The background features a teal color with various gear icons in white and light blue, and a circuit-like line pattern on the right side.

EL MANTENIMIENTO como herramienta para conseguir infraestructura de alta calidad y durabilidad

Cinthya Pastor



**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

Pastor, Cinthya.

El mantenimiento como herramienta para conseguir infraestructura de alta calidad y durabilidad /
Cinthya Pastor.

p. cm. — (Monografía del BID ; 772)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Infrastructure (Economics)-Latin America. 2. Pavements-Maintenance and repair-Latin America. 3. Roads-Maintenance and repair-Latin America. 4. Waterworks-Maintenance and repair-Latin America. 5. Bridges-Maintenance and repair-Latin America. I. Banco Interamericano de Desarrollo. Sector de Infraestructura y Energía. II. Título. III. Serie.

IDB-MG-772

Palabras clave: Mantenimiento, Infraestructura, Eficiencia

Clasificaciones JEL: D61, E22, H54, O10, R42

Este documento es un producto del programa de investigación desarrollado para la preparación del libro insignia del BID 2020: Servicios de Infraestructura en América Latina. Para conocer todos los documentos del programa de investigación ver:

www.iadb.org/serviciosdeinfraestructura

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2019 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.





CONTENIDO

1	Motivación	4
2	Revisión de la literatura y evidencia	6
3	Tipos de mantenimiento.....	10
4	Falta de mantenimiento en ALC.....	16
5	Experiencia internacional	23
6	Conclusiones.....	28
7	Referencias.....	30



1

Motivación



Con frecuencia se menciona la importancia de la infraestructura para el crecimiento y desarrollo; y se hace hincapié en la importancia de invertir para expandir la infraestructura para cumplir con las demandas de la población y mejorar la competitividad. Sin embargo, una vez que la infraestructura está construida, a menudo se da por descontado que ésta continuará ofreciendo servicios del nivel cualitativo observado inmediatamente después de terminada la construcción.

La realidad es que la infraestructura se deteriora con el tiempo. No importa que tan bueno haya sido el diseño, implementación o calidad de los materiales de la infraestructura, si la infraestructura no se mantiene, ésta falla. El propósito del mantenimiento es conservar (o poner a punto) un activo que sufre deterioro o depreciación por su uso para que éste pueda cumplir con sus funciones sin fallos o interrupciones (o minimizarlas) (Congressional Budget Office, 2007). Por si fuera poco, en el caso de la infraestructura, la depreciación de los activos no es lineal, motivo por el cual, la mayoría de las veces, el deterioro no se hace visible hasta que el mantenimiento ya no puede revertir los daños y se requiere una rehabilitación o una reconstrucción que resulta mucho más costosa (Rioja, 2013). Por ejemplo, entre 1992 y 2005, Perú gastó siete veces más en rehabilitar carreteras desatendidas que lo que hubiera costado su mantenimiento de rutina (Cusato y Pastor, 2007).

La falta de mantenimiento adecuado de la infraestructura eleva los costos, tanto para el proveedor de la infraestructura, como para los usuarios. En el caso de las carreteras, por ejemplo, una infraestructura deteriorada se asocia con la depreciación de vehículos, tiempos de viaje prolongados, mayor consumo de combustible y mayor índice de accidentes. En el caso de la electricidad, la falta de mantenimiento aumenta pérdidas, picos de tensión, inestabilidad del sistema, averías e incendios. En el caso del agua, la falta de mantenimiento aumenta las fugas y pérdidas. En algunos casos, una infraestructura

pobremente mantenida también puede llevar a que las firmas inviertan en infraestructura por cuenta propia (adquiriendo generadores, por ejemplo) desviando recursos de su actividad principal (Rioja, 2013).

El mantenimiento debe ser considerado un componente principal de la gestión de los activos de infraestructura de un país. Lamentablemente, a pesar de su importancia, existe un sesgo en contra del mantenimiento en el sector infraestructura que no tiene lógica económica. Los activos de infraestructura se planifican para que presten servicios durante décadas y esto implica una inversión en su mantenimiento. La falta de mantenimiento hace que la tasa de retorno social de la inversión en infraestructura sea mucho menor que la calculada al momento de la construcción. En otras palabras, no invertir en mantenimiento es equivalente a un mal uso de los recursos de la sociedad.

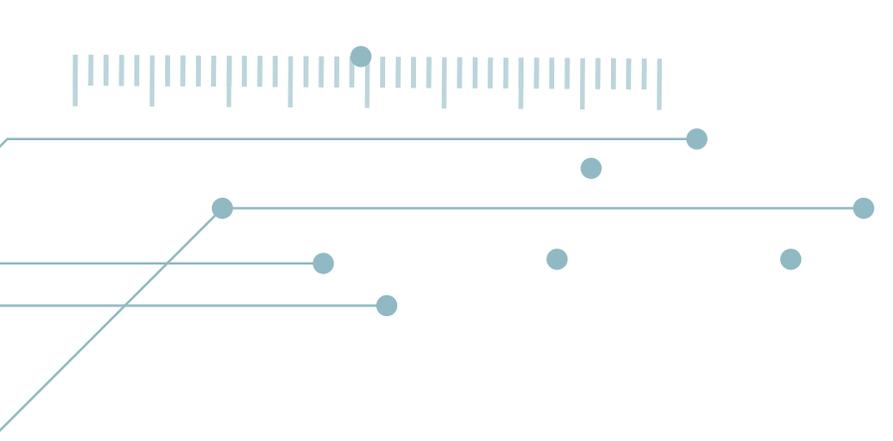
Diversas razones, que en la mayoría de los casos están presentes simultáneamente, explican por qué no se invierte la cantidad suficiente en mantenimiento: limitada disponibilidad de recursos, poca capacidad de ejecución, corrupción, favoritismos y la falta de incentivos contractuales para mantener adecuadamente. A su vez, la construcción de nueva infraestructura es políticamente más atractiva ya que recibe un valor significativamente más alto por parte de los ciudadanos que los proyectos de mantenimiento de infraestructura ya existente (Serebrisky et al, 2018).

El presente documento busca hacer una revisión del concepto de mantenimiento de infraestructura, sus implicancias y tipos, además de poner en perspectiva el problema en América Latina y el Caribe (ALC) y el resto del mundo. Todo esto con el objetivo de presentar el mantenimiento como un modo eficaz y eficiente de conseguir una buena infraestructura y provisión de los servicios relacionados.

The background is a solid teal color. It features several white gears of different sizes and orientations. A network of white lines, resembling a circuit board or data flow, connects various points across the page. In the bottom left corner, there are several white hexagons of varying sizes, some overlapping. The overall aesthetic is technical and modern.

2

Revisión de la literatura y evidencia

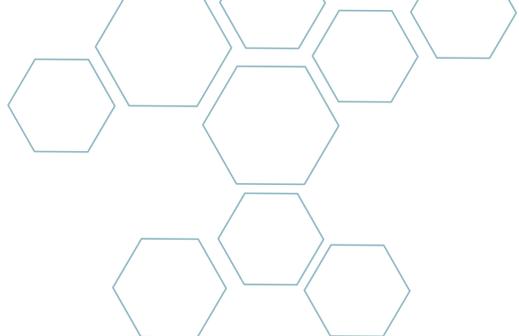


Si bien el tema de mantenimiento de infraestructura ha sido abordado de manera muy limitada en el diálogo y en la literatura económica, esto no quiere decir que sea nuevo. Por el contrario, la importancia del mantenimiento sobre la durabilidad de los activos fijos, la producción futura y el rendimiento económico ha sido reconocida desde las primeras décadas del siglo XIX (Hayek, 1935; Hicks, 1942; Haavelmo, 1960).

