° 2 (320K), como cualquier sistema de refrigeración, presentan problemas de corrosión, incrustación, acumulación de impurezas y microorganismos que están en contacto con la calidad de agua provenientes de otras áreas, como tostación, planta de ácido sulfúrico, hidrometalurgia, entre otras. En la investigación realizada, se aplicaron tecnológicas limpias y modernas, para optimizar el funcionamiento de las torres de enfriamiento que posibilitó como consecuencia una mejor calidad del efluente líquido y la reducción de uso de agua provenientes de las purgas de estos sistemas de refrigeración que son tratados y vertidos a la red de alcantarillado, para luego ser descargados a la Poza de Retención y finalmente a la Poza de Regantes ubicada al sur de la refinería Cajamarquilla propiedad de la asociación de regantes del valle de Jicamarca.

En tal sentido, la optimización de los sistemas de refrigeración de las torres de enfriamiento N° 1 (160K y Tower Tech) y N° (320K) consistió, en una primera fase, en el acondicionamiento de líneas con la derivación hacia la planta pH 9, con el propósito de reducir el contenido de zinc y sólidos en suspensión y lograr un mejor nivel de eficiencia. Esto permitió obtener efluentes con las mínimas concentraciones de metales, e impidió que su descarga al cuerpo receptor ocasionara algún efecto adverso en los componentes del ecosistema. La segunda fase consistió en el estudio y aplicación de modernas tecnologías en sistemas de refrigeración, como la Tecnología 3D Trasar, que ayudó a detectar, determinar y evitar incrustaciones, corrosión y actividad microbiológica, como también controlar y monitorear el agua de aporte (Make Up) y la purga de las torres de enfriamiento en forma automática, mejoró también la instrumentación de las variables principales de calidad de efluentes líquidos, permitiendo el control y monitoreo continuo en tiempo real de los parámetros de control como: Potencial de iones de hidrógeno, conductividad, turbidez, ensuciamiento (Fouling) de la celda, temperatura, caudal, entre otros.

La tercera fase consistió en mejorar el tratamiento químico de las torres de enfriamiento al reemplazar el inhibidor de corrosión Nalco 8575 y el inhibidor de incrustación Nalco 8300, por el Nalco 3DT 187 y el Nalco 3DT 198, respectivamente.

Los resultados obtenidos indican que en el periodo 2013 a 2015 se tiene la reducción de uso de agua de 50.86% siendo los ciclos de concentración de 2.37 a 3.03, respectivamente; asimismo, en los años 2013 y 2014, se obtuvo una disminución del contenido de Zinc a la salida de la torre en 6.35 % de 2.52 mg/L a 2.36 mg/L. Cabe mencionar que la confiabilidad de las muestras realizadas se ha basado en el Protocolo de Monitoreo de calidad de agua subsector minería¹, los criterios de las normas legales ambientales tanto nacionales e internacionales tales como los Límites Máximos Permisibles (LMP) y los Estándares Nacionales de Calidad del Agua (ECA) para la Categoría III, siendo estos últimos el referente legal ambiental. También se tomó en cuenta la certificación del laboratorio interno de la Refinería Cajamarquilla, bajo la acreditación de la norma ISO 17025 y laboratorios externos acreditados por el Instituto Nacional de la Calidad (INACAL), además de contar con la norma ISO 14001, todo ello enfocado al sistema de gestión integrado SGV.

Palabras clave: Calidad; efluentes líquidos; tecnología 3D Trasar; optimización; torres de enfriamiento.

1. Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (2016). R.J N°. 010-2016-ANA. Recuperado de <http://www.ana.gob.pe/normatividad/rj-no-010-2016-ana>

ABSTRACT

At the Cajamarquilla zinc refinery, the cooling systems of cooling towers No. 1 (160 K and tower tech) and No. 2 (320K) as any cooling system present problems of corrosion, incrustation, accumulation of impurities and microorganisms Which are in contact with water quality from other areas, such as roasting, sulfuric acid plant, hydrometallurgy, among others. With the research carried out, clean and modern technologies were applied to optimize the operation of the cooling towers, which made possible a better quality of the liquid effluent and the reduction of water use from the purges of these refrigeration systems that are treated and Discharged to the sewage network, then discharged to the "Poza de Retención" and finally to the "Poza de Regantes" located to the south of the Cajamarquilla refinery owned by the irrigation association of the "Jicamarca" valley.

