



**Especialización en Ingeniería Ambiental**

**Trabajo Final Integrador**  
**Indicadores Medioambientales**

**Autor**

**Ingeniero Lucas Fernando Zdut**

**Tutor**

**Mg Ing. Aloma Sartor**

**Bahía Blanca | 19 de junio de 2023**

## Índice

|   |    |
|---|----|
| Introducción .....  | 3  |
| Definición de Indicador Medioambiental .....                              | 4  |
| Funciones y características de los indicadores .....                      | 5  |
| Índices y conjuntos de indicadores .....                                  | 8  |
| Indicadores ambientales en el marco de la norma ISO 14001 .....           | 12 |
| ISO 14001 - Definición .....  | 12 |
| Evaluación de desempeño ambiental en ISO 14001 - Definición .....         | 12 |
| Medición del desempeño ambiental .....                                    | 13 |
| Definición de los KPI ambientales .....                                   | 14 |
| Definición del sistema de estudio .....                                   | 17 |
| Agua de uso industrial .....  | 17 |
| Objetivos de tratamiento .....  | 18 |
| Definición de las variables de seguimiento .....                          | 19 |
| Tratamiento químico aplicado .....  | 24 |
| Pretratamiento del agua cruda .....                                       | 25 |
| Sistema de enfriamiento .....   | 26 |
| Funcionalidad de los aditivos químicos empleados .....                    | 27 |
| Inhibidores de corrosión .....  | 27 |
| Agentes de control de depósitos .....                                     | 28 |
| Biocidas .....  | 28 |
| Clarificación y Floculación .....   | 29 |
| Parámetros de control y monitoreo .....                                   | 30 |
| Importancia de las propiedades fisicoquímicas y técnicas analíticas ..... | 30 |
| pH .....  | 30 |
| Conductividad .....   | 31 |

## Indicadores Medioambientales

|  |    |
|--|----|
| Turbidez.....                            | 31 |
| Alcalinidad total.....                   | 31 |
| Durezas .....                            | 32 |
| Fosfato total y ortofosfato .....        | 32 |
| Cloro libre y total.....                 | 32 |
| Nitrógeno amoniacal .....                | 33 |
| Control microbiológico por cultivo ..... | 33 |
| Aplicación sobre un sistema .....        | 34 |
| Agua cruda.....                          | 34 |
| Sistema de enfriamiento.....             | 38 |
| Conclusión .....                         | 50 |
| Bibliografía.....                        | 52 |

## Introducción

El presente trabajo tiene por objetivo la revisión de la definición de “indicador medioambiental”, su aplicación sobre sistemas de estudio y su compatibilidad con la Norma ISO14001.

Para tal fin, se revisará las definiciones proporcionadas por distintos entes y/o autores. Evaluando las características principales que son necesarias para la conformación de un indicador, la utilidad práctica de los mismos sobre los sistemas.

La capacidad de identificar de manera adecuada los indicadores del entorno es fundamental para tomar mejores decisiones; una elección incorrecta de la información o una pobre comprensión de lo que significa el indicador puede llevarnos a interpretaciones y acciones equivocadas. Por ello, es importante enfatizar que un indicador es una herramienta y no un fin mismo.

Los indicadores se emplean en todos los ámbitos del quehacer humano; aunque éstos varían en su grado de complejidad y relación con el fenómeno al que se refieren; desde sencillos, como el color de una fruta que sirve para evaluar su grado de madurez, hasta más sofisticados, como la concentración de agentes inmunológicos para detectar cáncer.

El estudio se enfocará sobre el recorrido del agua dentro de los sistemas que componen una planta de producción (Sistemas de generación de vapor, Sistemas de enfriamiento, etcétera), por ejemplo, cualquiera de las instaladas en el polo petroquímico local.

A través del estudio de los sistemas, se determinarán las variables que significativamente pueden generar un impacto en el efluente final de cada sistema. Por medio de la interpretación de estas variables se buscará establecer un indicador que pueda brindar claridad en la evaluación de la calidad de este.

## Definición de Indicador Medioambiental

Aunque no se tenga plena conciencia de ello, en prácticamente todas las actividades que involucran decisiones se utilizan indicadores.

La definición formal de indicador involucra las siguientes características:

- Relativo a indicar.
- Dar a entender o significar una cosa con indicios o señales.
- Señalar, advertir, manifestar, apuntar, mostrar.

En el campo ambiental se han desarrollado indicadores para entender, describir y analizar distintos fenómenos como el clima, la pérdida de suelos y el riesgo de especies, entre muchos otros. Si bien el uso de indicadores ambientales se ha extendido, no existe una definición única del concepto y éste varía de acuerdo con la institución y a los objetivos específicos que se persiguen.

Una de las definiciones más conocida y aceptada proviene de la **Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)**<sup>1</sup>, que desde hace varios años utiliza un conjunto de indicadores como información base para realizar evaluaciones periódicas del desempeño ambiental de los diferentes países que integran la organización. Según la OCDE, *un indicador ambiental es un parámetro o valor derivado de parámetros que proporciona información para describir el estado de un fenómeno, ambiente o área, con un significado que va más allá del directamente asociado con el valor del parámetro en sí mismo.*

Para **The Florida Center for Public Management**<sup>2</sup>, institución que desarrolló un sistema de indicadores con el fin de asesorar a las dependencias ambientales de la Unión Americana, *un indicador ambiental es un elemento que describe, analiza y presenta información científicamente sustentada sobre las condiciones y tendencias ambientales y su significado.*<sup>3</sup>

Por su parte, el **Ministerio del Ambiente de Canadá** lo define como una estadística o parámetro que, monitoreado a través del tiempo, proporciona información de la tendencia

---

<sup>1</sup> La OCDE, fundada en 1961 y con sede central en París, es un organismo de cooperación internacional compuesto por 38 estados. El objetivo de la organización es coordinar sus políticas económicas y sociales, el intercambio de información para maximizar su crecimiento económico y colaborar a su desarrollo y al de los países no miembros.

<sup>2</sup> The Florida Center for Public Management es una institución fundada alrededor de 1991, forma parte de la Escuela de Administración Pública Askew de la Universidad Estatal de Florida. La principal función de la institución es la de ser un recurso global para el mejoramiento de la gestión, el liderazgo y la eficacia organizativa.

<sup>3</sup> The Florida Center for Public Management, 1998.

o las condiciones de un fenómeno más allá de la que se asocia a la estadística en sí misma. En particular, precisa que los indicadores ambientales son estadísticas claves seleccionadas que representan o resumen un aspecto significativo del estado del ambiente, la sustentabilidad de los recursos naturales y su relación con las actividades humanas.<sup>4</sup>

Cabe señalar que frecuentemente se utilizan las palabras “*parámetro*” e “*índice*” como sinónimos de indicador, sin embargo, no tienen el mismo significado:

- *Un parámetro se define como cualquier propiedad que es medida u observada.*
- *Mientras que un índice designa a un conjunto agregado o ponderado de parámetros o indicadores.*<sup>5</sup>

### **Funciones y características de los indicadores**

La importancia de los indicadores reside principalmente en el uso que se puede hacer de los mismos. Idealmente, deben ayudarnos a esclarecer un tema y a descubrir las relaciones entre sus componentes, de esta manera, con la información generada se puede proceder a la toma de decisiones por parte de los usuarios.

Adicionalmente, son una excelente herramienta de información al público, porque acompañados por una buena estrategia de comunicación ilustran conceptos e información científica de una forma más amigable y fácil de comprender.

Según la OCDE en su publicación de 1998, las dos funciones principales de los indicadores ambientales son:

1. *Reducir el número de medidas y parámetros que normalmente se requieren para ofrecer una presentación lo más cercana posible a la realidad de una situación.*
2. *Simplificar los procesos de comunicación.*

Estas funciones básicas convierten a los indicadores en el instrumento mediante el cual se proporciona información concisa y sustentada científicamente a diversos usuarios, tomadores de decisiones y al público en general de manera que pueda ser entendida y usada fácilmente.

---

<sup>4</sup> Environment Canada, 1995.

<sup>5</sup> OCDE, Boletín 2001.

No obstante, para que los indicadores cumplan cabalmente con estas funciones es necesario que tengan ciertas características<sup>6</sup>:

- Ofrecer una visión de las condiciones ambientales, presiones ambientales y respuestas de la sociedad o gobierno.
- Ser sencillos, fáciles de interpretar y capaces de mostrar las tendencias a través del tiempo.
- Responder a cambios en el ambiente y las actividades humanas relacionadas.
- Proporcionar una base para las comparaciones internacionales (cuando sea necesario).
- Ser aplicables a escala nacional o regional, según sea el caso.
- De preferencia, tener un valor con el cual puedan ser comparados.
- Estar teórica y científicamente bien fundamentados.
- Estar basados en consensos internacionales.
- Ser capaces de relacionarse con modelos económicos y/o de desarrollo, así como con sistemas de información.
- Estar disponibles con una razonable relación costo/beneficio.
- Estar bien documentados y gozar de calidad reconocida.
- Ser actualizados a intervalos regulares con procedimientos confiables.

Como resultado de la experiencia de las distintas etapas en el desarrollo de indicadores, se reconocen las tres primeras características como criterios básicos.

El primero se refiere a que deben proporcionar la suficiente información de las condiciones ambientales, presiones ambientales y respuestas para entender claramente el fenómeno que se está tratando, de tal manera que las decisiones que se tomen estén sustentadas.

El valor de los indicadores descansa precisamente en la premisa de que un mayor entendimiento de un fenómeno o proceso conduce a mejores decisiones. Cabe recordar que una de las justificaciones para el uso de indicadores señala que es imposible medir todo, por lo que resulta fundamental contar con la información más relevante.

El segundo criterio está relacionado con el aspecto de la sencillez, lo cual no implica necesariamente que el indicador sea “simplista”. Detrás de la selección y definición de

---

<sup>6</sup> OCDE, *Boletín 1998*.

cada indicador debe existir un análisis profundo y con frecuencia complejo.

No obstante, cuando se presente a sus usuarios, el indicador debe cumplir su misión principal de comunicar su mensaje de forma clara y objetiva. Esto representa un reto, ya que siempre existe la disyuntiva entre incorporar los detalles técnicos y la formalidad y rigor de los análisis o bien omitirlos para facilitar su interpretación<sup>7</sup>.

El tercer criterio, hace referencia a la necesidad de responder a cambios en el ambiente y las actividades humanas. Esta característica, ha sido particularmente útil en la identificación de los indicadores. Con frecuencia, al analizar un fenómeno ambiental se presenta un cierto número de variables importantes para comprender la magnitud o distribución de este. Sin embargo, cuando se obtiene una respuesta negativa a la pregunta “¿este indicador responde a un posible cambio en las políticas?”, entonces se está presentando información de contexto o complementaria que, si bien puede ser muy importante para entender el fenómeno, no constituye un indicador. Un ejemplo es la precipitación pluvial en el análisis de disponibilidad del agua en una región. La cantidad de lluvia que cae en una zona es fundamental para entender la dinámica del fenómeno, así como en el establecimiento de políticas y acciones, pero no responde a la política de gestión del líquido. En este sentido, es recomendable que, junto con los indicadores, se proporcione información de contexto o adicional que contribuya a un entendimiento más claro de lo que se intenta describir con el indicador.

Adicionalmente, la OCDE destaca la importancia de la realización de comparaciones internacionales. Es fundamental en este aspecto, que los métodos de obtención de los datos cumplan procedimientos reconocidos, documentados y de preferencia estandarizados. De esta manera, la comparación de indicadores será posible y confiable, a través de cualquier entidad como en cualquier país y/o región.

Se debe considerar la escala en la confiabilidad o pertinencia de los indicadores, lo más recomendable es considerar el desarrollo de indicadores de nivel regional, estatal, nacional e internacional. De esta manera, se evitan errores de apreciación cuando se cambia el nivel territorial de análisis.

Es muy importante contar con un valor con el cual se pueda comparar el indicador, de esta forma se podría evaluar con claridad los desempeños. Sobre todo, si la principal función de este es la de medir el avance de políticas y/o programas concretos.