La literatura académica, centrada en regiones desarrolladas, encuentra impactos significativamente positivos en diversas dimensiones relacionadas, tales como los costos totales (Gwilliam y Shaizi, 1999); la productividad (Rioja, 2013), el crecimiento del sector privado (Kalaitzidakis y Kalyvitis, 2005), o el bienestar de los hogares (Escobal y Ponce, 2003).¹

Gwilliam y Shalizi (1999) estudiaron que retrasar el mantenimiento de caminos incrementa, no solo los costos totales, pero el valor presente del costo futuro. Herral y Faiz (1988) estimaron que si los caminos se deterioraran al punto de necesitar ser reconstruidos, restaurarlos costaría de 3 a 5 veces más que mantenimiento efectivo y oportuno.

Rioja (2013) estudió que la tasa marginal de gasto en mantenimiento es más productiva en comparación a nuevas inversiones, no obstante, encuentra que el problema se relaciona con el financiamiento adecuado. Los gobiernos tienen normalmente más facilidades para acceder a financiamiento de instituciones internacionales para la construcción de nueva infraestructura que para su mantenimiento. Así, los gobiernos deben obtener el dinero de sus otras fuentes de ingreso, lo que los desincentiva. En esta línea, Easterly et al. (2008) aseguran que el gasto en mantenimiento de infraestructura es el concepto que ha atraído más atención dentro del diseño de la política



fiscal. Esto se debe a que se les percibe como gastos corrientes que no rinden retornos fiscales. Pero por el contrario, el gasto en mantenimiento determina la vida útil del capital de infraestructura, y por ende, tiene un efecto de creación de capital como si fuera inversión.

Kalaitzidakis y Kalyvitis (2005) estudiaron el impacto del mantenimiento en la infraestructura para el periodo 1956-1998 y sus resultados sugieren que el crecimiento del sector privado en Canadá se explica no solo por el nivel de infraestructura sino también por la calidad de ésta, la cual depende del mantenimiento.

Escobal y Ponce (2003) midieron el impacto positivo de la rehabilitación de caminos rurales en Perú en el bienestar de los hogares enfocándose en dos indicadores: el consumo y el ingreso per cápita del hogar. Asimismo, reconocieron la importancia de asegurar que el mantenimiento sea actividad permanente y no transitoria, de tal manera que los hogares puedan tomar decisiones de consumo e inversión de largo plazo que maximicen a su vez el impacto positivo del mantenimiento.

A pesar de los impactos positivos identificados por la literatura económica desde las primeras décadas del siglo XIX, los países no invierten adecuadamente en mantenimiento. Resulta difícil proveer evidencia para respaldar esta respuesta debido a la falta de información de gasto en mantenimiento, lo cual a su vez impide identificar las necesidades de mantenimiento.

Así, son escasas las estimaciones sobre la inversión óptima en mantenimiento. Los pocos estimados estiman cifras de mantenimiento óptimo que rondan entre 2% y 8% para diferentes sectores o economías en la región (Fay y Yepes, 2003; Estache y Fey, 2007; Rioja, 2003). Fay y Yepes (2003) estimaron que se debe invertir 2.3% del PBI en mantenimiento anualmente en países en

¹ Existe un método utilizado en la región para resolver algunas de las deficiencias y problemas planteados con los métodos tradicionales de contratación de mantenimiento vial. Se trata de un contrato de mantenimiento por niveles de servicio, denominado Contrato de Rehabilitación y Mantenimiento (CREMA). El contratista se encarga de la administración y mantenimiento del activo vial y el pago se asocia con el cumplimiento de un nivel de servicio claramente definido en el contrato, en lugar de asociarse a la cantidad de trabajo ejecutado. No obstante, no existe literatura que evalúe rigurosamente las ventajas de esta modalidad. Parece haber diferencias respecto al éxito de los contratos basadas en rendimiento en función del estado de capacidades de la administración pública en el sector (Alberti y Pereyra, 2017).

desarrollo. No obstante, una crítica común a este estudio es que calcula mantenimiento del activo tal y como está, sin considerar también la inversión necesaria para rehabilitarlo. Estache y Fay (2007) estimaron que se debe invertir 4% del PBI en mantenimiento anualmente. Rioja (2003) y Kalaitzidakis y Kalyvitis (2004) sostienen que los estándares son bastante predecibles y que es aproximadamente 2% del stock de capital para electricidad, caminos y ferrocarriles; 3% del stock de capital para agua y saneamiento y 8% del stock de capital para telecomunicaciones.

Asimismo, la evidencia empírica sobre la medición de las necesidades de inversión en mantenimiento es limitada y se centra en países desarrollados. Por ejemplo, expertos de Estados Unidos sugieren un gasto anual de entre US\$145,000 millones y US\$194,000 millones para mantener la calidad actual de rutas y puentes del país (Kahn y Levinson, 2011). La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles de Estados Unidos calcula que las carreteras pobremente reparadas en el estado de Massachusetts costaron cerca de US\$2,300 millones a los conductores, por lo que la cifra nacional excedería los US\$100,000 millones. Kahn y Levinson (2011) calculan que cada dólar destinado a mantenimiento preventivo evitaría entre US\$4 y US\$10 en reparaciones futuras en Estados Unidos. Por su parte, en el 2008 Canadá requería invertir \$123,000 millones para mantener su infraestructura debido a que 79% de la vida útil de los caminos, sistemas de alcantarillado y otros activos de infraestructura económica habían culminado su vida útil a ese momento (Brox, 2008).²

Por su parte, la medición de las necesidades de inversión en mantenimiento en países en desarrollo es escasa.

Heggie (1995a, b) calculó que si África hubiera invertido US\$12,000 millones en mantenimiento vial periódico durante la década de 1980, podría haber ahorrado US\$45,000 millones en reconstrucciones y rehabilitaciones a mediados de la década siguiente. También calculó que las carreteras mal mantenidas en dicha región aumentaron los costos de reparación de camiones de carga en aproximadamente US\$14,000 anuales por vehículo.³

El Banco Mundial desarrolló el modelo de Herramientas de Evaluación de la Red Vial ("*Road Network Evaluation Tools*", o RNET) para ayudar a los responsables de la

toma de decisiones en África Subsahariana a realizar inversiones en mantenimiento (Sub-Saharan Africa Transport Policy Program, 2017). Este modelo permite monitorear la condición de las carreteras, simular el desempeño de la red vial en diferentes escenarios de mantenimiento y presupuesto, y calcular el ingreso proveniente de cobrar a los usuarios por el uso de los caminos, como así también calcular la brecha entre dichos ingresos y el presupuesto. La herramienta también permite que los líderes identifiquen el estándar de mantenimiento óptimo para cada carretera y el costo mínimo de mantenerla en la condición actual o de alcanzar otros niveles de servicio. Se han realizado varias inversiones de mantenimiento en África utilizando esta herramienta. No obstante, su éxito en materia de mejorar o aumentar el mantenimiento no ha sido establecido aún.