In this sense, the optimization of the cooling systems of the cooling towers N°. 1 (160K and Tower Tech) and N°. (320K) consisted of a first phase in the conditioning of lines with the diversion towards the plant pH 9 with The purpose of reducing the content of zinc and solids in suspension and achieving a better level of efficiency, obtaining effluents with the minimum concentrations of metals and allowing discharge to the receiving body, does not cause any adverse effects on the components of the ecosystem. The second phase consisted of the study and application of modern technologies in refrigeration systems, such as the "3D Trasar Technology", which helped to detect, determine and avoid incrustations, corrosion and microbiological activity, as well as control and monitor the supply water (Make Up) and purge cooling towers automatically, also improved the instrumentation of the main liquid effluent quality variables, allowing the control and continuous monitoring in real time of control parameters such as: Hydrogen ion potential , Conductivity, turbidity, fouling of the cell, temperature, flow, among others.

The third phase was to improve the chemical treatment of cooling towers by replacing the corrosion inhibitor "Nalco 8575" and the incrustation inhibitor ("Nalco 8300") by "Nalco 3DT 187" and "Nalco 3DT 198" respectively.

The results obtained indicate that in the period 2013 to 2015 there is a reduction of water use of 50.86%, with concentration cycles of 2.37 to 3.03 respectively; In the years 2013 and 2014 a decrease in the zinc content at the outlet of the tower was achieved in 6.35% from 2.52 mg / L to 2.36 mg / L. It should be mentioned that the reliability of the samples made has been based on the "Water Quality Monitoring Protocol subsector mining", the criteria of national and international environmental legal standards such as the Maximum Permissible Limits (LMP) and the Standards National Water Quality Standards (ECA) for Category III, the latter being the environmental legal referent. The internal laboratory of the Cajamarquilla Refinery was also taken into account, under the accreditation of ISO 17025 and external laboratories accredited by the National Institute of Quality (INACAL), in addition to having the ISO 14001 standard, all of which focused on To the integrated management system "SGV".

Keywords: Quality; liquid effluents; 3D technology Trasar; optimization; cooling towers.

I. INTRODUCCIÓN

En la Refinería de zinc Cajamarquilla, se realizan descargas de efluentes provenientes de las diferentes partes de la planta, siendo una de ellas la descarga de las torres de enfriamiento, que deberían cumplir con los parámetros aceptables de calidad; por lo que, estos parámetros pueden ser mejorados con tecnologías limpias ambientalmente sostenibles, en donde se enmarca la filosofía de producción más limpia (P+L), estrategia de gestión empresarial preventiva, cuyo objetivo es minimizar emisiones y/o descargas en la fuente, reduciendo riesgos para la salud humana y el Medio Ambiente.

En tal sentido, los sistemas de refrigeración de las torres de enfriamiento de la Refinería de Zinc pueden ser mejorados con tecnologías limpias y modernas monitoreando y controlando en tiempo real las purgas de agua y los parámetros físicos, químicos y biológicos que ésta demanda como son la conductividad, la turbidez, el pH, la temperatura, el crecimiento biológico, la concentración del tratamiento químico y los componentes químicos específicos, entre otros. Esto permitió mejorar la calidad de efluentes líquido y la reducción de uso de agua, cuyos valores puedan servir de estudio para obtener Estándares Ambientales de calidad (ECA) aceptables dentro de las actividades minero-metalúrgicas.