---

<sup>7</sup> *Adriaanse, 1993.*



De los criterios restantes, se reconocen como fundamentales el que un indicador debe estar teórica y científicamente bien fundamentado, que exista información disponible y que sea actualizado de manera periódica. Los demás criterios sólo se consideran deseables.

Otras instituciones y organizaciones han propuesto también criterios para evaluar los indicadores. Por ejemplo, la **Academia Nacional de la Ciencia de los Estados Unidos**<sup>8</sup> propone algunos puntos que pueden ser usados para evaluar la importancia potencial de un indicador (sus características, aplicabilidad y limitaciones). Sugiere que estos aspectos se expresen en forma de preguntas durante el proceso de selección y formulación de indicadores<sup>9</sup>, complementando la lista anterior:

1. **Importancia general:** ¿El tema es relevante? ¿El indicador provee información acerca de los cambios o procesos de relevancia?
2. **Base conceptual:** ¿Se basa en un modelo conceptual aceptado, bien entendido y con buen sustento científico?
3. **Confiabilidad:** ¿Ha probado su utilidad en otros sistemas de indicadores?
4. **Escala espacial y temporal:** ¿Tiene suficiente resolución espacial o temporal para evaluar cambios o situaciones?
5. **Propiedades estadísticas:** ¿Es suficientemente robusto como para distinguir entre variabilidad natural o la atribuible a la medición del comportamiento real del fenómeno en estudio?
6. **Requerimiento de información:** ¿Los datos que se requieren para documentar el indicador se pueden obtener y ser confiables?
7. **Calidad de los datos:** ¿Existe información clara de cómo fue obtenida la información (método de cálculo, instrumento utilizado, etc.)?

### Índices y conjuntos de indicadores

Cuando se utiliza un parámetro o indicador para describir la situación de un tema, puede ocurrir que este no refleje bien la condición del sistema o la simplifique, resultando en ocasiones inútil para la toma de decisiones. Por ello, a menudo se recurre a la elaboración de índices y conjunto de indicadores.

---

<sup>8</sup> La Academia Nacional de Ciencias (NAS, por sus siglas en inglés) es una corporación estadounidense cuyos miembros sirven pro bono como consejeros a la nación en ciencia, ingeniería y medicina. La institución edita la revista científica *Proceedings of the Academy of Sciences*.

<sup>9</sup> National Academy of Sciences, 2003.

En temas complejos, como el ambiental, la elaboración y utilización de índices es muy atractiva porque permite una visión general de la situación del ambiente.

Algunos de los índices más conocidos que tratan de evaluar la sustentabilidad ambiental son:

- *Índice del Planeta Viviente (Living Planet Index)*

El índice IPV pretende evaluar el estado de la biodiversidad mundial a partir de la medición de las tendencias en las poblaciones de diferentes especies de vertebrados que habitan ambientes terrestres, marinos y dulceacuícolas. Se considera como una señal del deterioro del ambiente natural.

- *Huella Ecológica (Ecological Footprint)*

Este indicador, mide el consumo de recursos naturales y los compara con la capacidad natural de renovación de estos recursos. La HE de un país es la cantidad de área requerida para producir alimentos e insumos necesarios, así como para absorber los desechos de su consumo de energía.

- *Índice de Desempeño Ambiental (Environmental Performance Index)*

Por sus siglas en inglés EPI, es un método para cuantificar y clasificar numéricamente el desempeño ambiental de las políticas de un país. El EPI fue precedido por el Índice de Sostenibilidad Ambiental (Environmental Sustainability Index, siglas ESI), publicado entre 1999 y 2005. Ambos indicadores fueron desarrollados conjuntamente por las universidades de Yale y Columbia<sup>10</sup>.

El gran reto de los índices es el de convencer a los diferentes actores, de que sus evaluaciones en verdad reflejan la situación real. Las críticas más frecuentes se concentran en tres aspectos:

1. Los criterios y razones para seleccionar los temas y las variables que se incluyen en el índice.
2. La forma de integrar estas variables (esto es, los algoritmos utilizados).

---

<sup>10</sup> Ambos indicadores fueron desarrollados por el Centro de Política y Ley Ambiental de la Universidad de Yale, en conjunto con la Red de Información del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Columbia. El ESI fue desarrollado para evaluar la sostenibilidad relativa entre países. Debido a cambios en el enfoque del equipo de investigación que desarrollo el ESI, el nuevo índice EPI utiliza indicadores orientados hacia los resultados, por lo que sirve como índice de comparación, permitiendo así una mejor comprensión por parte de políticos, científicos, defensores del medio ambiente y público en general.

3. La heterogeneidad y los problemas con la calidad de información en el caso de los índices que pretenden incorporar muchos temas o hacer comparaciones entre países.

Aunque puede resultar paradójico, en el sentido de que los índices están orientados a simplificar sistemas complejos, para una correcta interpretación de los mismos es necesario conocer tanto la forma y criterios utilizados en su elaboración como sus limitaciones.

La OCDE, en un trabajo presentado en el 2001 estableció una clasificación en el desarrollo de los índices, generando cuatro grupos:

1. Los basados en las ciencias naturales (DBO o índice de toxicidad).
2. Los índices para la evaluación de políticas, que en general están ligados a aspectos normativos o metas políticas.
3. Los índices basados en un marco de cuentas nacionales, donde la agregación se alcanza asignando valores monetarios a las variables que generalmente no tienen precio.
4. Y los índices sinópticos, que mediante un conjunto muy reducido de valores pretenden ofrecer una visión sintética de un aspecto complejo.

Otra alternativa para la elaboración de índices, es la construcción de grupos y/o conjuntos de indicadores que puedan brindar, al revisarse de manera conjunta, una mejor y más clara evaluación del sistema.

Cabe aclarar a esta altura, la posibilidad de incurrir en errores al sacar conclusiones a partir de los resultados de un solo indicador. Por ejemplo, la observación de una reducción en la generación de basura por habitante no implica necesariamente que se esté avanzando en el cuidado del ambiente. Ya que este resultado podría ser la consecuencia de una menor capacidad de compra de los individuos derivada de una disminución en los ingresos per cápita, o visto desde otro punto de vista, un mayor desempleo.

Considerando lo anteriormente expuesto, los sistemas de indicadores sobre un sistema particular están determinados por requerimientos distintos:

- Proveer información clave para dar una imagen clara y completa acerca del estado actual del sistema o fenómeno.

## Indicadores Medioambientales

- Proporcionar suficiente información para la toma de decisiones, permitiendo dirigir al sistema hacia los objetivos seleccionados y determinar el nivel de éxito de las acciones puestas en práctica.

En otras palabras, los grupos están determinados tanto por el sistema mismo como por los intereses, necesidades y objetivos que se persiguen. Llevar a cabo ésta tarea requiere de un conocimiento lo más amplio posible de las dinámicas y conceptos relativos a los fenómenos ambientales. Además, se debe tener claridad en los objetivos, intereses y necesidades que se pretenden alcanzar y monitorear con la ayuda de los indicadores desarrollados.<sup>11</sup>

En otras palabras, la selección y definición de los indicadores que se deben incluir en un conjunto dependerá de los objetivos que se persigan. En el caso de los indicadores ambientales, además de contar con el conocimiento de lo relacionado al sistema (funcionamiento del sistema, objetivos, intereses y necesidades) es necesario comprender ampliamente las necesidades políticas. La clave de un buen conjunto de indicadores es encontrar una opción práctica para definir políticas, instrumentar programas, decretar normas y asignar presupuestos. En todo caso, el primer paso para definir conjuntos de indicadores es establecer prioridades con base en las políticas ambientales.

La utilidad de los indicadores es incuestionable, sin embargo, esto no significa que sean perfectos. En el mejor de los casos reflejan una parte de la realidad, obteniendo de ellos una abstracción de los sistemas y el conocimiento que poseemos de los mismos. No obstante, siguen siendo la mejor herramienta disponible para la evaluación y la toma de decisiones sobre un sistema.

Una de las maneras de avanzar en el perfeccionamiento de los índices y sistema de indicadores es identificando alguna de sus fallas comunes:

- Se debe evitar la excesiva simplificación de los temas, lo que puede conllevar a una malinterpretación del fenómeno.
- La integración de índices puede provocar resultados tan abstractos que dificulten la comprensión del resultado y/o el sistema. Se debe considerar como regla, que no necesariamente un conjunto mayor de elementos resultará en un mejor indicador.

---

<sup>11</sup> *Modelamiento y simulación, Hartmun Bossel (1996).*

- El proceso de identificación de indicadores debe reflejar las necesidades del grupo receptor de la información y no estar basados únicamente en la experiencia particular de quienes los elaboran.
- Es importante que los indicadores sean flexibles y puedan ser revisados periódicamente. En caso de ser necesario deberán ser modificados, transformados o sustituidos para reflejar mejor las condiciones y tendencias del tema, y de esta forma, mantener su utilidad.

Es importante remarcar, que para que un sistema de indicadores realmente cumpla su función debe existir asociado a él un sistema de información que asegure contar con datos para las actualizaciones y un equipo que continuamente revise esa información.

## **Indicadores ambientales en el marco de la norma ISO 14001**

### **ISO 14001 - Definición**

ISO 14001 es un estándar internacionalmente aceptado que indica cómo poner un sistema de gestión ambiental efectivo en su sitio. Está diseñado para ayudar a las organizaciones a mantenerse comercialmente exitosas sin pasar por alto sus responsabilidades medioambientales. Es decir, un sistema 14001 debería proporcionar el marco para permitir el cumplimiento de las expectativas de los clientes en cuanto a la responsabilidad corporativa, así como los requerimientos regulatorios y legales.

### **Evaluación de desempeño ambiental en ISO 14001 - Definición**

A pesar de haber sido definida por otros instrumentos de control, es a partir de la norma ISO 14001 que la evaluación del desempeño ambiental (EDA, o EPR por sus siglas en inglés) adquiere su dimensión, sus directrices y su metodología asociada. Según la norma, *una EDA se define como como el resultado medible del Sistema de Gestión Ambiental (SGA)*, relacionado con el control de los aspectos ambientales de una organización, con base en su política, objetivos y metas.

Se observa claramente una distinción fundamental basada en el alcance del concepto, ya que la definición de la ISO 14001 no se limita a los resultados provenientes del SGA implementado, sino a la gestión ambiental de una organización, tenga o no un SGA formal implementado.

Las tres etapas principales contempladas, por la norma, para la Evaluación del Desempeño Ambiental son:

- **Evaluación de la planificación del rendimiento medioambiental:** En esta fase se incluye la selección de los indicadores a evaluar y la determinación de los siguientes factores.
  1. Aspectos ambientales pertinentes bajo el control de la organización.
  2. Criterios de comportamiento ambiental.
  3. Perspectivas de las partes interesadas.
- **Ejecución:** Utilización de los datos y la información original. Esta integra cuatro pasos fundamentales.
  1. Obtención de datos originales.
  2. Análisis y conversión de datos.
  3. Evaluación de la información.
  4. Registro y comunicación.
- **Evaluación del Desempeño Ambiental:** Entre los beneficios más relevantes de la Evaluación del Desempeño Ambiental podemos mencionar.
  1. Contribuye a la plena comprensión del impacto ambiental de la organización.
  2. Aporta una base para el desempeño ambiental y operacional.
  3. Permite identificar oportunidades de mejora de la gestión ambiental.
  4. Verifica el cumplimiento de los objetivos del sistema y de los requisitos legales.
  5. Determina el uso adecuado de los recursos y define tendencias sobre el desempeño ambiental.
  6. Aumenta la conciencia ambiental de los empleados y otras partes interesadas.
  7. Mejora la relación de las partes interesadas, esencialmente con la comunidad.

### Medición del desempeño ambiental

Los indicadores se constituyen en herramientas esenciales asociadas con la medición del comportamiento medioambiental de una organización, no solamente como instrumentos aislados, sino también integrados a la aplicación de determinados modelos de desempeño.