En América Latina y el Caribe (ALC) no existen informes sistemáticos que indiquen cómo y cuánto invierte la región en mantenimiento, sumado a que hay pocos informes que expongan la falta de mantenimiento, su relevancia y las necesidades de inversión en éste. Además, este gasto es difícil de identificar entre las cuentas nacionales, ya que los países utilizan metodologías heterogéneas que hacen que la identificación y el informe de los gastos de mantenimiento sean demasiado costosos. Esta es la razón por la que iniciativas, como Infralatam,⁴ reportan datos de inversión en infraestructura en la región pero por falta de datos no presentan información sobre inversión en mantenimiento.

A pesar de la falta de información homogénea sobre mantenimiento, deben destacarse algunas excepciones. Por ejemplo, Paraguay publica sus gastos de mantenimiento en los informes nacionales. Otro país para el que se cuenta con información actualizada acerca del mantenimiento es Perú dentro de su Sistema Integrado de Administración Financiera (SIAF). Haciendo uso de esta información, Cusato y Pastor (2007) identificaron inversiones históricas en la rehabilitación de carreteras que en ese momento se encontraban en mal estado por la falta de inversión en mantenimiento. Identificaron las que habían sido rehabilitadas durante la década de 1990; luego siguieron el mantenimiento que recibieron y evaluaron su estado al momento del estudio. Esto les permitió identificar una brecha de mantenimiento, pero también el costo de su posterior rehabilitación, y compararlo con el costo típico de mantenimiento. Así,

2 Igualmente, Gagnon et al. (2008) estimaron en el 2008 el 57% de puentes, 53% de las carreteras y 63% de las plantas de tratamiento de agua en Canadá habían superado su vida útil. Debe mencionarse que Canadá es uno de los pocos países que colecta regularmente data en mantenimiento mediante la Encuesta Canadiense de Gastos de Capital y Reparación Rioja (2013).

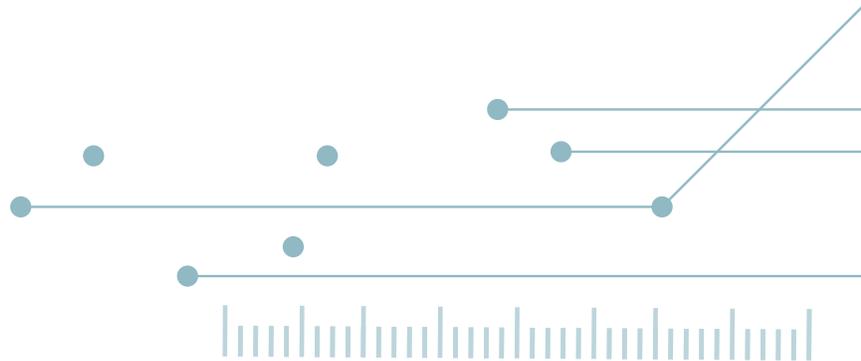
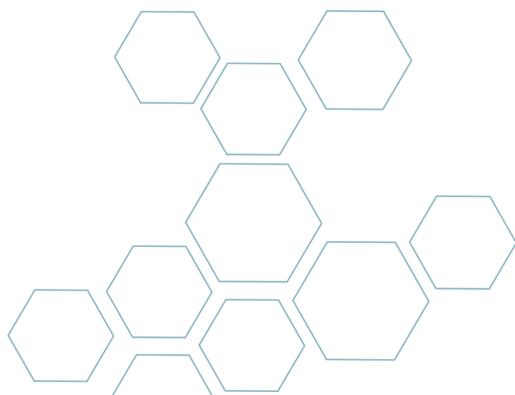
3 Se consideró una combinación de vehículo entre tráiler y tractor con 22 ruedas.

4 Infralatam es una iniciativa compartida entre el BID, CEPAL y CAF que presenta la inversión pública en infraestructura en ALC. www.infralatam.info

calcularon que entre 1992 y 2005, Perú gastó siete veces más en hacer que carreteras desatendidas volvieran a ser plenamente operativas versus lo que hubiera costado su mantenimiento de rutina.

Lamentablemente la limitada información y sistematización de la inversión en mantenimiento en los países en desarrollo, particularmente en ALC, dificulta la determinación de niveles óptimos de inversión en mantenimiento de infraestructura o de requerimientos de inversión en mantenimiento en infraestructura para ponerla en buenas condiciones y mantenerla en dichas condiciones en el futuro.

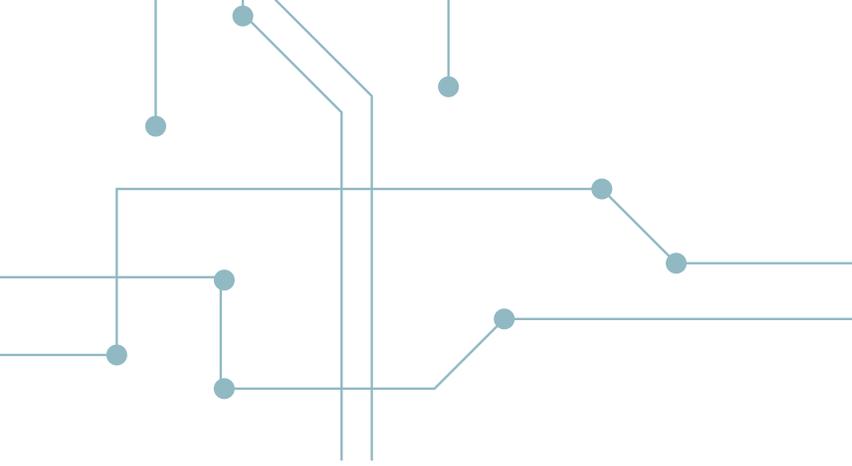
El presente estudio no busca medir la tasa óptima o las brechas de inversión en mantenimiento. Su objeto es relevar la literatura, destacar la importancia del mantenimiento de la infraestructura y documentar ejemplos exitosos (y no tan exitosos) de implementación de políticas de mantenimiento en ALC.





3

Tipos de mantenimiento



Como se ha mencionado antes, el propósito del mantenimiento es conservar (o poner a punto) un activo que sufre deterioro o depreciación por su uso para que éste pueda cumplir con sus funciones sin fallos o interrupciones (o minimizarlas) (Congressional Budget Office, 2007). En particular, este estudio se centra en el mantenimiento de activos de infraestructura.