En la actualidad, el reúso de las aguas es una práctica extendida a nivel mundial, especialmente para uso agrícola que contribuye a disminuir el impacto de vertimiento en cuerpos receptores; en la presente tesis, se plantea usar tecnologías modernas y eficaces, para lograr que las aguas provenientes de las descargas hacia las pozas de retención y luego a la pozas de regantes cumplan con los parámetros de calidad y normativa ambiental vigente y lleguen a la población de Jicamarca para el reúso de agua en sus actividades agrícolas.

II. MATERIAL Y MÉTODO

El tipo de investigación utilizada en la presente tesis es aplicativa y el método y el diseño empleados es el descriptivo correlacional, basado en muestras cualitativas. Dentro de este marco, se utilizaron referentes teóricos y metodológicos ya existentes en relación a la variable, para resolver los problemas prácticos, optimizando las torres de enfriamiento, su relación con la mejora de la calidad de los efluentes líquidos y la reducción de uso de agua fresca. Las metodologías que se aplicaron fueron desde la revisión/recopilación de la información, de trabajo en campo, análisis de muestra y 3D trasar.

Metodología para el uso de la tecnología 3D Trasar:

El actual tratamiento químico aplicado en los sistemas de refrigeración 160K y 320K de las torres de enfriamiento de la Refinería Cajamarquilla aporta zinc, el cual es un inhibidor de corrosión que genera aportes en los efluentes. En ese contexto, se tiene nuevas alternativas de tratamiento químico con productos nuevos Nalco 3DT 187 y Nalco 3DT 198, que generan protección del sistema que a su vez son amigables al medio ambiente. Este sistema automatizado de 3D trasar, permite que se genere menos agua de reposición, menos purgas e incremento de los ciclos de concentración, por consiguiente, se produce un ahorro en el uso de agua. El sistema de refrigeración N° 2 (circuito 320K) está compuesto por un equipo automatizado 3D Trasar que controla y monitorea en tiempo real y online las variables: pH, conductividad, purgas, índice biológico, los residuales del polímero y velocidad de corrosión; lo que permite la optimización de la torre de enfriamiento N° 2 (circuito 320K).

Para el uso del software 3D Trasar, deberán ingresar al sitio web: <http://es-la.nalco.com/la/>

Detalles del sistema

» Resumen de sistema » Detalles del sistema



Figura N°1. Detalles del sistema

Fuente: 3D Trasar



Figura N°2. Funcionamiento del sistema 3D Trasar

Fuente: 3D Trasar

III. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Calidad de los efluentes líquidos:

El promedio anual 2011 a 2015 de contenido de Zinc a la salida del sistema de refrigeración de la torre de enfriamiento N° 1 (160K y tower tech) es de 4.19 mg/L, 3.54 mg/L, 2.33 mg/L, 1.97 mg/L y 2.94 mg/L, respectivamente; es decir, existe una tendencia decreciente en los últimos cuatro (04) años en comparación al año 2011, encontrándose fuera del rango recomendado 1.0 mg/L a 2.0 mg/L.

El promedio anual del 2011 a 2015 de contenido de Zinc a la salida del sistema de refrigeración de la torre de enfriamiento N° 2 (320K) es de 3.86 mg/L, 3.55 mg/L, 2.52

mg/L, 2.36 mg/L y 3.56 mg/L, respectivamente; es decir, hay una disminución de zinc entre los años 2013 y 2014 en 6.35%; sin embargo, en el 2015 se ve un aumento debido a contaminación de otras áreas colindantes. Los resultados se encuentran fuera de lo recomendado entre 1.0 mg/L y 2.0 mg/L.

En el cuadro N° 1, se observa que las variables que influyeron positivamente en la calidad de la torre de enfriamiento N° 2 fueron el pH, la turbidez, el contenido de zinc (año 2014 resultado bajo de 2.36 mg/L), la velocidad de corrosión, los ciclos de concentración, el ensuciamiento de la celda, la eficiencia y el control microbiológico. Asimismo, el consumo de agua en general (agua de purga, consumo de agua y agua de reposición) dio buenos resultados.