En el contexto de negocios, existen tres métodos para medir el desempeño ambiental:

1. **Los modelos conceptuales para seleccionar indicadores:** se hace uso de diferentes tipos de indicadores, como medidas físicas de volumen y masa, medidas de eficiencia, medidas para los clientes, entre otras.
2. **Modelos conceptuales para medir el desempeño:** estos ya contienen diferentes tipos de indicadores.
3. **Modelos matemáticos para medir el rendimiento:** estos métodos pueden ser muy difíciles de implementar para los administradores del sistema, y los resultados pueden ser difíciles de comunicar e informar.

Igualmente, la norma asume tres categorías de indicadores de desempeño ambiental:

1. **Indicadores de Desempeño de Gestión:** estos indicadores permiten una evaluación de los esfuerzos, decisiones y acciones tomadas por la Dirección o Gerencia a nivel de la planificación, administración y toma de decisiones para mejorar el desempeño ambiental.
2. **Indicadores de comportamiento operacional:** estos indicadores permiten evaluar el desempeño ambiental de las actividades operacionales de la organización, tales como instalaciones físicas, equipos, etc.
3. **Indicadores de estado del medio ambiente:** tienen por objeto proporcionar información sobre el estado del medio ambiente, regional, nacional o mundial, pero no constituyen una medida de impacto ambiental. Son indicadores que reflejan las condiciones de calidad ambiental en el área circundante a la organización.

La evaluación del Desempeño Ambiental en ISO 14001, más allá de cumplir con el requisito de la norma, permite obtener una visión clara sobre el rendimiento del sistema y el cumplimiento de los requisitos.

### Definición de los KPI ambientales

Es natural creer que la definición de un KPI ambiental variará en función de la actividad económica que se desarrolle en las diferentes organizaciones. El abordaje del problema puede ser realizado utilizando una variedad de métodos que resulten compatibles con el Sistema de Gestión Ambiental.

Los KPI (*Key Performance Indicator*), suelen ser definidos en la etapa de planificación del proyecto por la Dirección o Gerencia. El objetivo por supuesto, es contar con instrumentos adecuados para medir la eficacia del Sistema de Gestión Ambiental, y así, reducir el impacto ambiental negativo resultante de la operación de la organización.

Para esto es preciso tener en cuenta algunas consideraciones antes de definir los principales KPI ambientales, sobre todo en organizaciones del sector industrial, que tienen altos impactos ambientales:

- ¿Cómo opera la organización?
- ¿Qué tipo de productos y servicios ofrece?
- ¿Cómo se gestiona la cadena de suministro?
- ¿Existen protocolos establecidos para el reciclaje de residuos?
- ¿El proceso productivo genera emisiones de carbono?
- ¿Se reciclan los envases o empaques una vez que se entrega el producto?

De acuerdo con estas consideraciones, y teniendo en cuenta lo determinado por la ISO 14001 podemos definir 4 grupos principales de KPI ambientales.

- 1) Uso de recursos naturales
  - a. Agua, energía eléctrica, gas, combustibles fósiles, u otro tipo de combustible.
  - b. Cantidad de papel utilizado en el proceso de producción, empaque o embalaje.
- 2) Emisiones y residuos al aire, a la tierra o al agua
  - a. Partes contaminantes tomadas por millón de medidas (ppm).
  - b. Peso de los materiales vertidos.
- 3) Incidentes reales y/o potenciales que impacten en el medio ambiente
  - a. Cantidad de incidentes reales.
  - b. Número de incidentes potenciales.
  - c. Tiempo perdido debido a la ocurrencia de incidentes reales.
- 4) Medidas proactivas
  - a. Medidas de reducción de riesgos implementadas.
  - b. Puntuación entregada por auditoría ambiental.

Cada actividad o negocio es diferente y, por ello, hace uso de procesos diferentes que afectan en mayor o menor grado al medioambiente. Por esta razón, los KPI deben ser



## Indicadores Medioambientales

seleccionados con sumo cuidado, dependiendo del proceso sobre el que actúen y la relevancia que tenga la medición.

## **Definición del sistema de estudio**

En esta parte del trabajo, se procederá a la descripción del sistema de estudio. Se considerará el uso del agua en un complejo industrial, estudiando las particularidades de los sistemas dónde el fluido se ve involucrado.

Dentro de cualquier proceso de producción, el agua cumple diferentes funciones, y puede ser utilizada para la producción de vapor como para enfriamiento de los sistemas.

La elección del agua como caso de estudio no es de carácter azaroso y se sustenta en el hecho de que los efluentes finales de las industrias, independientemente de su objetivo de producción, está conformados en su mayoría por corrientes residuales de agua. Debido a esto, es necesario su estudio y caracterización, para entender la calidad del vuelco que se está realizando al medio. El estudio de las características del vuelco se realizará a través de indicadores, que nos proporcionaran la información necesaria para comprender si se cumple con la legislación asociada al vuelco de efluentes.

## **Agua de uso industrial**

En la industria, el agua es un recurso fundamental involucrado como parte integral del proceso productivo. Esta se considera tanto un derecho como una responsabilidad, y tiene valor económico, social y ambiental.

En ese sentido, el tratamiento que conlleve debe cumplir con los requisitos impuestos en cada sistema que se aplique, cumpliendo con las expectativas operativas a la que preste servicio.

Dentro de un predio industrial se pueden llevar a cabo diferentes programas de tratamiento, orientados hacia el pretratamiento de aguas crudas, sistemas de enfriamiento cerrados y abiertos con recirculación (torres de enfriamiento), y abocados a sistemas de generación de vapor (calderas). Estos presentan características operativas y necesidades diferentes. A pesar de las metas que se deben cumplir en cada uno son similares, estas diferencias implican que el diseño del tratamiento sea único. Es por ello que resulta fundamental comprender la dinámica de cada uno, así como los principales parámetros que aportan al control y diagnóstico de funcionamiento.

## Objetivos de tratamiento

En general, los programas de tratamiento de agua en sistemas de enfriamiento abordan tres fenómenos físicos conectados en simultaneo. Esto se debe a que la relación entre ellos, debido a que representan una causalidad complementaria como se describe en la figura a continuación:



Figura 1. Diagrama de interrelación de problemas típicos en sistemas de enfriamiento.

- i. *La corrosión puede generar sitios activos para la proliferación microbiana, la cual en ciertas condiciones de operación genera corrosión debido a los residuos metabólicos que producen los microorganismos.*
- ii. *La deposición genera corrosión al provocar celdas diferenciales de concentración de oxígeno. Por otro lado, la deposición puede ser causada por la acumulación de productos de corrosión.*
- iii. *De manera semejante, la deposición genera sitios de crecimiento favoreciendo la contaminación microbiana. Mientras que los cúmulos de microorganismos capturan partículas disueltas generando incrustaciones y ensuciamiento.*

## Definición de las variables de seguimiento

### *Corrosión*

En carácter práctico, se puede definir la corrosión como el desgaste de un metal causado por reacción con el medio que lo rodea, provocando que el hierro, componente principal del equipamiento de los sistemas regrese a su forma química más estable (óxido férrico, estado natural del hierro).

Los sitios de reacción, donde el hierro se “oxida”, se desarrollan a partir de irregularidades en la superficie, tensiones de soldadura, impurezas o diferencias en la composición de la superficie del metal entre otras. Generalmente, este fenómeno se observa como adelgazamiento de las superficies o picado (pitting) en la base metálica. Cabe observar, que los productos de la corrosión pueden migrar y depositarse en otras áreas, dando lugar a la observación del fenómeno en diferentes partes del sistema.

Aunque los productos de corrosión suele ser un producto indeseado, se puede utilizar la conversión del óxido como una forma de pasivación, tal como se verá en los tratamientos de los sistemas de generación de vapor.

La severidad de la corrosión depende de distintos factores que sirven para comprender y programar el tratamiento adecuado. Así mismo, muchos de estos factores son parte clave del diseño de los sistemas.

*A ésta altura, encontramos el primer punto de contacto con la definición de los indicadores medio ambientales. Debemos entender que el agua sirve de medio de contacto (se comporta como un electrolito) y de transporte de los productos del efecto de la corrosión (por medio de la disolución de los mismos en él medio), es que finalmente la misma se convierte en un efluente (residuo) de los sistemas. Por lo que, su caracterización y seguimiento de las variables (aunque en su definición parezcan sencillas), constituye una herramienta de gran valor para entender qué tipo de agua se está enviando al vuelco y como ésta puede impactar sobre el cuerpo receptor.*

A continuación, se describen factores y su influencia sobre la tasa de corrosión:

➤ *Concentración de oxígeno disuelto*

Es el componente principal en las reacciones electroquímicas que se generan sobre la superficie del metal, a mayor disponibilidad se observará un deterioro más rápido.

Dentro de los sistemas de generación de vapor se presenta como un factor de interés debido a que un exceso del mismo, genera compuestos abrasivos dentro del circuito.

➤ *Temperatura*

Generalmente la tasa de corrosión se duplica por cada 10°C de aumento de la temperatura del agua.

➤ *pH*

En el caso de esta variable, cuanto más bajo sea su valor, mayor será la tendencia a la corrosión. En los sistemas de vapor, la solubilidad de las sustancias depende directamente de la variable, por lo que un pH bajo impide la formación de óxidos pasivantes, además de la aceleración de los procesos de corrosión.

➤ *Sólidos disueltos-Conductividad*

La corrosión es un fenómeno electroquímico que se basa en la transferencia de electrones. Por lo tanto, un alto contenido iónico proporciona una mayor transporte y por ende, provoca una mayor tendencia hacia la corrosión.

➤ *Dosificación de cloro y/o hipoclorito de sodio*

En la mayoría de los sistemas de enfriamiento se utiliza cloro y/o hipoclorito de sodio como biocida oxidante, la dosificación se justifica en la capacidad de eliminación de microorganismos presentes en el sistema. Sin embargo, un exceso de este componente provoca un medio agresivo proliferando la corrosión en diversos puntos del sistema.

### *Deposición*

Los depósitos pueden generarse internamente como precipitados, establecerse como productos de la corrosión, transportados o presentarse en el sistema desde fuentes externas (grasas, aceites, arenas, impurezas).

Las principales consecuencias que generan son:

- En los sistemas de enfriamiento se podría generar una reducción en la eficiencia de la transferencia de calor. También se podría observar una disminución en la capacidad de transporte en tuberías, y/o formación de celdas de concentración provocando corrosión en la superficie.
- En sistemas de generación de vapor las acumulaciones pueden causar sobrecalentamiento en calderas o limitar la circulación dentro de las tuberías.

Las condiciones que promueven la formación de depósitos se pueden encontrar en los flujos lentos de agua o intermitentes, en los cambios de temperatura dentro de los equipos, excursiones frecuentes de pH, o en superficies rugosas o irregulares entre otras razones.

### *Ensuciamiento microbiano*

Los sistemas de enfriamiento proveen las condiciones óptimas para el crecimiento microbiano, esto se debe al rango de pH operativo y a la disponibilidad de nutrientes necesarios para su desarrollo. El tipo de microorganismos que se pueden encontrar en los sistemas se clasifican en dos grupos:

- i. Los **organismos planctónicos**, clasificación dada a los que se encuentran suspendidos en el medio.
- ii. Los **organismos sésiles**, clasificación dada a las poblaciones que prefieren la adherencia a las superficies, lo que los hace responsables de la formación de biopelículas o biofilms (*que consiste en células microbianas y material oculto debajo de una capa protectora compuesta por una matriz polimérica compleja*).

Si el ensuciamiento microbiano no es controlado, se promueve una serie de problemas característicos de los sistemas de enfriamiento:

- Un desarrollo no controlado puede interferir con el desempeño de los equipos.
- Se debe asumir el compromiso de aumentar el riesgo de ser un caldo de cultivo para las enfermedades transportadas por el aire, siendo la Legionela<sup>12</sup> la más característica.

---

<sup>12</sup> Legionela es el nombre común del **género Legionella**, que agrupa bacterias Gram negativas con forma de bacilo. Viven en aguas estancadas con una amplia gama de temperatura, preferiblemente superior a 35°C. Su crecimiento se ve favorecido por la presencia de materia orgánica. Poseen respiración aerobia y un flagelo para desplazarse. Dentro de

Entre los organismos de mayor interés para el desarrollo de un tratamiento, se encuentran las bacterias, debido a la inmensa variedad de tipos existentes y su capacidad de supervivencia en un amplio rango de condiciones ambientales.