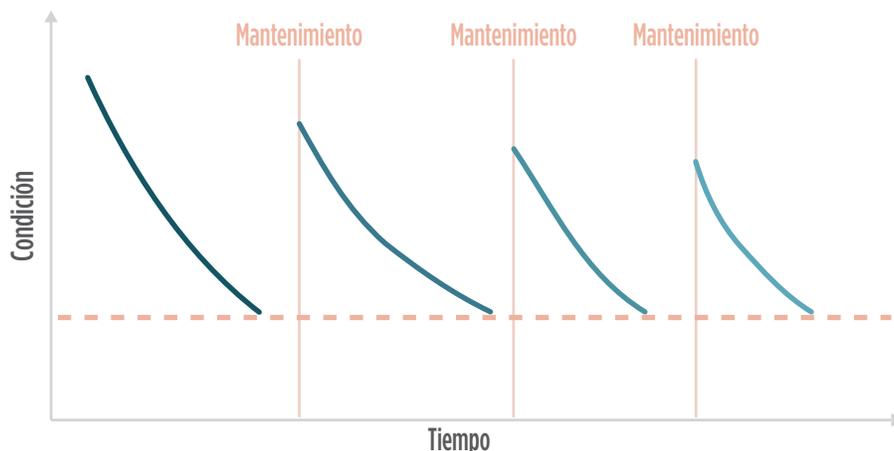
La literatura identifica diferentes tipos y clasificaciones de mantenimiento de infraestructura. Sin embargo, éstas se pueden agrupar en dos tipos en función al momento de la intervención: mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo.

3.1 Mantenimiento correctivo

Este mantenimiento corrige las fallas o averías del activo una vez que son observadas. Así, normalmente se realiza después de aparecer la avería o falla, por lo que permite (en lugar de prevenir) el desgaste del activo. En este caso no se requiere mucha información del uso o comportamiento del activo, pues el mantenimiento solo se realiza post falla o avería (figura 1).

Un análisis más profundo del mantenimiento correctivo podría cuestionar si efectivamente se trata de un mantenimiento, o por el contrario, correspondería más a un enfoque de anti-mantenimiento, pues el funcionamiento adecuado de la infraestructura se ve interrumpido y las acciones tomadas son post avería. Por este motivo, los costos del mantenimiento correctivo son bastante elevados, pues involucra altos costos de repuestos a último momento o requiere mantener un inventario de estos repuestos, se presentan costos laborales de sobretiempo, se tienen horas muertas del activo y se le mantiene indisponible para ser productivo (Mobley, 2002). Esto sumado al costo de la depreciación irrecuperable de la vida útil del activo ya que muchas veces el mantenimiento muy tardío ya no puede revertir los daños.

Figura 1. Mantenimiento correctivo



Fuente: Mobley (2002)

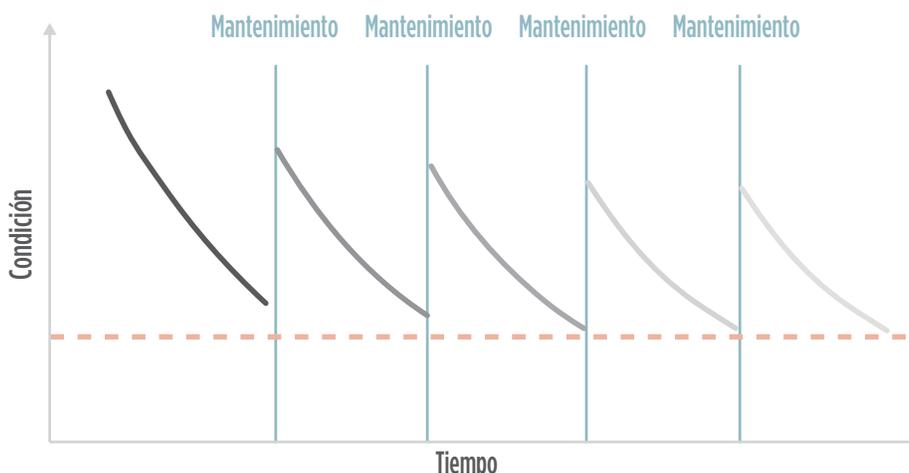


3.2 Mantenimiento preventivo

Este mantenimiento se realiza con una programada antelación a una avería con el objetivo de mantener un nivel de servicio determinado y extender la vida útil del activo. En especial porque la depreciación de los activos de infraestructura no es lineal, motivo por el cual el mantenimiento muy tardío ya no puede revertir los daños en muchos casos. En lugar de esperar a que ocurra una falla o que se presente un síntoma, se programan intervenciones anticipadas de manera sistemática. Este tipo de mantenimiento puede darse de dos maneras: a) se establecen intervenciones fijas o b) se interviene conforme se vea la evolución del activo y sus indicadores.

En el primer caso, se trata de un **mantenimiento preventivo programado**. Normalmente se establecen intervalos de tiempo⁵ o también de uso (especialmente para aquellos activos que tienen cambios en la carga de trabajo y un intervalo de tiempo se hace más difícil) en base a la experiencia, la data histórica o los análisis científicos. La figura 2 muestra un umbral mínimo de condición del activo y en un momento determinado (o nivel de uso) se realiza el mantenimiento para evitar que decaiga hasta dicho umbral. Este tipo de mantenimiento tiene una gran ventaja en cuanto a que se puede planear, programar y presupuestar desde antes. Asimismo, al ser preventivo alarga la vida útil del activo.

Figura 2. Mantenimiento preventivo programado



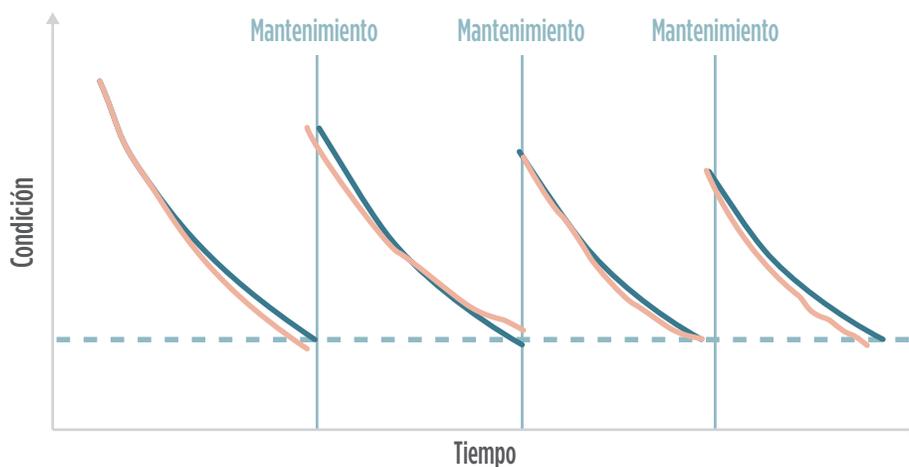
Fuente: Mobley (2002)

El segundo caso se trata de un **mantenimiento preventivo predictivo**. Este mantenimiento es aquel que se realiza como resultado de predicciones del estado y operatividad del equipo y, por ende, del momento en el que el equipo quedará fuera de servicio. Se realiza un monitoreo cercano de su funcionamiento determinando su evolución, y por lo tanto, el momento óptimo en el que las reparaciones deben efectuarse y así minimizar el costo de fallas no programadas. Para aplicar este mantenimiento, es necesario identificar variables físicas (temperatura, vibración, consumo de energía, etc.) cuya variación sea indicativa de problemas que puedan estar apareciendo en el equipo. A medida que la tecnología avanza, el concepto de mantenimiento se vuelve

flexible y adopta diferentes enfoques y herramientas y éste es el caso. El mantenimiento predictivo es el tipo de mantenimiento más tecnológico, pues requiere de medios técnicos avanzados, y en ocasiones, de fuertes conocimientos matemáticos, físicos y/o técnicos. La figura 3 muestra cómo se da el mantenimiento predictivo. La línea azul representa la condición esperada del activo mientras que la línea rosa la condición real. Se establece un límite para el estado del activo y de alcanzar la condición esperada este límite se realiza el mantenimiento. Podría ser que la condición real sea peor que la predicha, sin embargo, se espera que los modelos se asemejen mucho a la realidad y que, por ende, se estime el momento perfecto para el mantenimiento.