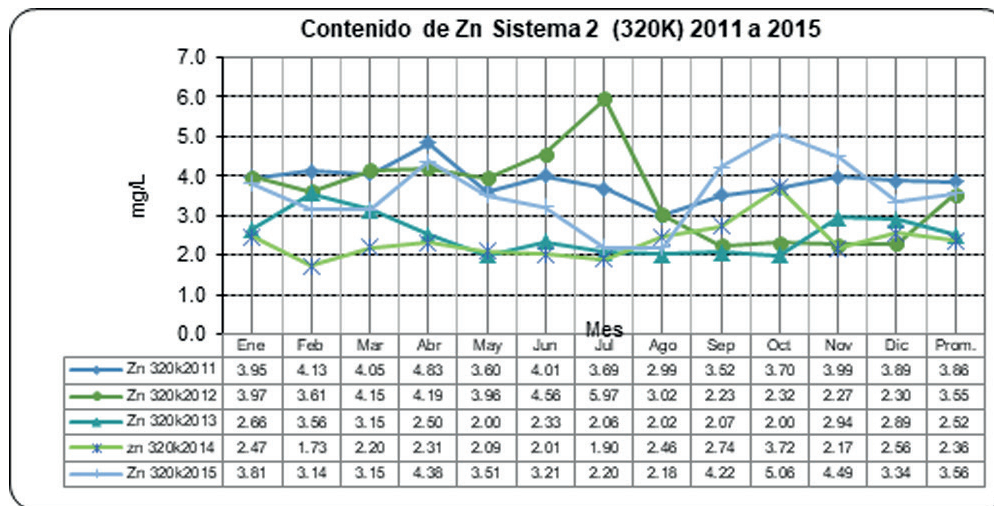


Figura N° 3. Contenido de Zinc Sistema N° 2 (320K), 2011 a 2015

Fuente: Datos obtenidos de GRD y GAV

Cuadro N°1. Resumen de parámetros de medición del sistema N° 2 (320k), antes y después de la optimización

Ítem	Parámetro	Unidad	Límite de especificación PP-VM-Zinc-CJM-UTIL-002	Antes de la Optimización		Después de la Optimización		
				2011	2012	2013	2014	2015
1	Consumo de agua	m³/día		634,919.00	499,146.00	629,172.00	347,019.00	309,1092
2	Agua de Reposición (Make Up)	m³/día	950 - 1900	1,740.49	1,365.57	1,724.07	955.35	851.61
3	Agua de Purga	m³/día	1200	1,667.79	1,294.91	1,647.83	884.74	757.67
4	Eficiencia (OEE)	Porcentaje	95%	87.91	58.50	88.1	90.9	93.27
5	Ciclo de Concentración	Unidades de C.C	2.5 a 4.4	2.35	2.71	2.37	2.48	3.03
6	ΔTemperatura	°C	6°C a 8°C	7.01	6.79	7.33	7.60	9.03
7	Conductividad Eléctrica	uS/cm	< 1400 <1,750 (trasar)	1,183.07	1,241.30	1,191.69	1,428.08	1,643.54
8	Potencial de Hidrógeno	Unidad de pH	7.0 a 10.0	7.63	7.67	7.66	7.67	7.64
9	Turbidez	NTU	< 20	19.03	19.12	18.79	18.25	17.94
10	Dureza Cálctica	mg/L	< 600 mg/L CaCO ₃	464.14	516.40	463.32	538.94	592.12
11	Cloro Residual	mg/L	0.2 - 0.5	0.23	0.22	0.24	0.32	0.31
12	Contenido de Zn a la salida de la torre de enfriamiento	mg/L	1 a 2 mg/L (Disuelto)	3.86	3.55	2.52	2.36	3.56
13	Contenido de Fe en el agua de enfriamiento	mg/L	< 0.80	0.61	0.67	0.64	0.78	0.87
14	Velocidad de Corrosión	mpy	2.0 – 5.0	N/D	N/D	2.45	1.62	2.20
15	Potencial de Redox (ORP)	mv	440 +/-10	N/D	N/D	345.6	451	400
16	Dosis de polímero trazado(*)	ppm	20 a 300	N/D	N/D	21.28	29.40	26.66
17	Dosis de trazar (3DT 198)	ppm	40	N/D	N/D	29.44	43.04	53.57
18	Ensuciamiento (*)	%	50	N/D	N/D	11	7	10.25
19	Microbiológico	UFC	< 104	N/D	< 10000	< 10000	<1000	<100