Cada tipo de bacteria causa un efecto de corrosión diferente, en función de su reacción metabólica e interacción con el ambiente. Entre los principales factores que aumenta la capacidad corrosiva de las bacterias se encuentra la temperatura, las concentraciones de oxígeno, el tipo de tratamiento químico aplicado al sistema y el pH.

Un caso de interés, y prioritario en su control, son las bacterias sulfatoredutoras. Son organismos anaerobios que sobreviven bajo depósito. Su ataque es de tipo activo y para su crecimiento se requiere la presencia de sulfatos y/o sulfitos en el sistema. Pueden tolerar temperaturas de hasta 80°C y un rango de pH de 5 a 9.

### **Sistemas monitoreados**

Como se describió con anterioridad, se tomará el camino del agua dentro de un complejo industrial. Dicho ejemplo puede ser fácilmente extrapolable a cualquiera de los complejos industriales instalados en la ciudad. Se tratarán las zonas individualmente, sin considerar las interconexiones entre sí, que en cada caso dependerá del proceso productivo aplicado.

#### *Agua Cruda*

La consideración de agua cruda dentro de las instalaciones hace referencia a aquella a la cual se le realizó un proceso de clarificación y filtrado previo al ingreso al complejo para luego ser almacenada para su uso. En general, salvo casos puntuales, el agua proviene de ABSA.

#### *Sistema de enfriamiento*

Por definición, en los sistemas de enfriamiento, el calor es extraído del proceso a través de equipos de intercambio de calor y es absorbido por un fluido refrigerante (agua) que posteriormente debe ser enfriado para su reutilización o descarga del sistema.

En función de la circulación de agua se produce la principal clasificación de los sistemas de enfriamiento, pudiendo ser de un solo paso, cerrados o de circulación abierta.

---

*este género existen 48 especies y un total de 78 serotipos. Algunas de las especies de legionela pueden infectar a humanos, siendo por sus implicaciones médicas la especie más importante la Legionella pneumophila.*

*La infección por legionela se denomina Legionelosis, en un carácter leve se denomina fiebre de Pontiac y de carácter severo enfermedad del legionario.*

En el caso de los sistemas abiertos, estos están constituidos esencialmente por torres de enfriamiento, que son estructuras diseñadas para disminuir la temperatura del fluido refrigerante.

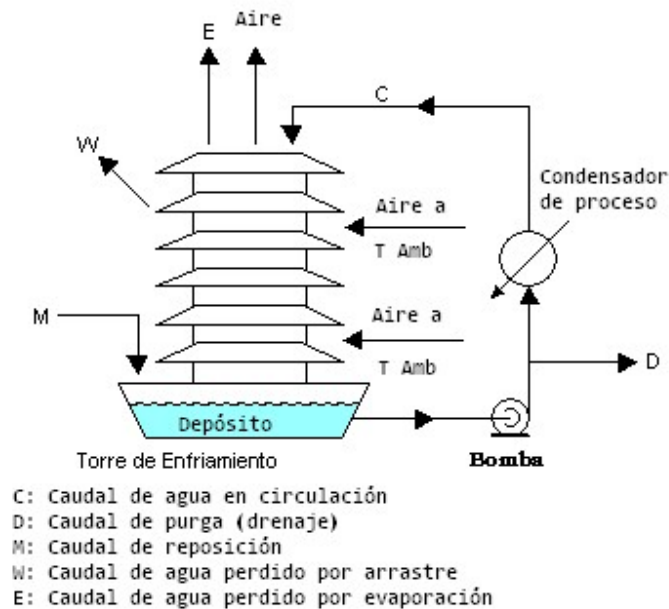


Figura 2. Diagrama esquemático de una torre de enfriamiento.

En el esquema anterior, se observa el circuito del agua en el sistema de enfriamiento integrado por una torre de enfriamiento.

Observamos que el agua es bombeada desde el depósito de la torre, esta agua actuará como refrigerante cuando es encaminada a través de enfriadores de proceso y los condensadores en una instalación industrial. El agua fría absorbe calor de las corrientes calientes del proceso que necesitan ser enfriadas o condensadas, y el calor absorbido calienta el agua circulante (corriente denominada C). El agua calentada vuelve al tope de la torre de enfriamiento y cae sobre el material de relleno de la torre para generar una corriente a chorros finos (esta distribución de agua aumenta la superficie de intercambio de calor para ser enfriada por aire).

A medida que gotea desde el tope, el contacto con el aire que sube por la torre, ya sea por tiro natural o forzado por grandes ventiladores provoca que una pequeña cantidad de agua se pierda por arrastre del viento (corriente denominada W) y otra parte del agua por evaporación (corriente denominada E). El calor necesario para evaporar el agua se deriva de la propia agua, que enfría el agua a su regreso al fondo de la torre (depósito) en



donde queda a disposición para volver a circular. La evaporación (corriente de agua evaporada, denominada E) concentra las sales (que el agua poseía originalmente) en la corriente de escurre al fondo de la torre haciendo que la concentración se incremente en el agua de refrigeración (ciclos de concentración).

Para evitar que la concentración de las sales en el agua llegue a ser demasiado alta, una parte de agua es retirada del circuito (corriente de purga denominada D) para su vertido. Para compensar las pérdidas de agua del sistema (mayormente originadas en la evaporación y purga), se recarga el circuito con una corriente de agua fresca (corriente denominada M).

Los dos aspectos importantes a destacar son:

- El calor extraído del proceso es absorbido por el agua a través de intercambiadores de calor, y luego el agua disminuye su temperatura por evaporación cuando circula por la torre.
- El uso de la corriente de purga es fundamental en dos aspectos,
  - Por una parte, regula los ciclos de concentración del sistema (concentración de sales) favoreciendo los tratamientos anticorrosivos aplicados al sistema.
  - Se convierte en la corriente de vuelco del sistema (efluente), considerando que la corriente se extrae del fondo de la torre, esta será muy rica en sales y químicos (provenientes de los tratamientos anticorrosión). El control analítico de esta corriente es fundamental para evitar desvíos según lo establecido por la legislación.

### **Tratamiento químico aplicado**

La descripción de los tratamientos químicos aplicados al agua nos ayuda a la comprensión del uso de los indicadores. La adición de productos como parte del tratamiento altera la química original del agua. El resultado de dicha alteración resulta en un cambio antropogénico de los puntos donde se realiza el vuelco de efluentes.

El conocimiento cabal de los cambios aplicados sobre las corrientes de proceso es de vital importancia para evitar desvíos respecto de la legislación aplicada sobre el cuerpo de agua receptor (considerando nuestro caso local, la mayoría de las empresas vuelcan sus efluentes hacia la costa, la cual ha sido clasificada como cuerpo de agua superficial).

## Pretratamiento del agua cruda

El objetivo del pretratamiento de la corriente de agua cruda es la eliminación de las impurezas suspendidas y de la materia orgánica coloidal, a través de la decantación de flóculos orgánicos.

Este tratamiento se compone de tres procesos principales, en los cuales se agregan químicos en las dos primeras etapas.

➤ **Coagulación:**

Es el proceso de neutralización de las cargas, para que las partículas se comiencen a agrupar formando flóculos. Esto se logra a través del uso de una sustancia compuesta por cationes trivalentes (generalmente se utiliza cloruro férrico) que proporcionará el desbalance de cargas en la materia orgánica. En esta etapa, las partículas se agrupan formando los primeros flóculos (partículas de mayor tamaño respecto del original) que aún no poseen el peso suficiente para su decantación.

➤ **Floculación:**

Una vez formados los primeros flóculos se adiciona un polímero floculante (la formulación de este tipo de productos, varía en características dependiendo del fabricante) cuya acción es la de agrupar “Capturar” las partículas neutralizadas aportando el peso necesario para que se produzca la decantación. Una característica importante del diseño de esta etapa, es el tiempo de mezclado (tiempo de residencia), a través de una baja velocidad de agitación (velocidad de mezclado) se favorece el crecimiento deseado.

➤ **Sedimentación:**

Es la etapa final del proceso, donde se efectúa la remoción física de las partículas floculadas por medio de la acción gravitatoria (habiendo ganado peso en la segunda etapa, las partículas ya más pesadas se ven afectadas por la gravedad). Nuevamente el tiempo (tiempo de sedimentación) juega un papel fundamental en el diseño de esta etapa.

La corriente producto resultante de esta etapa, se pasa a través de unos filtros multimedia<sup>13</sup> (MMF por sus siglas en inglés) para un “pulido final” para remover aquellos sólidos que no fueran retenidos en la etapa anterior.

---

<sup>13</sup> Los filtros multimedia están diseñados para poder filtrar sólidos suspendidos en el agua por medio de varias capas de medios filtrantes (ordenados del más grueso al más fino). Este diseño hace que las partículas más grandes queden atrapadas en las capas superiores y las más pequeñas en las inferiores.

**Nota:** *Es importante entender que siendo este punto el inicio del camino del agua dentro de un establecimiento industrial, una falla en el ajuste de los químicos usados, afecta en cadena al resto del proceso en la etapa posterior y pudiendo llegar también al efluente final.*

### **Sistema de enfriamiento**

En un sistema de agua de enfriamiento bien diseñado y operado, las superficies metálicas establecerán un equilibrio con el ambiente formando una capa protectora producto de la corrosión que aísla eficazmente el metal del ambiente (suprimiendo la corrosión adicional).

La elección de un tratamiento químico adecuado no solo depende de los aspectos mecánicos, físicos y químicos del sistema, sino que también se debe ajustar a los requerimientos medioambientales.

Uno de los programas de control de corrosión más empleados para sistemas de agua de enfriamiento es el tratamiento químico basado en fosfatos. La variante más utilizada de este tratamiento son los programas de bajo fósforo que resultan más amigable con el medioambiente.

En este tipo de tratamiento se adiciona ortofosfato para cumplir la función de inhibidor anódico, conjuntamente con polifosfatos que se emplean como inhibidores catódicos. Estos compuestos tienen diferentes solubilidades, lo que permite mantener los iones de fosfato en solución. Cuando las sales de polifosfatos se disuelven en agua, los iones polifosfato reaccionan con los iones de hidróxido del agua para generar ortofosfato mediante una serie de reacciones reversibles (tasa de reversibilidad). Los polifosfatos permiten controlar la cantidad de ortofosfato del sistema. Para tal fin se debe mantener controladas las condiciones del sistema (pH, temperatura, alcalinidad, dureza) y la dosificación empleada del químico.

Este tipo de programas se complementan con el uso de biocidas<sup>14</sup>, biodispersantes<sup>15</sup> y dispersantes minerales. De esta manera se obtiene el control biológico adecuado, se evitan la deposición de sales en el sistema (en las zonas calientes cambia el equilibrio de solubilidad) manteniendo el correcto funcionamiento del programa.

---

<sup>14</sup> *Los productos biocidas son mezclas que contienen una o más sustancias activas que sirven para repeler, neutralizar o destruir organismos nocivos. Estas sustancias activas biocidas pueden ser sustancias químicas o microorganismos (bacterias, virus u hongos).*

<sup>15</sup> *Cuando se habla de biodispersantes, se trata de una combinación de agentes dispersantes y antiincrustantes que se usa para remover viejos depósitos de incrustaciones, barro, aceite, limo y otros materiales que forman depósitos. También se utiliza para prevenir la formación de nuevos depósitos tanto microbiológicos como minerales.*

**Nota:** Cabe destacar que los fosfatos actúan como nutrientes que favorecen el crecimiento de microorganismos, por lo que se requeriría, en función del estado del sistema altas dosis de biocidas. Esto en combinación con el resto de los elementos que conforman el programa de tratamiento hacen de vital importancia el control del flujo de la corriente de purga. Todo lo aplicado al sistema de enfriamiento se verá reflejado en la corriente de purga.

## **Funcionalidad de los aditivos químicos empleados**

### **Inhibidores de corrosión**

Todas las partes de la celda de corrosión deben estar presentes para que ocurra el desgaste del material: reacciones catódica y anódica, sumado al electrolito (medio conductor de iones y electrones). Por lo que todo agente químico que se agregue al agua e interfiera con este circuito inhibirá la corrosión.