5 Aunque solo 18% de los activos tienen una falla relacionada a su edad. Fuente: ARC view, Optimize Asset Performance with Industrial IoT and Analytics, August 2015 <https://www.ibm.com/downloads/cas/AVMWDMGZ>

Figura 3. Mantenimiento preventivo predictivo



Fuente: Mobley (2002)

Figura 4. Tipos de mantenimiento

Tipo de Mantenimiento	Correctivo	Preventivo programado	Preventivo predictivo
En función a	f (avería , falla)	f (tiempo/uso)	f (tendencias, monitoreo, análisis datos)
Momento de intervención	Fallas Interrupciones Averías Emergencias	Periódico Intervalos fijos Momentos fijos Límites establecidos	Predicción óptima

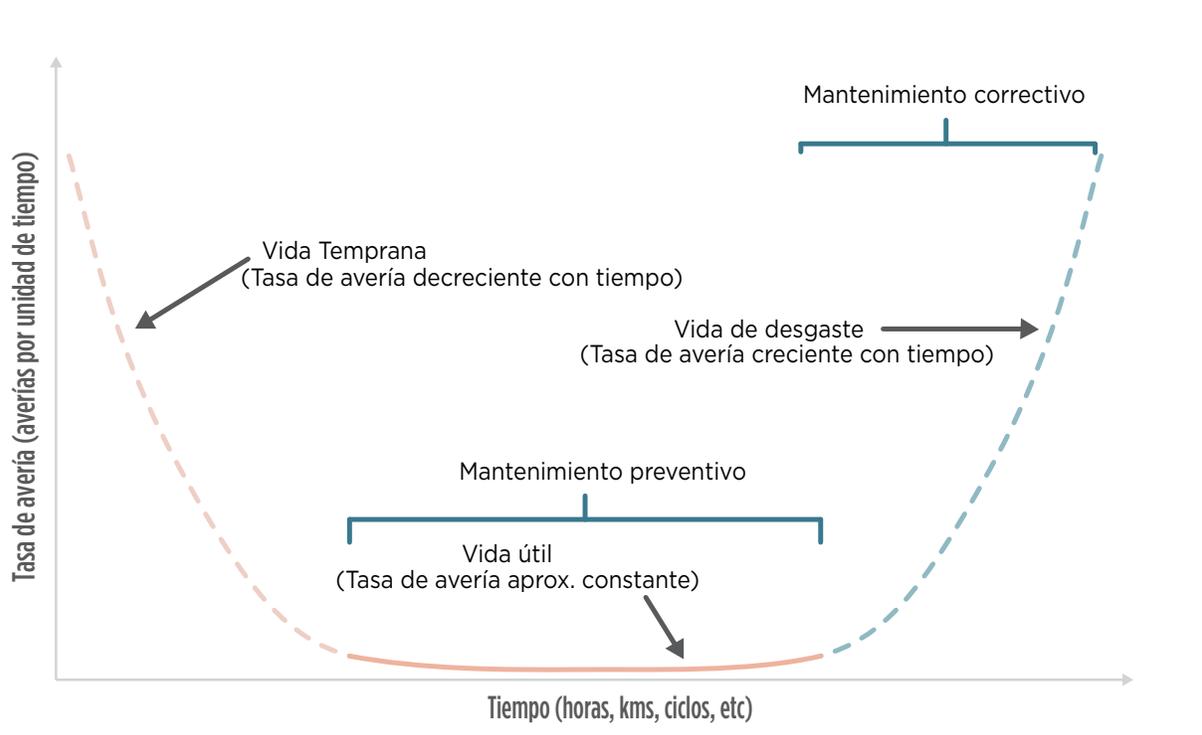
Elaboración propia.

3.3 Mantenimiento correctivo versus mantenimiento preventivo

Si bien hay más de un tipo de mantenimiento, la presente sección muestra de manera aplicada los *trade-offs* entre ellos. La figura 5 muestra como ejemplo el ciclo de vida de una locomotora y en qué momento se daría cada mantenimiento. La curva de tiempo promedio de falla tiene una curva con forma de U. Inicialmente, una máquina nueva⁶ tiene

una alta probabilidad de fallar debido a problemas de instalación durante las primeras semanas de operación. Luego la probabilidad de falla se reduce a niveles muy bajos por un periodo largo hasta que se aproxime al fin de su vida útil en donde la probabilidad de falla vuelve a aumentar significativamente. De esta manera, se puede programar el mantenimiento durante una de dos etapas: i) durante la etapa de vida útil (mantenimiento preventivo) o ii) durante la etapa de desgaste (mantenimiento correctivo) (Mobley, 2002).

Figura 5. Mantenimiento correctivo versus preventivo



Fuente: Mobley, 2002

Los *trade-offs* entre ambos tipos de mantenimiento se muestran en la figura 6. Específicamente se muestra la interrelación entre el mantenimiento preventivo, el correctivo y las pérdidas de producción. El eje vertical representa el costo y el eje horizontal muestra el nivel de mantenimiento preventivo en porcentaje del 0 a 100.⁷ A mayor mantenimiento preventivo menor el mantenimiento correctivo y los costos de paralización. El reto consiste en encontrar el nivel óptimo.

Se pueden apreciar cuatro curvas en el gráfico:

La curva rosa muestra los costos de mantenimiento preventivo. Esta curva tiene una pendiente positiva ya que a mayor mantenimiento preventivo mayor el costo asumido en este mantenimiento.

La curva gris es la de costos de mantenimiento correctivo, la cual presenta una pendiente negativa, pues a mayor mantenimiento preventivo menor mantenimiento correctivo y, por ende, menor el costo en éste.

6 Este gráfico intenta explicar de manera referencial el momento de cada tipo de mantenimiento para el caso de una locomotora. No obstante, siempre depende de la vida útil y comportamiento del activo de infraestructura en cuestión.