Fuente: Elaboración propia, según datos del GAV y 3D trasar

(*) https://automation.nalco.com/envision1/_layouts/enVision/SystemDetails.aspx?tab=Files&ID=311382

Cuadro N°2. Resumen de parámetros físicos, químicos e inorgánicos 2011 a 2015

Año	Punto de monitoreo	Ubicación	Coordenadas WGS 84	Normativa Peruana	pH	Sol. Susp. (mg/L)	Cd (mg/L)	Co (mg/L)	Cr (Hex.) (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Pb (mg/L)	Se (mg/L)	Zn (mg/L)
				DS-002-2008-MINAM													
2011	E-04 (WS-3)	Salida de aguas de la Poza de Regantes	8675796N, 0295018E	DS-002-2008-MINAM	6.5-8.5		0.005	0.05	0.1	0.2	1	150	0.2	0.2	0.05	0.05	2
	ws4 (agua residual Industrial)	Efluentes de la refinería a poza de regantes	8675738N, 0294983E	DS-010-2010-MINAM	6.0-9.0	25	0.04		0.08	0.4	1.6				0.2		1.2
	ws4 (agua residual Industrial)	Efluentes de la refinería a poza de regantes (fiscalizable)	8675738N, 0294983E	DS-010-2010-MINAM	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
2012	E-04 (WS-3)	Salida de aguas de la Poza de Regantes	8675796N, 0295018E	DS-002-2008-MINAM	7.74	3.71	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05 (*)	---	---	---	0.01	0.04	0.54
	ws4 (agua residual Industrial)	Efluentes de la refinería a poza de regantes	8675738N, 0294983E	DS-010-2010-MINAM	8.48	6.95	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02 (*)	27.85	1.04	0.01	0.01	0.07	0.36
	ws4 (agua residual Industrial)	Efluentes de la refinería a poza de regantes (fiscalizable)	8675738N, 0294983E	DS-010-2010-MINAM	7.58	9.67	0.03	---	0.01	0.05	0.09 (*)	---	---	---	0.02	---	1.08
2013	E-04 (WS-3)	Salida de aguas de la Poza de Regantes	8675796N, 0295018E	DS-002-2008-MINAM	7.66	5.52	0.01	0.01	<0.01	0.02	0.06 (*)	---	---	0.003	0.20	<0.05	0.42
	ws4 (agua residual Industrial)	Efluentes de la refinería a poza de regantes	8675738N, 0294983E	DS-010-2010-MINAM	8.81	7.93	0.77	0.35	0.01	0.01	0.01 (*)	22.44	1.23	0.003	0.77	0.09	0.15
	ws4 (agua residual Industrial)	Efluentes de la refinería a poza de regantes (fiscalizable)	8675738N, 0294983E	DS-010-2010-MINAM	7.72	16.66	0.02	---	<0.01	0.04	0.08 (*)	---	---	---	0.02	---	1.28
2014	E-04 (WS-3)	Salida de aguas de la Poza de Regantes	8675796N, 0295018E	DS-002-2008-MINAM	7.72	5.52	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04 (*)	---	---	0.01	0.02	0.07	0.44
	ws4 (agua residual Industrial)	Efluentes de la refinería a poza de regantes	8675738N, 0294983E	DS-010-2010-MINAM	9.53	12.38	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02 (*)	32.12	2.68	0.01	0.05	0.19	0.15
	ws4 (agua residual Industrial)	Salida de agua de poza de regantes (fiscalizable)	8675738N, 0294983E	DS-010-2010-MINAM	8.41	15.43	0.01	---	<0.01	0.02	0.06 (*)	---	---	---	0.02	---	0.73
2015	E-04 (WS-3)	Salida de aguas de la Poza de Regantes	8675796N, 0295018E	DS-002-2008-MINAM	7.49	5.38	0.02	<0,01	<0,01	0.01	0.03 (*)	9.09	0.23	0.004	0.01	<0,05	0.38
	E-04 (WS-3)	Salida de aguas de la Poza de Regantes (Fiscalizable)	8675796N, 0295018E	DS-002-2008-MINAM	7.89	N/D	0.013	< 0,00004	< 0,002	0.020	0.213	19.147	0.873	0.001	0.011	0.012	0.50
	ws4 (agua residual Industrial)	Efluentes de la refinería a poza de regantes	8675738N, 0294983E	DS-010-2010-MINAM	9.67	10.03	0.02	<0,01	<0,01	0.01	0.02 (*)	26.44	0.61	0.002	0.01	0.11	0.13
	ws4 (agua residual Industrial)	Efluentes de la refinería a poza de regantes (fiscalizable)	8675738N, 0294983E	DS-010-2010-MINAM	7.92	12.67	0.01	N/D	< 0,002	0.01	0.09 (*)	N/D	N/D	N/D	<0,02	N/D	0.75