#### ➤ *Inhibidores anódicos*

Funcionan interfiriendo la reacción anódica de la celda de corrosión, reduciendo la velocidad de disolución del metal.

##### ○ *Ortofosfato*

Empleado para la protección del acero en los circuitos de enfriamiento abiertos, este inhibidor reacciona con los iones de metal disueltos para formar una capa protectora de precipitado. Este tipo de inhibidor es sensible a la calidad de agua (perfil salino) y al pH, requiere la presencia de oxígeno y un ambiente alcalino para su correcto funcionamiento.

#### ➤ *Inhibidores catódicos*

Los inhibidores catódicos suprimen la corrosión previniendo la reducción del oxígeno y la transferencia de electrones al cátodo. Estos se consideran más seguros porque no causan picado (son inhibidores de pitting), entre los más usados se encuentran, el zinc (con uso restringido debido a que es un metal pesado), los polifosfatos y los inhibidores precipitantes (por ejemplo, carbonato de calcio).

##### ○ *Polifosfatos*

Se utilizan para la protección del acero. Requieren de iones divalentes de calcio para formar una capa protectora altamente efectiva. Estos inhibidores son sensibles al pH y la concentración de electrolitos no influye

de manera significativa en su funcionamiento, pero si la corrosividad aumenta, es necesario aumentar la dosis del inhibidor.

### **Agentes de control de depósitos**

Estos agentes previenen la formación de depósitos e incrustaciones ocasionados por la presencia de partículas en suspensión o disueltas en el agua. Los tipos principales de agentes de control de depósitos son:

➤ *Inhibidores de incrustaciones*

Son agentes quelantes que previenen las incrustaciones solubilizando los iones de sales precipitantes insolubles (como las sales insolubles de calcio). Generalmente son formulaciones basadas en hexametáfosfato sódico y fosfonatos.

➤ *Dispersantes*

Evitan que las pequeñas partículas de sólidos suspendidos se aglomeren en masas más grandes que puedan depositarse en las superficies. Su principio de funcionamiento reside en la estabilización de cargas, se rodea las partículas sólidas y terminan repeliéndose entre sí por estabilización electrostática o estérica.

➤ *Sufractantes*

Se hace referencia a biodispersantes o biodetergentes, estos agentes no matan los microorganismos, ayudan a la ruptura del biofilm manteniendo las bacterias en suspensión en el agua. Son efectivos en un amplio rango de pH y estables a las temperaturas típicas de los sistemas de enfriamiento. Se debe controlar la dosificación, un desvío en la aplicación conduce a la formación excesiva de espuma.

### **Biocidas**

La función de los biocidas es interrumpir el proceso de crecimiento de depósitos biológicos y prevenir su formación. Un adecuado tratamiento biológico implica el uso conjunto de biocidas y biodispersantes, así como la aplicación paralela de biocidas oxidantes y no oxidantes (dentro de este último grupo, además se debe realizar la alternancia de biocidas para atacar todo el espectro de bacterias residentes).

### ➤ *Oxidantes*

Destruyen las células de las bacterias obstruyendo las paredes celulares o penetrándolas, oxidando la estructura interna. El biocida oxidante más empleado, por su bajo costo y efectividad, es el hipoclorito de sodio. Este produce ácido hipocloroso (HOCl) cuando se disuelve en agua, el cual funciona como biocida activo. El HOCl se disocia en forma reversible en agua dando iones hidrógeno ( $H^+$ ) e hipoclorito ( $OCl^-$ ), siendo esta disociación fuertemente dependiente del pH del agua, teniendo como condición que el medio no se vuelva alcalino para favorecer el equilibrio de la reacción del lado del ácido.

### ➤ *No Oxidantes*

Estos biocidas son absorbidos por la membrana celular donde interfieren con los procesos metabólicos, afectando principalmente la producción de enzimas. Para sistemas de enfriamiento, normalmente se emplean compuestos orgánicos halogenados (comúnmente se utiliza isotiazolina y glutaraldehído). Este tipo de compuestos son más caros y requieren la aplicación de mayores dosificaciones en comparación con los biocidas oxidantes, como punto a favor, son menos dependientes del pH del sistema (lo que hace que su reactividad se más baja) siendo su efecto de mayor duración (tienen mayor tiempo de vida medio que el hipoclorito de sodio).

## **Clarificación y Floculación**

### ➤ *Coagulantes*

Las partículas en suspensión tienen carga eléctrica negativa que las hace estar en constante movimiento. A través de la incorporación de una sal con carga opuesta se produce la desestabilización de las partículas en suspensión coloidal en el agua, favoreciendo el crecimiento de partículas de mayor tamaño.

Algunas sales inorgánicas se utilizan para neutralizar las cargas de las partículas, lo que conduce a la formación de flóculos de bajo peso apenas visibles. Los coagulantes típicos de hierro (por ejemplo, Cloruro férrico) y aluminio (por ejemplo, Alumbre) son sales ácidas que reducen el pH del agua tratada por hidrólisis.

Dependiendo de la alcalinidad y el pH del agua cruda inicial, se deberá agregar un álcali para contrarrestar la depresión de pH del coagulante primario.

### ➤ *Floculante*

La floculación es la aglomeración de esas partículas desestabilizadas en flóculos más grandes que puedan decantarse en forma de lodo. Las poliacrilamidas aniónicas son polímeros de muy alto peso molecular muy eficaces para cumplir la función de floculante. Esencialmente, el polímero forma un puente entre las partículas pequeñas estabilizadas provocando que se aglomeren rápidamente en flóculos más grandes y cohesivos que se asientan rápidamente.

## **Parámetros de control y monitoreo**

Para garantizar la efectividad del tratamiento empleado a los sistemas se debe establecer el control y la supervisión de parámetros significativos. Estos se basan en la evaluación y seguimiento de propiedades fisicoquímicas dentro de los sistemas. Para ello se elegirán puntos de muestreo que representen la dinámica de los sistemas significativamente.

Por un lado, se deberá realizar análisis fisicoquímicos rutinarios que alerten de manera temprana problemas que se estén desarrollando dentro del sistema. Por otro lado, se deberá realizar seguimientos de carácter operacional, adicionales que complementen la parte analítica (inspección de cupones de corrosión, dosificaciones, datos de equipos, etcétera).

## **Importancia de las propiedades fisicoquímicas y técnicas analíticas**

En esta sección se detallarán los factores influyentes y los métodos analíticos necesarios dentro de una rutina de trabajo para garantizar el control y la aplicabilidad de un programa de tratamiento. En la evaluación de dichos parámetros, se aplicará el concepto de indicadores, que si bien pueden ser sencillos en su definición tienen un alto impacto desde el punto de vista práctico en el perfil de la corriente de vuelco (efluente final).

Se describirán parámetros químicos y fisicoquímicos que deben estar presentes para garantizar el funcionamiento del programa de tratamiento. Los residuales de los componentes específicos deberán de cumplir con la legislación de vuelco vigente.

### **pH**

Es la medida de la concentración de iones hidrógeno presentes en el agua, y es un parámetro que puede controlarse de manera sencilla y relativamente rápida. El rango

especificado de pH dependerá fundamentalmente del tipo de sistema y del tratamiento empleado, en general se opta por valores del rango ligeramente alcalino.

Dentro de los sistemas de enfriamiento, si se opera en un setpoint superior al valor máximo establecido, se correrá el riesgo de que se generen incrustaciones de carbonato de calcio o fosfato de calcio en los equipos y cañerías (sobre todo en la zona caliente del proceso). En contrapartida, la operación del sistema a un valor por debajo del mínimo establecido en el rango operativo conduce a la disolución de los óxidos protectores de los equipos, generando daño por corrosión.

### **Conductividad**

En los sistemas de enfriamiento, la conductividad del agua da una medida de los sólidos ionizables disueltos en ella que permiten el flujo de corriente entre los sitios anódicos y catódicos de la celda de corrosión. Un aumento en la conductividad del agua conduce a un aumento en la velocidad del proceso de corrosión, aunque también es un efecto deseado debido a la concentración de sales de calcio que favorecen a la formación de la capa protectora anticorrosiva.

### **Turbidez**

Este parámetro se refiere a la medición de la reducción de la intensidad de la luz que pasa a través de una muestra por efecto de materia suspendida y coloidal. La medida de la turbidez indica la posibilidad de la precipitación de sólidos indeseados que podrían conducir al crecimiento de bacterias indeseadas dentro del sistema.

La turbidez se mide utilizando equipos fotométricos que miden intensidad de luz dispersa mediante un ángulo específico (90°) denominado turbidímetro o nefelómetro.

### **Alcalinidad total**

La alcalinidad es una medida del poder que tiene una solución de neutralizar un ácido. En los sistemas de agua de enfriamiento, el ion bicarbonato es la principal especie alcalina presente, por lo que la medida de alcalinidad está relacionada a su concentración. En presencia de cationes (calcio, magnesio o hierro) el ion bicarbonato reacciona formando carbonatos y bicarbonatos (uno de los más comunes es el carbonato de calcio) que puede actuar como depósito protector. Cuando la alcalinidad es mayor a la especificada para el tratamiento, el ambiente se torna agresivo para el sistema y se corre el riesgo de formación de depósitos en las zonas calientes del circuito (por ejemplo, tubos de los intercambiadores de calor).



Este parámetro se determina por técnicas de titulación en presencia de indicador según una adaptación del método estándar SM-2320 B.

### **Durezas**

La dureza representa la cantidad de cationes calcio y magnesio presentes en el agua, independientemente del origen de estos iones. Su medición se expresa en términos de carbonato de calcio equivalente. La dureza total es la suma de la dureza magnésica y la dureza cálcica.

Una dureza mayor a la especificada puede conducir a la formación de incrustaciones en el sistema, mientras que una dureza menor al mínimo establecido para el sistema aumenta la corrosividad del medio. La técnica empleada es volumétrica siendo una variación del método estándar SM-2340 B para dureza total y SM-3500-Ca B para dureza cálcica.

### **Fosfato total y ortofosfato**

La cantidad de fósforo presente en el agua de enfriamiento dependerá especialmente de la dosificación necesaria para el correcto funcionamiento del programa implementado.

Si la concentración de fósforo es mayor a la especificada, se pueden dar dos temas importantes, empezando con la generación de incrustaciones de fosfato de calcio a lo largo de todo el sistema. Y, en segundo lugar, la posibilidad de un importante desvío desde el punto de vista medioambiental.

La medición de este compuesto es con método espectrofotométrico, cuya técnica es una variación del método estándar SM-4500-PF.

### **Cloro libre y total**

El cloro puede estar presente en el sistema como cloro libre y como cloro total. Se denomina cloro libre a las especies activas del hipoclorito que actúan como biocidas oxidantes (iones hipocloroso e hipoclorito). Este compuesto se mide como residual, es decir, el exceso luego de la interacción microbiana. Por otro lado, el cloro total implica todas las especies combinadas de cloro presentes en el sistema.

El rango especificado de estas especies depende principalmente de las condiciones del sistema y de la calidad del agua. Si se tiene una concentración menor a la deseada de cloro libre se reduce la capacidad de oxidación de la materia orgánica y se pierde el control microbiológico. Por otra parte, una cantidad elevada de oxidante puede interferir

en la inhibición de la corrosión destruyendo los óxidos protectores o reaccionando y agotando los agentes inhibidores.

La medición de estos compuestos se basa en el método estándar SM-4500 Cl G.

### **Nitrógeno amoniacal**

En aquellos procesos productivos que involucren amoníaco en su proceso son propensos a la presencia del nitrógeno amoniacal. El nitrógeno actúa como fertilizante o abono.

### **Control microbiológico por cultivo**

➤ *Bacterias Aerobias Totales (BAT)*

Por bacterias aerobias totales se entienden todas las bacterias aerobias y anaerobias facultativas, heterótrofas y mesófilas capaces de crecer en un medio de agar nutritivo. Estos microorganismos pueden estar presentes en los sistemas de enfriamiento dispersos en el agua (organismos planctónicos) o aferrados a superficies en biofilms.