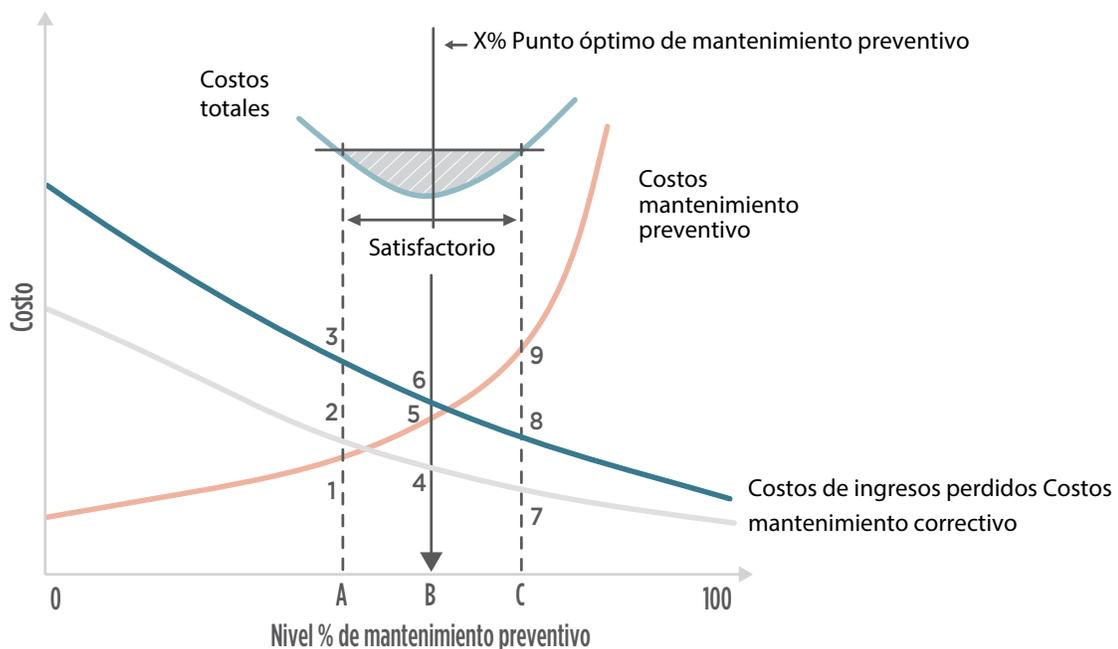
7 Cabe resaltar que el mantenimiento preventivo nunca puede llegar a 100 por ciento porque siempre van a haber contingencias que no se pueden prevenir por lo que siempre se tendrá que hacer algún mantenimiento correctivo.

La curva azul muestra el costo de las pérdidas de producción originadas por las paradas por fallas (ingresos perdidos). Tiene una pendiente negativa pues a mayor mantenimiento preventivo, menores paradas por fallas y menor ingreso dejado de percibir.

La curva celeste es la de costo total y representa la suma del costo del mantenimiento preventivo, del mantenimiento correctivo y de los costos de paralización. Esta curva tiene una forma de U. Al lado izquierdo, la curva desciende porque a mayor mantenimiento preventivo se reducen los costos de mantenimiento correctivo y las paradas. En un escenario como el A, el costo total refleja la suma de los puntos 1, 2 y 3. Sin

embargo mientras se va incrementando el costo total, los retornos producidos son cada vez menores hasta que la curva total toca su mínimo. En un escenario como el B, el costo total refleja la suma de los puntos 4, 5 y 6. Este es el punto óptimo X de mantenimiento preventivo justo donde los costos de éste siguen siendo menores a los gastos de mantenimiento correctivo más las paradas. Luego de ese punto, la curva de costo total asciende ya que el costo del mantenimiento preventivo supera los costos del mantenimiento correctivo más las paradas, como en un escenario como el C donde el costo total refleja la suma de los puntos 7, 8 y 9.

Figura 6. Relación entre el costo y nivel de mantenimiento preventivo



Fuente: Mobley (2002).



4

Falta de mantenimiento
en ALC



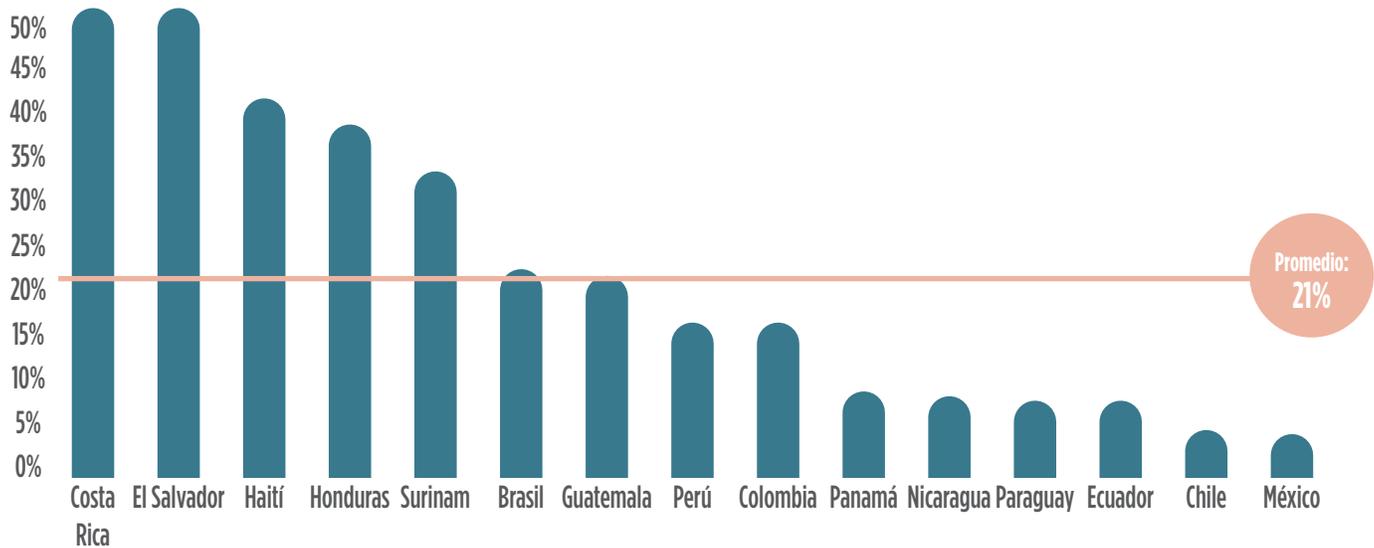
4.1 Sustancial proporción de la red vial en mal estado en ALC

Un indicador de mantenimiento que se puede considerar para el sector transportes es el estado de la red vial. La red vial se desgasta por diversas razones (uso, tráfico, clima, tiempo, etc.) por ello, mantenimientos rutinarios y periódicos son requeridos para preservar su buen estado. El mal estado de la red vial se correlaciona con la falta de mantenimiento de dicha red. La figura 7 muestra que una alta proporción de la red de carreteras primarias pavimentadas está en malas condiciones en la región. En promedio, 21% de la red vial primaria pavimentada en ALC se encuentra en malas condiciones, lo que podría ser indicador de la falta significativa de mantenimiento.

Como ya se ha mencionado, la evidencia para analizar la subinversión en mantenimiento es escasa debido a la alarmante falta de información disponible sobre los gastos en mantenimiento de infraestructura.

Dada esta situación, la siguiente sección intenta analizar algunos indicadores y ejemplos de casos en ALC con los que se puede aproximar la falta de mantenimiento o bien políticas que se han implementado para mejorarlo. La selección de casos no sigue una metodología, sino que es el resultado de la identificación de ciertos casos dada la muy escasa disponibilidad de información.

Figura 7. Red vial primaria en mal estado en ALC*
(como % de la red primaria pavimentada)



*El año de la data varía entre 2012 y 2019.

Nota: Chile, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Perú y Honduras: red primaria pavimentada; Guatemala y Nicaragua: red total pavimentada; Brasil: red federal y principal estatal pavimentada; Colombia: red primaria pavimentada no concesionada; Panamá: red interurbana pavimentada; México y Haití: red primaria pavimentada y no pavimentada; Surinam: red total pavimentada a cargo de la Autoridad de Caminos (Road Authority).