(*) Fe Disuelto N/D: No hay data

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro N° 2 se observa que entre los años 2013 a 2015, después de la implementación, los metales pesados de la estación WS-4: Zinc, Pb, Cu y sólidos suspendidos mejoraron en cuanto a los valores de calidad.

3.2. Calidad de los efluentes líquidos: Análisis Microbiológico de las Torres de enfriamiento

Según el reporte de Gestión de Rutina Diaria (GRD) en el 2014, en los meses de octubre y diciembre, el sistema de refrigeración de torre de enfriamiento N° 2 (320K) presentó presencia de bacterias ATV, mas no levaduras y mohos, el consumo de biocida Nalco 7338 fue de 955.50 Kg. En el sistema de refrigeración de torre de enfriamiento N° 2 (320K), en los meses de junio y agosto del 2015, hubo presencia de bacterias ATV en 100 UFC/ml; en el mes de junio del mismo año, hubo presencia de levaduras y mohos

en 10 UFC/ml. El programa 3D trasar Starter controló el estrés causante de incrustación, corrosión y desarrollo microbiológico en sistemas abiertos de refrigeración con recirculación, mediante el Nalco Bio Índice.

3.3. Consumo de agua

El consumo de agua acumulado anual 2011 a 2015 en el sistema de refrigeración de la torre de enfriamiento N° 2 (320K) es de 634,919.00 m³/día y 309,192.00 m³/día respectivamente; es decir, hay una tendencia significativa a disminuir el uso de agua fresca de 51.30%; mientras que en el 2013 a 2015 en el sistema de refrigeración de la torre de enfriamiento N° 2 (320K) es de 629,172.00 m³/día y 309,192.00 m³/día, respectivamente; es decir, hay una tendencia significativa a disminuir el uso de agua fresca a 50.86%.