El medio de cultivo óptimo para estos microorganismos se basa en sales de hierro y magnesio, con la finalidad de favorecer la recuperación de bacterias injuriadas, permitiendo una lectura completa en la muestra. Una medida rigurosa de la actividad microbiológica del agua es el conteo de organismos planctónicos determinados por unidades formadoras de colonias.

➤ *Bacterias Reductoras de sulfato (BRS) y Bacterias Precipitantes de Hierro (BPH)*

El conteo de bacterias aeróbicas no es efectivo para el monitoreo de corrosión microbiana activa, por lo que es necesario evaluar la presencia de las bacterias reductoras de sulfato y precipitantes de hierro (bacterias anaeróbicas). Para tal fin se utilizan medios de cultivo específicos a una temperatura de incubación de 32°C hasta 21 días como máximo, los resultados obtenidos se leen como presencia o ausencia de la bacteria.

➤ *Contaminación orgánica*

el último factor de monitoreo de materia orgánica presente se refiere a la medición de microorganismos sésiles generadores de biofilm, efectuando una medida directa de la efectividad del tratamiento microbiano seleccionado. La técnica se basa en la detección de ATP (Adenosin trifosfato) mediante bioluminiscencia (molécula energética presente en organismos vivos).

La técnica de bioluminiscencia se basa en la reacción por ATP con la enzima luciferasa presente en todos los organismos vivos, tales como bacterias, mohos y algas. Al producirse la reacción se emite una cantidad de luz medible cuya intensidad se representa en Unidades Relativas de Luz (RLU). Este método ofrece una forma de control rápida y sensible.

### **Aplicación sobre un sistema**

En la presente sección se evaluará el recorrido del agua dentro de una instalación industrial, tomando el caso de estudio planteado en el trabajo, se dividirá en zonas a este. En cada zona se evaluarán las variables de interés y se establecerán las relaciones de funcionamiento de la etapa como las consecuencias del posible desvío.

Las variables se presentarán tabuladas, apuntando a una rápida interpretación del estado del sistema bajo evaluación. La cual, servirá para iniciar el proceso de resolución de problemas.

### **Agua cruda**

Comúnmente se utiliza la denominación de agua para el agua que ingresa al predio industrial, ya sea de un proveedor de agua o de perforaciones dentro de las instalaciones. Una peculiaridad del agua cruda es que, en la etapa en la que se le encuentra, todavía no recibió ningún tipo de tratamiento y/o acondicionamiento. Siendo esta una diferencia fundamental con el agua de *Make Up* que es el agua de alimentación a los sistemas, la cual ya fue tratada de alguna forma (tratamiento químico o mecánico) y tiene sus propiedades ecualizadas.

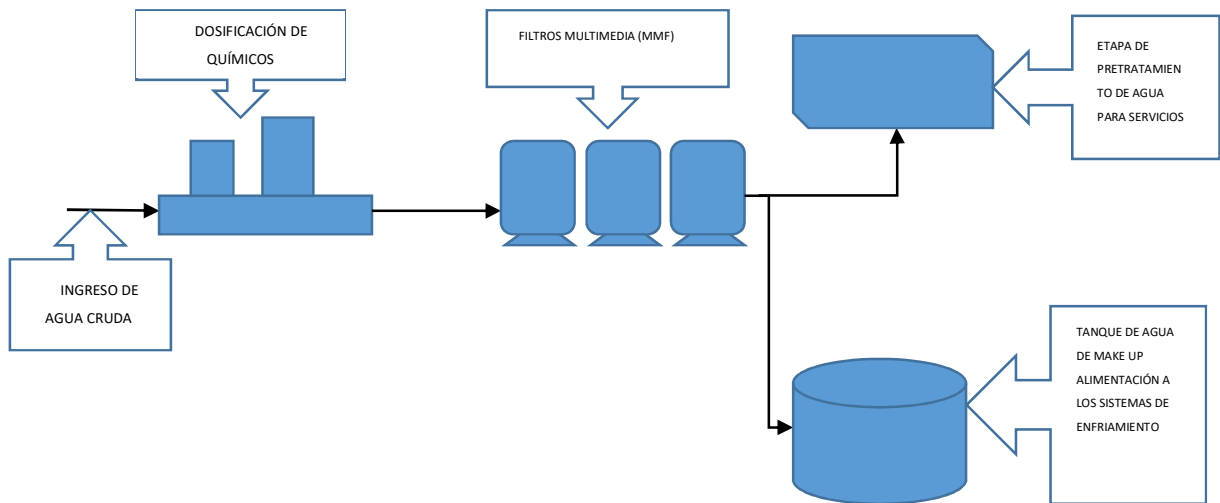


Figura 3: Diagrama esquemático del ingreso de agua cruda a la planta.

En la *figura #1* se observa en forma esquemática el ingreso del agua cruda a la planta, en dicho recorrido se pueden marcar dos áreas de interés. En la primera etapa compuesta por la dosificación de químicos, su transporte a través de cañerías y el pasaje por filtros multimedia, se realiza el acondicionamiento del agua para su distribución interna.

La segunda etapa está conformada por dos procesos diferentes, por un lado, se procede al almacenamiento del agua (agua de Make Up, Mup) y por otro lado se puede alimentar otro tratamiento de acondicionamiento de calidad para generar agua de servicios auxiliares (agua de alimentación a calderas y generación de vapor, por ejemplo).

El programa de tratamiento que se aplica sobre el agua cruda es la clarificación y floculación, con el objetivo de disminuir los coloides presentes en la corriente. El proceso de clarifloculación, aumenta el tamaño y peso de los coloides para que estos puedan ser removidos con mayor facilidad del agua.

En el esquema se observa que el agua ingresante pasa por una estación de dosificación, donde se agrega un cloruro de hierro (coagulante) y una formulación a base de polímeros pesados que actúan de aglutinantes haciendo ganar peso y tamaño a los coloides hasta hacerlos removibles.

El tramo de cañería que conduce agua desde la dosificación hasta la entrada de los filtros MMF, se usa como tiempo de mezclado, aprovechando el flujo turbulento del agua, se garantiza el correcto mezclado de los químicos.

## Indicadores Medioambientales

En este punto es donde encontramos las primeras variables de control del sistema, al ingreso de los filtros MMF. Cabe destacar que estas variables están íntimamente relacionadas con la dosificación aplicada al ingreso de la planta. El efecto de dicha dosificación se cuantifica a partir de acá.

Las variables de interés para esta etapa son:

- pH
- Turbidez
- Sólidos suspendidos totales

En la tabla se observa la relación del valor de la variable con el posible desvío y la potencial acción correctiva.

***NOTA: Las opciones tabuladas, son a priori, las de mayor posibilidad de ocurrencia. En la operación continua del sistema se pueden encontrar una mayor cantidad de desvíos con sus correspondientes correcciones.***

## Indicadores Medioambientales

| Variable                           | Rango de operación y control | Unidades de la variable | Tipo de desvío                                     |           | Clasificación del desvío |  | Acción correctiva   | Efecto del desvío   |
|------------------------------------|------------------------------|-------------------------|--|-----------|--------------------------|--|---|---|
|                                    |                              |                         | Operativo  | Ambiental | Operativo                | Ambiental  |   |   |
| <b>Sólidos suspendidos totales</b> | valor mínimo - valor máximo  | ppm                     | Valor por encima del máximo establecido            | X         | X                        | X  | verificación de la dosificación aplicada, verificación del funcionamiento de las bombas                           | Aumento del consumo de agua, mayor cantidad de retrolavados y corriente de efluente con mayor cantidad de barros. |
|                                    |                              |                         |  |           |                          |  |   |   |
|                                    |                              |                         | valor por encima del máximo establecido            | X         | X                        | verificar dosificaciones aplicadas al sistema, considerando el caudal<br>verificar dosificaciones aplicadas al sistema, considerando el Jar Test                         | Efluente con exceso de hierro, alteración de las características del punto de descarga                            |   |
|                                    |                              |                         |  |           |                          |  |   | valor por debajo del mínimo establecido   |
| <b>Turbidez</b>                    | valor mínimo - valor máximo  | NTU                     | Valor por encima del máximo establecido            | X         | X                        | verificación de la dosificación aplicada, verificación del funcionamiento de las bombas  | Aumento del consumo de agua, mayor cantidad de retrolavados y corriente de efluente con mayor cantidad de barros. |   |
|                                    |                              |                         |  |           |                          |  |   | valor por debajo del mínimo establecido   |
|                                    |                              |                         | valor por encima del máximo establecido            | X         | X                        | verificar dosificaciones aplicadas al sistema, considerando el caudal<br>verificar dosificaciones aplicadas al sistema, considerando el Jar Test                         | Efluente con exceso de hierro, alteración de las características del punto de descarga                            |   |
|                                    |                              |                         |  |           |                          |  |   | valor por debajo del mínimo establecido   |
| <b>pH</b>                          | mayor a 6,6 - menor a 7,9    | unidades de pH (UpH)    | valor de ph medido por encima del máximo operativo | X         | X                        | verificar dosificaciones aplicadas al sistema, considerando el caudal<br>verificar dosificaciones aplicadas al sistema, considerando el caudal de la bomba dosificadora. | Aumento del consumo de agua, mayor cantidad de retrolavados y corriente de efluente con mayor cantidad de barros. |   |
|                                    |                              |                         |  |           |                          |  |   | valor de pH medido por debajo del mínimo operativo  |
|                                    |                              |                         | valor de pH medido por encima del máximo operativo | X         | X                        | Se debe bajar la dosificación y verificar el caudal de agua ingresante.<br>Si el caudal ingresante está correcto, verificar el funcionamiento de la bomba dosificadora.  | La acidificación de la corriente afecta la solubilidad del hierro, modificando el proceso de clarificación.       |   |
|                                    |                              |                         |  |           |                          |  |   | valor de pH medido por debajo del mínimo operativo  |

Tabla 1: Variables de interés para el sistema y troubleshooting.

### **Sistema de enfriamiento**

En la figura #1, se observa que uno de los puntos finales del esquema es el tanque de agua de Make Up.

Es una práctica común en la industria tener tanques de almacenamiento. La ventaja de implementar los tanques reside en los siguientes puntos:

- Sirven para ecualizar y normalizar las propiedades del agua de alimentación.
- Permite tener un tiempo de operación remanente en caso de tener problemas en el suministro de agua cruda.
- En caso de tener que realizar reparaciones sobre las líneas de alimentación, el volumen de agua almacenado ofrece una ventana operativa (de tiempo) para continuar la operación sin tener que interrumpir la producción.
- En caso de tener un error o desvío operativo que saque de especificación la calidad de agua sin que sea detectada por el personal operativo. El tanque sirve como punto de reten para contener el desvío.

Con todas estas consideraciones en mente, establecemos como punto de alimentación al sistema de enfriamiento al agua de Make Up. Partiendo de la hipótesis de que el agua se recibe en especificación continuamente para concentrarnos en el estudio de los desvíos del sistema por las aplicaciones que se realizan sobre el mismo.

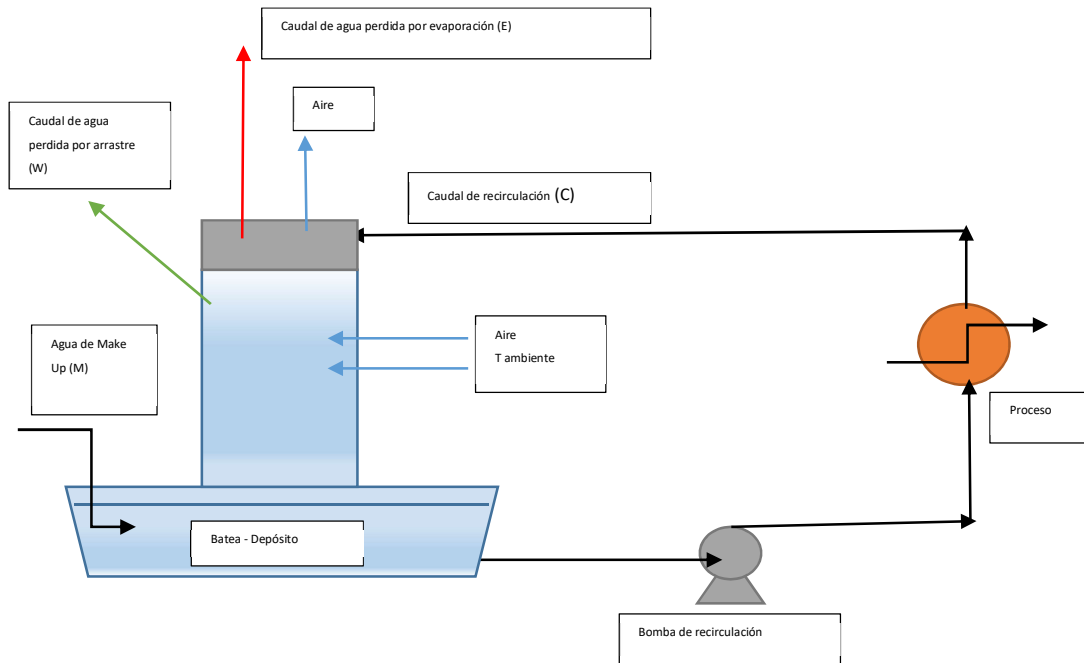


Figura 4: Diagrama esquemático de la circulación por el sistema de enfriamiento.