Elaboración propia basada en bases de datos del sector Transporte del BID.

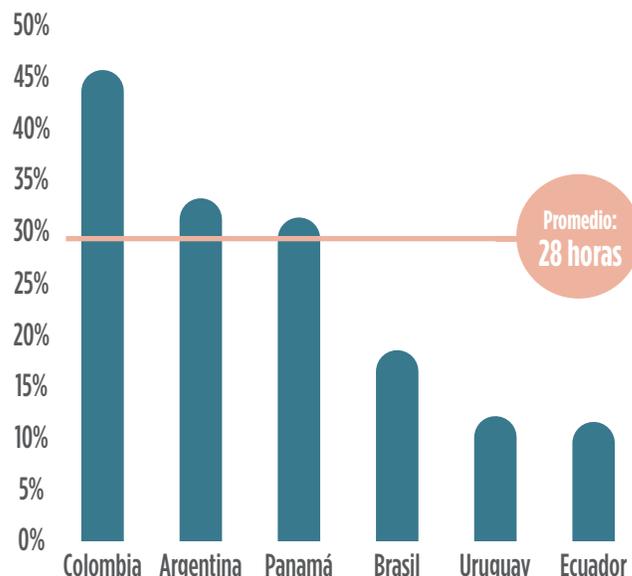
4.2 Considerable duración de las interrupciones eléctricas en ALC

En el caso del sector electricidad, la duración de las interrupciones eléctricas guarda correlación con la falta de mantenimiento. Los resultados muestran que algunos países tienen mucho espacio para mejorar (figura 8), siendo la duración promedio de los cortes de electricidad de 28 horas.

4.3 Significativas pérdidas físicas de agua en ALC

Lo mismo sucede en el sector de agua, en donde las pérdidas físicas (agua perdida entre la producción hasta la llegada a los usuarios) indicarían una proxy de falta de mantenimiento. Lamentablemente, las pérdidas físicas no son comúnmente reportadas por los reguladores, sino que se reportan las pérdidas totales como porcentaje del agua ofertada, las cuales incluyen pérdidas físicas y comerciales (conexiones ilegales a la red o falta de micromedición). Las pérdidas totales igual resultan un referente para la falta de mantenimiento en países con altas tasas de pérdidas totales (figura 9). Aunque la evidencia es escasa, la evidencia presentada muestra que el mantenimiento está lejos de ser óptimo y, por lo tanto, se puede argumentar que ALC no está invirtiendo la cantidad adecuada en mantenimiento.

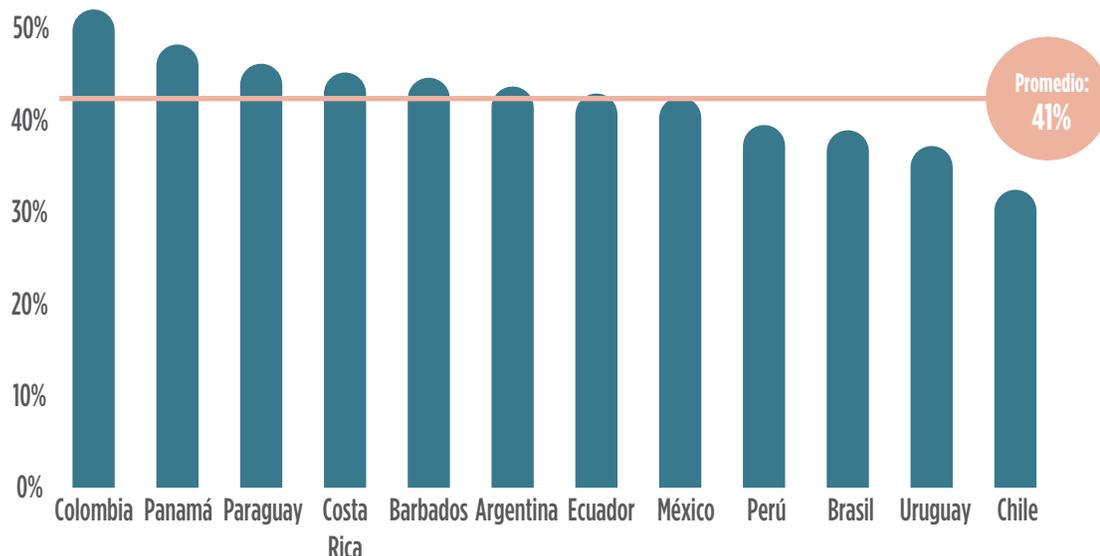
Figura 8. Duración de las interrupciones eléctricas en ALC
(en promedio* de horas por corte)



*Se considera el Índice de Duración Promedio de los Cortes del Sistema (SAIDI). El promedio por país se calcula como un promedio ponderado de la data disponible de las compañías de distribución. Los datos corresponden al 2015.

Fuente: Sanin (2019)

Figura 9. Pérdidas de agua en ALC*
(como % del agua ofertada)



*El año de la data varía entre 2015 y 2018.

Fuente: ADERASA (2018), Sacmex (2018), Latin Consult (2017), Stantec (2016).

4.4 El costo de la falta de mantenimiento de las hidroeléctricas en Brasil⁸

El presente caso identifica las pérdidas económicas en el sector energía debido a paradas forzadas de las centrales hidroeléctricas en Brasil.

A 2018, el sector eléctrico en Brasil es el más grande de ALC y el octavo más grande del mundo con respecto a la capacidad instalada (157 gigawatios - GW) y producción (637 teravatios-hora -TWh). La matriz energética es principalmente renovable, en particular, 65% se basa en energía hidroeléctrica.

El sistema interconectado brasileño cuenta con 147 centrales hidroeléctricas,⁹ de las cuales la mitad tiene más de 20 años de antigüedad. La central más antigua es Ilha dos Pombos (187 MW) con 94,6 años y la más nueva es UHE São Manoel (700 MW) con 0,7 años. La distribución de antigüedad se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Antigüedad de las centrales hidroeléctricas en Brasil

Edad en años	Cantidades	%
0 < UHE >= 20	73	50%
20 < UHE >= 40	26	18%
40 < UHE >= 60	38	26%
60 < UHE >= 80	8	5%
80 < UHE >= 90	0	0%
90 < UHE >= 100	2	1%
TOTAL	147	

Fuente: Alarcón y Nogueira (2018).

8 Esta sección se basa en Alarcón y Nogueira (2018).

9 A agosto de 2018.

10 Los autores usaron indicadores mensuales de desempeño de las centrales hidroeléctricas publicados por el Operador Nacional del Sistema Eléctrico brasileño (ONS).