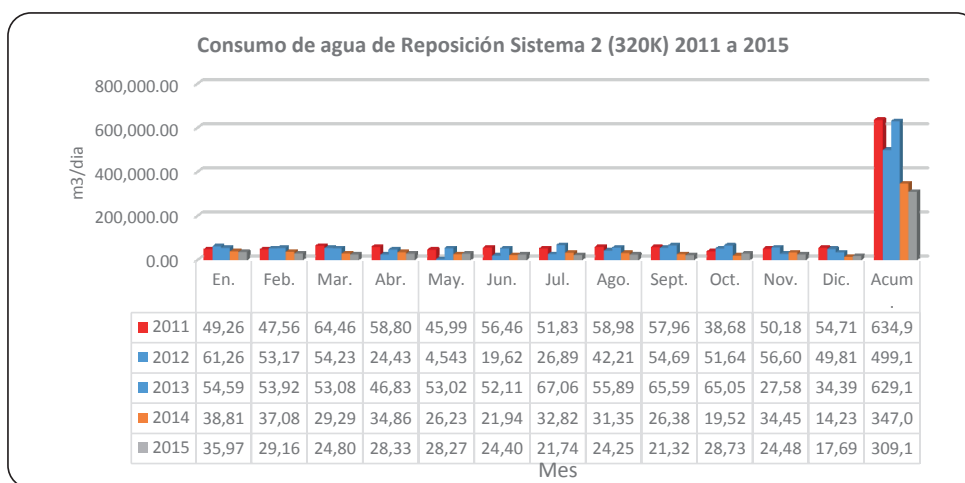


Figura N° 4. Consumo de agua Sistema N° 2 (320K) año 2011 a 2015

Fuente: Datos obtenidos de GRD y GAV

IV. CONCLUSIONES

1. Con el estudio de investigación realizada, se optimizó la torre de enfriamiento N° 2 (320K) de la refinería Cajamarquilla, y consecuentemente se mejoró la calidad del efluente al disminuir el contenido de zinc a la salida de la torre en los años 2013 y 2014 en **6.35 %** de 2.52 mg/L a 2.36 mg/L con un ahorro proyectado anual de US \$ 183,435.57; sin embargo, en el año 2015 el contenido de zinc llegó a 3.56 mg/L, debido a frecuente contaminación externa proveniente de otras áreas.
2. Con la tecnología aplicada, se logró la optimización de la torre de enfriamiento N° 2 (320K) de la refinería Cajamarquilla, y consecuentemente a través del control de purgas se logró una reducción en el consumo de agua de **50.86%** en el periodo 2013 a 2015 de 629,172.0 m³/día a 309,192.0 m³/día; siendo los ciclos de concentración de 2.37 a 3.03. Cabe mencionar que el sistema de refrigeración de la torre de enfriamiento N° 1 (160k, tower tech) en el periodo 2013 a 2015 se vio influenciada con una reducción de uso de agua de 26.99% de 395.284.0 m³/día a 288,614.0 m³/día.

3. Con la aplicación del programa 3D trasar, durante el periodo 2013, 2014 y 2015, se mejoró el agua de aporte (*Make UP*) y el agua de purga (*Blow Down*) de la torre de enfriamiento N° 2 (320K), siendo éste último de 1,647 m³/día, 884.74 m³/día y 757.67 m³/día (31.6 m³/h), respectivamente, como también se controló la dosificación en forma automática de los nuevos productos químicos Nalco 3DT187 y Nalco 3DT198.
4. De los resultados de calidad de los efluentes líquidos, durante el proceso de optimización de la torre de enfriamiento N° 2 (320K), en la estación de muestreo analizada WS-4 (agua residual industrial), no se registraron elementos que representen riesgo ambiental a los pobladores de Jicamarca, siendo el contenido de zinc en los años 2013 al 2015 de 1.28 mg/L, 0.73 mg/L y 0.75 mg/L, respectivamente.

V. AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento al Dr. Miguel Ibáñez Sánchez y al Ing. Jeffry Oyague por su asesoramiento durante todo el proceso de investigación y a las empresas Votorantim Metais, Skanska y Quimtia por hacer posible su implementación.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdulmajeed Saeed Al-Ghamdi. Performance Analysis of Automated Control System for Condenser Water Treatment Unit. *Engineering*. (2012). 4, 55-67 <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2012.41008>. Recuperado de <http://www.SciRP.org/journal/eng>.
2. Ixtepan, G. (2009) Reducción del factor de ensuciamiento en intercambiadores de calor de un solo paso mediante la aplicación de un óptimo tratamiento químico al agua de enfriamiento. Tesis de pregrado. Universidad Veracruzana, Veracruz, México.
3. Calla, H. (2010) Calidad del agua en la Cuenca del río Rímac-Sector de San Mateo, afectado por las actividades mineras. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. UNMSM. Lima.
4. Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales. (2016). Autoridad Nacional del Agua. Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA. Diario El Peruano.