En la figura #2 se observa el diagrama simplificado de un sistema de enfriamiento. Este modelo es aplicable a cualquier proceso productivo. Esquemáticamente las zonas de interés son dos, la zona de proceso y la torre de enfriamiento. Con la finalidad práctica de establecer los puntos de utilidad en la aplicación de un programa de tratamiento se divide al sistema en estas dos áreas.

En la aplicación del programa propiamente dicha, los límites son algo más difusos y se agregan más zonas de control como se detallará a continuación.

En el esquema se puede ver que el sistema es pseudocerrado, si bien el agua parte y retorna al mismo punto, tenemos diferentes tipos de pérdidas. En primer lugar, la menor caudal, es la generada por el arrastre del viento. Cuando se produce el contacto del agua con la corriente de viento, algo de la misma se va del sistema. La segunda pérdida del sistema está representada por la corriente de evaporación, donde el calor es removido del sistema por la evaporación del agua.

El agua evaporada deja las sales que lleva disueltas en el grueso del agua que no ha sufrido la evaporación, lo que hace que la concentración de sales incremente en el agua de la batea (depósito), que es la corriente de agua de refrigeración circulante. Para evitar que la concentración de sales llegue a ser demasiado alta (y se convierta en un



problema), una parte del agua se retira por la corriente de purga (siendo esta la última pérdida del sistema).

Para compensar las pérdidas de agua mencionadas, se alimenta al sistema con una corriente de agua fresca la cual llamamos agua de Make Up.

***En el presente informe no se abordarán las características de diseño de una torre de enfriamiento, se asume que la misma es funcional y está diseñada de acuerdo a los requerimientos del sistema.***

La zona de proceso está compuesta por todos los equipos necesarios para llevar a cabo el producto final del proceso productivo. En la misma se podrían encontrar, intercambiadores de calor, condensadores, evaporadores y todo tipo de equipos donde el calor es intercambiado con la corriente refrigerante.

***Al igual que en el caso de la torre de enfriamiento, no se abordarán las características constructivas del proceso, se asume que está diseñado de acuerdo a las especificaciones de proceso.***

## Indicadores Medioambientales

Es una práctica común, en la aplicación de los programas de tratamiento, de asumir que la corriente de retorno del sistema representa con bastante proximidad el comportamiento (desde el punto de vista del tratamiento) de todo el sistema.

Para el monitoreo y control del sistema se asume a esta muestra como la más importante. Dicha importancia radica en que, al ser el último punto del sistema, si todas las variables de control estuvieran en especificación se puede asumir que aguas arriba del punto también lo están para el resto de los componentes del sistema.

Además, es habitual, buscar puntos de interés dentro del proceso (generalmente los puntos críticos del mismo) como puntos adicionales e intermedios para verificar las hipótesis asumidas con los resultados de la corriente de retorno.

Las variables de control más importantes que se monitorean sobre la corriente de retorno son las siguientes:

- pH
- Fosfato
- Nitrógeno
- Cloro libre
- Bacterias
- DQO y DBO
- Biocidas
- Flujo de purga

Cabe mencionar que estos no son los únicos controles a realizar, la cantidad variará de acuerdo al proceso de producción y el tipo de programa de tratamiento. En la lista se mencionan (a modo de resumen) los comúnmente presentes en todo tipo de tratamiento.

Como se mencionó con anterioridad, se suelen tomar puntos de control dentro del proceso. En estos se suelen monitorear algunas de las variables analíticas anteriormente mencionadas. Los análisis aplicados dependerán del tipo de equipo y de la posición del mismo dentro del proceso.

Si es común llevar a cabo mediciones de cloro libre a la entrada y salida, colocar testigos de corrosión (también colocados en la corriente de retorno) u otro tipo de monitoreo remoto o a través de equipos de medición.

## Indicadores Medioambientales

Un análisis habitual a realizar sobre los equipos, consiste en la medición de las temperaturas de entrada y salida de la corriente de enfriamiento y proceso respectivamente. Con dichos valores se calcula la temperatura de Hot Approach<sup>16</sup>, permitiéndonos evaluar indirectamente el desempeño del programa de tratamiento (se puede inferir ensuciamiento dentro del equipo) y directamente la performance de la unidad bajo estudio.

En este punto es conveniente aclarar que no es común realizar análisis sobre la corriente de envío del agua de enfriamiento, a diferencia de la corriente de retorno que toma todas las corrientes de proceso para transformarlas en una sola, la corriente de envío suele dividirse sobre el sistema en múltiples caminos y como las dosificaciones son aplicadas sobre la misma (para asegurar el transporte de los químicos) los resultados obtenidos no son muy representativos. Y en caso de no haber realizado alguna dosificación en particular, el efecto se verá de forma inmediata en la corriente de retorno.

En la tabla, a continuación, se observa la relación del valor de la variable con el posible desvío y la potencial acción correctiva para los puntos de interés dentro del proceso:

---

<sup>16</sup> La temperatura de aproximación (Hot Approach Temperature) es la diferencia más pequeña entre las temperaturas de las corrientes frías y calientes. Por ejemplo, si se calienta un fluido frío desde 80°C hasta 100°C usando un fluido caliente a 105°C, la temperatura de aproximación del intercambiador es 105-100=5°C.

Con este tipo de cálculos es posible evaluar la performance de funcionamiento de una unidad de proceso. Dado que las temperaturas de entrada y salida del equipo quedan fijadas en la etapa de diseño del mismo, una rápida evaluación de los valores obtenidos en campo nos permite establecer si existe ensuciamiento y/o mal funcionamiento entre otras cosas.

## Indicadores Medioambientales

| Variable                           | Rango de operación y control         | Unidades de la variable | Tipo de desvío  |   | Clasificación del desvío                                    |           | Acción correctiva | Efecto del desvío  |
|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---|---|---|-----------|-------------------|--|
|                                    |                                      |                         | Valor de cloro libre medido por encima de la especificación | Valor de cloro libre medido por debajo de la especificación | Operativo   | Ambiental |                   |  |
| <b>Temperatura de Hot Approach</b> |                                      |                         |   |   |   |           |                   |  |
|                                    | Establecidos en el diseño del equipo |                         |   |   |   |           |                   |  |
|                                    |                                      | °C                      |   |   |   |           |                   |  |
|                                    |                                      |                         | Valores por fuera del límite establecido                    |   |   |           |                   |  |
|                                    |                                      |                         |   | Valor de cloro libre medido por encima de la especificación |   |           |                   |  |
|                                    |                                      |                         |   |   | Valor de cloro libre medido por debajo de la especificación |           |                   |  |
|                                    |                                      |                         |   |   |   | X         |                   |  |
|                                    |                                      |                         |   |   |   |           | X                 |  |
|                                    |                                      |                         |   |   |   |           |                   | Verificación del funcionamiento del sistema dosificador de cloro   |
|                                    |                                      |                         |   |   |   |           |                   | Una alta dosificación de cloro sostenida en el tiempo puede contribuir a la oxidación del sistema, comunmente se asocia al aumento del hierro soluble en el sistema.   |
|                                    |                                      |                         |   |   |   |           |                   | Una baja dosificación de cloro sostenida en el tiempo puede favorecer el crecimiento bacteriológico  |
|                                    |                                      |                         |   |   |   |           |                   | Un alto valor del residual en la entrada del sistema se puede correlacionar con un alto valor de cloro libre en la purga del sistema. Dicho desvío puede ir acompañado de un aumento en el residual de hierro soluble, sacando de especificación la corriente de purga respecto de la calidad de vuelco. |
|                                    |                                      |                         |   |   |   |           |                   | Un desvío en la performance del equipo debido a ensuciamiento inorgánico o microbiológico puede afectar el desempeño global del sistema de enfriamiento y consecuentemente la calidad del agua de purga.   |
|                                    |                                      |                         |   |   |   |           |                   | El mal funcionamiento del equipo puede afectar el desempeño del proceso en general. Se puede asumir ensuciamiento de la etapa.   |
|                                    |                                      |                         |   |   |   |           |                   | Verificar cumplimiento de los caudales de entrada y salida del equipo. Evaluar inspección de los cabezales.  |
|                                    |                                      |                         |   |   |   |           |                   | Verificación de caudales de entrada y salida   |

Tabla 2: Variables de interés para puntos de control dentro del sistema y troubleshooting.

## Indicadores Medioambientales

Para el caso de la corriente de retorno, el análisis realizado sobre las variables de interés es el siguiente:

| Variable  | Rango de operación y control     | Unidades de la variable | Tipo de desvío                              |   | Clasificación del desvío |           | Acción correctiva   | Efecto del desvío  |
|-----------|----------------------------------|-------------------------|---|---|--------------------------|-----------|---|--|
|           |                                  |                         | Valor de pH por encima de la especificación | Valor de pH por debajo de la especificación | Operativo                | Ambiental |   |  |
| <b>pH</b> | <i>mayor a 6,8 - menor a 7,5</i> | unidades de pH (UpH)    |   |   | X                        |           | Se debe verificar funcionamiento del lazo de control de dosificación de ácido. Se debe realizar una contramuestra y verificar valor. Subir dosificación de inhibidores de corrosión.  | La acidificación del sistema produce corrosión generalizada, aumenta el residual de hierro soluble como consecuencia y también sube la turbidez del sistema por desprendimiento de depósitos por efecto del bajo pH. |
|           |                                  |                         | X   | X   |                          | X         | Verificar el funcionamiento de la dosificación de ácido (lazo de control). Evaluar que el aumento de la dosificación de inhibidores de corrosión no afecte negativamente la corriente de purga (calidad de vuelco). Purgar el sistema para renovar agua considerando el impacto de la purga de una corriente ácida. | El vuelco de una corriente ácida afecta la calidad del cuerpo receptor, afectando en varios aspectos al ecosistema que lo conforme.  |
|           |                                  |                         |   |   |                          | X         | Se debe verificar funcionamiento del lazo de control de dosificación de ácido. Se debe realizar una contramuestra y verificar valor. Ajustar, con tendencia a la baja la dosificación de inhibidores de corrosión. Verificar apertura de la purga, regular ciclos de concentración del sistema.                     | Una corriente más alcalina llevaría consigo una mayor concentración de sales de fosfato en la corriente de purga cambiando la calidad de la corriente de vuelco.   |
|           |                                  |                         |   |   | X                        |           | Verificar apertura de la purga del sistema, ajustar la dosificación de ácido al sistema para evitar el purgado excesivo.  |  |

Tabla 3: Troubleshooting para variación del pH en la corriente de retorno.

| Variable       | Rango de operación y control | Unidades de la variable | Tipo de desvío                                      |  | Clasificación del desvío  |   | Acción correctiva   | Efecto del desvío  |
|----------------|------------------------------|-------------------------|---|--|---|---|---|--|
|                |                              |                         | Residual de fosfato por encima de la especificación | Residual de fosfato por debajo de especificación | Operativo   | Ambiental   |   |  |
| <b>Fosfato</b> | <i>mayor a 2 - menor a 4</i> | ppm                     | Residual de fosfato por encima de la especificación | Residual de fosfato por debajo de especificación | X   |   | Verificar el funcionamiento de la dosificación de fosfato hacia el sistema. Verificar que la dosificación aplicada se ajusta a los cidos de concentración actuales del sistema (apertura de la válvula de purga, posible sistema concentrado) | La disminución del residual de fosfato puede proceder a la aparición de corrosión generalizada y/o pitting (al sistema le esta faltando el inhibidor de corrosión).  |
|                |                              |                         |   |  |   | X   | N/A   | Desde el punto de vista ambiental, una disminución de la concentración de fosfato en la corriente de purga es beneficioso. Aunque la disminución del inhibidor de corrosión puede generar la aparición de otros desvíos en el sistema que afectan la calidad de vuelco (por ejemplo aumento del residual de hierro soluble). |
|                |                              |                         | X   |  | Verificar dosificación de fosfato aplicada el sistema. Controlar la corriente de purga del sistema. | La corriente de purga con un residual alto de fosfato, implica un desvío a la calidad de vuelco de efluentes. La concurrencia directa del desvío es la eutrofización del cuerpo receptor. |   |  |

Tabla 4: Troubleshooting para variación del fosfato en la corriente de retorno.

| Variable         | Rango de operación y control | Unidades de la variable | Tipo de desvío  | Clasificación del desvío |           | Acción correctiva  | Efecto del desvío   |
|------------------|------------------------------|-------------------------|---|--------------------------|-----------|--|---|
|                  |                              |                         |   | Operativo                | Ambiental |  |   |
| <b>Nitrógeno</b> | menor a 2                    | ppm                     | Residual de Nitrógeno en especificación               | X                        |           | Si bien no es un desvío operativo, el nitrógeno no forma parte del tratamiento. Se debe verificar que el residual siga en caja.                                  | Aún en residuales bajos, el nitrógeno constituye un alimento para las bacterias del sistema. Se debe verificar los conteos bacteriológicos.   |
|                  |                              |                         |   |                          | X         | N/A  | Desde el punto de vista ambiental el nitrógeno es un contaminante, se debe cuidar su concentración en la corriente de purga para mantener la calidad de vuelco. En exceso puede generar eutrofización en el cuerpo receptor.  |
|                  |                              |                         | Residual de Nitrógeno por encima de la especificación | X                        |           | Verificar posibles pérdidas en los equipos en los que la corriente de enfriamiento entra en contacto con la corriente de proceso que contiene nitrógeno.         | El nitrógeno actúa como alimento de las bacterias presentes en el sistema, se debe reforzar el uso de biocidas y estar atento a los resultados de los conteos de bacterias.   |
|                  |                              |                         |   |                          | X         | Verificar residual de nitrógeno en la corriente de retorno. Ajustar caudales de purga (se busca evitar el desvío de calidad de vuelco en la corriente de purga). | El nitrógeno puede formar cloroaminas en contacto con el cloro libre del sistema, este compuesto tiene un efecto biocida y puede alterar la calidad del cuerpo receptor. El exceso de nitrógeno puede ser una de las causas de eutrofización en el cuerpo receptor. |

Tabla 5: Troubleshooting para variación del nitrógeno en la corriente de retorno.

| Variable           | Rango de operación y control | Unidades de la variable | Tipo de desvío  | Clasificación del desvío |           | Acción correctiva  | Efecto del desvío  |
|--------------------|------------------------------|-------------------------|---|--------------------------|-----------|--|--|
|                    |                              |                         |   | Operativo                | Ambiental |  |  |
| <b>Cloro libre</b> | mayor a 0,2 - menor a 0,6    | ppm                     | Residual de cloro libre por debajo de la especificación | X                        |           | Verificar funcionamiento del sistema de dosificación de cloro. Verificar conteo de bacterias.  | Un bajo residual de cloro libre puede implicar una alta actividad bacteriológica en el sistema. O en caso de que fuera un desperfecto en la dosificación, podría favorecer al aumento de la actividad de las bacterias por falta de agente de control. |
|                    |                              |                         | Residual de Nitrógeno por encima de la especificación   | X                        | X         | N/A  | Verificar funcionamiento del sistema de dosificación de cloro al sistema. Verificar el estado de los testigos de corrosión.  |
|                    |                              |                         |   |                          | X         | Verificar residual de cloro en la corriente de retorno. Ajustar caudales de purga (se busca evitar el desvío de calidad de vuelco en la corriente de purga). | El cloro es un biocida oxidante, la aplicación en exceso puede favorecer a la corrosión generalizada del sistema (aumento de hierro soluble en el sistema).  |
|                    |                              |                         |   |                          |           |  | En su calidad de oxidante de sustancias orgánicas e inorgánicas, un exceso de cloro en la corriente de purga es un efecto indeseado. Sumado al posible aumento del hierro soluble, afectan directamente a la calidad del vuelco.                       |

Tabla 6: Troubleshooting para variación del cloro en la corriente de retorno.



## Indicadores Medioambientales

| Variable              | Rango de operación y control  | Unidades de la variable       | Tipo de desvío   | Clasificación del desvío |           | Acción correctiva  | Efecto del desvío  |
|-----------------------|---|-------------------------------|--|--------------------------|-----------|--|--|
|                       |   |                               |  | Operativo                | Ambiental |  |  |
| <b>Bacterias</b>      | Positivo - Negativo   | Unidad formadoras de colonias | Conteo de bacterias positivo   | X                        | X         | Ajustar dosificación de cloro al sistema. Implementar dosificación de biocidas no oxidantes.   | El efecto más común de las bacterias es la corrosión microbiana (disminución del espesor de las cañerías por efecto del metabolismo de las bacterias).<br>El uso excesivo de cloro ya fue explicado en los desvíos de cloro libre.<br>El uso de biocidas no oxidantes debe ser medido y controlado, con foco a la cantidad aplicada al sistema dado que algunos tienen componentes que son contaminantes marinos.  |
| <b>DQO y DBO</b>      | Valor máximo establecido por legislación  | ppm                           | Resultados por encima del máximo permitido   | X                        | X         | La DQO y DBO son indicadores de la contaminación del sistema, se deberá implementar biocidas o productos de limpieza.<br>Se debe encontrar el desvío dentro del proceso. | Los efectos de la contaminación del sistema pueden estar relacionados con oxidación microbiana o barro vivos que alteren el flujo dentro de los intercambiadores de calor.<br>Ambas variables indican la demanda de oxígeno, ya sea para oxidar materia orgánica o por demanda de bacterias. El vuelco de una corriente fuera de especificación con estas variables afecta considerablemente al ecosistema cuerpo receptor.<br>Al ser no oxidantes no tienen efecto negativo sobre el sistema.   |
| <b>Biocidas</b>       | N/A   | ppm                           | Aplicación en exceso   | X                        | X         | N/A<br>Moderación en el uso.   | La composición de los biocidas no oxidantes suelen incluir químicos que son contaminantes marinos, una aplicación desmedida y sin control puede generar la concentración de los activos tóxicos en la corriente de purga.  |
| <b>Flujo de purga</b> | En función de los ciclos de operación establecidos por el programa de tratamiento | m <sup>3</sup>                | Sistema muy diluido (purga prácticamente abierta)<br>Sistema muy concentrado (purga prácticamente cerrada) | X                        | X         | Apertura controlada de la purga del sistema.<br>Verificar la apertura de la purga del sistema, verificar su funcionamiento.  | La concentración de las sales dentro del sistema puede cambiar el equilibrio de solubilidad y generar depósitos por precipitación en las zonas calientes del sistema.<br>Un sistema diluido es propenso a la corrosión generalizada, por falta de concentración de las sales que en conjunto con los inhibidores de corrosión generan la protección del sistema. Mayor consumo de productos químicos para la protección contra la corrosión.<br>Consumo de agua desmedido. Posible flujo de purga muy rico en los químicos inhibidores de los procesos de corrosión. |

Tabla 7: Troubleshooting para variación del flujo de purga, Biocidas, DQO-DBO y Bacterias en la corriente de retorno.

## Indicadores Medioambientales

En las tablas #3 a la #7 se advierte los posibles resultados y potenciales acciones correctivas ante los desvíos para la corriente de retorno del sistema de enfriamiento.

Por último, la frecuencia del muestreo y/o monitoreo de las variables se ajustará al tamaño y complejidad del sistema. Es de común uso, realizar un análisis químico diario de la corriente de retorno del sistema como también de la corriente de purga. Esta frecuencia no asegura mantener la efectividad de los programas de tratamiento, así como también la calidad de los efluentes, evitando desvíos no deseados.

## Conclusión

De la revisión de toda la información se concluye que si bien la definición de indicador e indicador medioambiental requiere del cumplimiento de ciertos parámetros. La definición puede ser interpretada y aplicada tanto a un análisis macro, como pueden ser las definiciones de los indicadores “*Índice del planeta viviente*” o “*Huella Ecológica*” el mismo concepto puede ser aplicado en sistemas o ideas en un tamaño de escalado no tan grande.

Siempre y cuando mantengamos claro el concepto del indicador, respetando las funciones y características de estos, pueden ser aplicados a cualquier sistema.

Su definición no necesariamente debe de ser compleja, se debe de ser consciente de que se debe representar un interés desde el punto de vista operacional cuyo impacto ante un desvío se refleje de forma clara y rápida para una pronta intervención.

Atendiendo en tiempo y forma, al llamado de “alarma” que nos realiza el indicador es posible salvaguardar la integridad tanto del sistema que se esté representado como del ambiente circundante.

Hablando concretamente del sistema que se presentó en el trabajo, se puede observar que las variables de seguimiento tienen un potencial importante para causar daño al medioambiente en caso de salir de las especificaciones establecidas por la legislación.

Las corrientes de efluente, que se vuelcan fuera de especificación pueden conllevar consigo bacterias que afecten gravemente la salud del ecosistema, dañando los diferentes niveles de la cadena trófica.

De manera similar se puede aplicar la revisión al vuelco fuera de especificación de cloro libre, un potente oxidante que destruye todo tipo de sustancias, tanto orgánicas como inorgánicas.

Otros ejemplos son el desplazamiento de oxígeno por vuelco de corrientes de alta DBO y/o DQO, como la alta concentración de fósforo y nitrógeno que alteran/favorecen el crecimiento de algas que desplazan a la flora del lugar.

La aplicación y seguimiento de indicadores o KPI se establece como una herramienta importante en el control de los sistemas, estableciendo las bases de una operación más amigable ambientalmente hablando.

## Indicadores Medioambientales

El uso de los indicadores, nos ofrece una rápida visualización del estado de funcionamiento del sistema, que a su vez está relacionado con la calidad de los efluentes que serán volcados.

La tabulación de las variables nos permite visualizar rápidamente los rangos de operación y las consecuencias de los desvíos, convirtiéndose en una herramienta de fácil aplicación para el seguimiento de la performance.

## Bibliografía

- Aqualab, Microbiología Industrial (s.f.). *"Cartilla de resultados positivos"*  
<http://www.aqualab.com.ar>
- Baird R. B., Eaton A. D. & Rice E. W. (2017). *"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition"*. Washintong DC: American Public Health Association.
- Flynn D. J. (2009). *"The Nalco Water Handbook"*. McGraw-Hill.
- Hach Company. (2000). *"Manual de Análisis de Agua, 2da Edición"*. Loveland, Colorado, USA: Hach.
- Harston, J.D. & Ropital, F. (2004). *"Control of Corroton in Cooling Waters"*. London, UK: Maney.
- Herro H. M. & Port R. D. (1993). *"The Nalco Guide to Cooling Water Systems Analysis"*. McGraw-Hill.
- Niño Z., Pérez S. & Vásquez M. (2007). *"Content of Microorganisms in the Cooling Water of Piping Machine in a Rubber Plant"*. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*.
- Schutte F. (2006). *"Handbook for the Operation of Water Treatment"*. Republico f South Africa: Department of Chemical Engineering – University of Pretoria.
- SUEZ Water Technologies & Solutions. *"Handbook Industrial Water Treatment"*  
<http://www.suezwatertechnologies.com/handbook/handbook-industrial-water-treatment>