11 Estas hidroeléctricas suman una potencia instalada de 28.2 GW.

12 Estas hidroeléctricas suman una potencia instalada de 18.0 GW.

13 Estas hidroeléctricas suman una potencia instalada de 3.6 GW.

Todos los años el sistema presenta pérdidas significativas debido a la indisponibilidad de las centrales hidroeléctricas. La indisponibilidad se calcula como la tasa equivalente de indisponibilidad forzada apurada (TEIFa) que cuantifica el porcentaje de horas que el equipo se detuvo debido a un motivo no planificado, denominado parada forzada.¹⁰

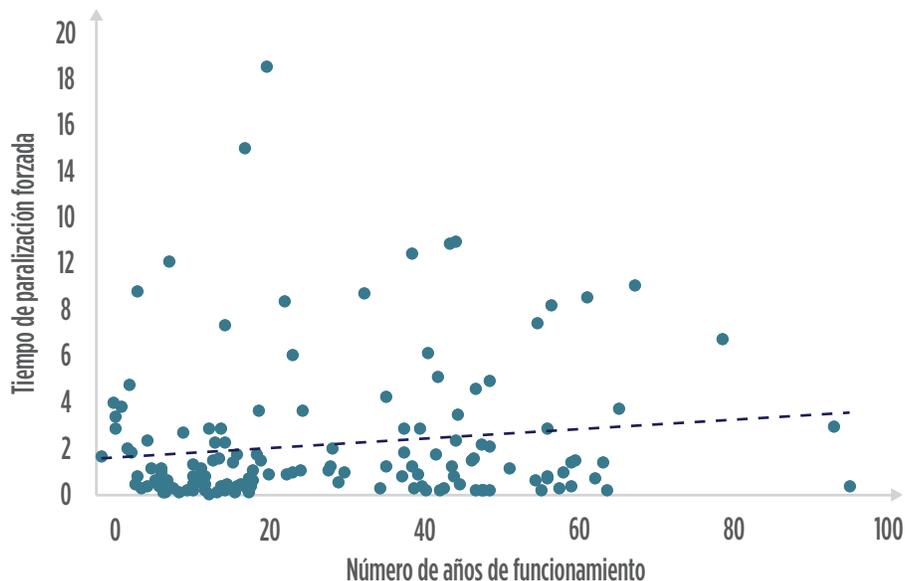
Además de la alta vulnerabilidad ante sequías, existe una gran preocupación en el sector por el envejecimiento de las centrales hidroeléctricas y la reducción en la capacidad de generación que esto conlleva, reflejada en las paradas forzadas. Una manera de visualizar cómo afecta la antigüedad a las hidroeléctricas es correlacionar los años de operación de las hidroeléctricas con las paradas forzadas.

La figura 10 muestra que casi no hay relación entre los años de operación de las centrales hidroeléctricas y sus paradas forzadas. Por lo que no se puede concluir que la antigüedad es el mayor determinante de las paradas forzadas de las centrales.

Si la antigüedad de las centrales por sí sola no es un determinante de las paradas forzadas, otro factor que estaría correlacionado con el aumento en el tiempo de las paradas forzadas sería la falta de mantenimiento de los equipos de las centrales hidroeléctricas. De hecho, según el Ministerio de Minas y Energía de Brasil, un valor del TEIFa por encima del 3% del tiempo de servicio de la central es un primer indicador de que la central debería considerar una rehabilitación.

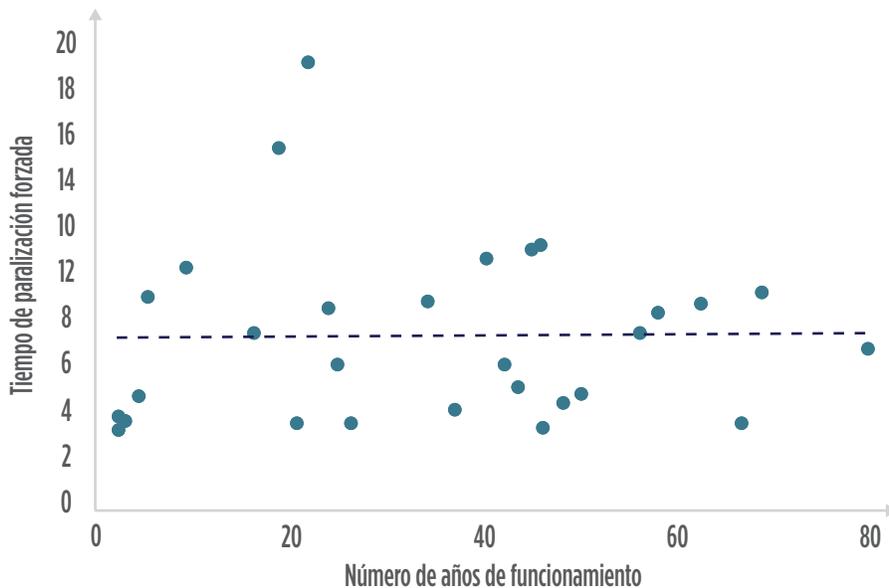
De las 147 centrales hidroeléctricas, 29¹¹ cuentan con paradas forzadas superiores al 3% del tiempo de horas de servicio de la central y que por ende, requerirían rehabilitación. De éstas, 16¹² operan con paradas forzadas por encima del 6%, mientras que 6¹³ operan con paradas forzadas superiores al 9%. La antigüedad de estas 29 centrales varía (y no se correlaciona con el nivel de paradas forzadas), habiendo 5 centrales con menos de 5 años de operación y una central con 78 años. Esto muestra nuevamente que no habría correlación entre los años de operación de las centrales hidroeléctricas y sus paradas forzadas (figura 11).

Figura 10. Relación entre años de operación de las centrales hidroeléctricas y el tiempo de paralización forzada*



*Cifras a Agosto 2018
Fuente: Alarcón y Nogueira (2018).

Figura 11. Centrales hidroeléctricas con significativo tiempo de paralización forzada* versus sus años de operación

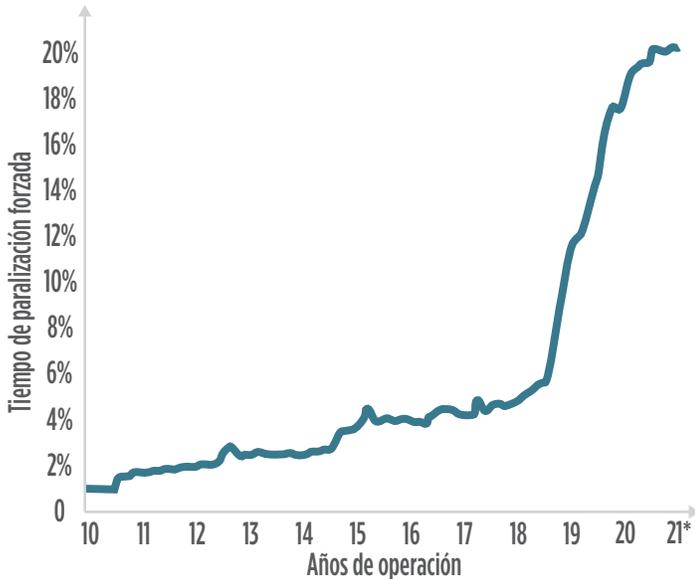


* Con un TEIFA superior a 3%, cifras a Agosto 2018.
Fuente: Alarcón y Nogueira (2018).

En particular, se pueden mencionar dos casos opuestos. Primero, el caso de la central hidroeléctrica de Guilma Amorim que cuenta con 21 años de operación y cuyas paradas forzadas han venido incrementándose recién desde hace 3 años hasta representar actualmente 18% de las horas de servicio de la central (figura 12). En segundo

lugar, se encuentra el caso de la central hidroeléctrica de Simplicio que con solo 6 años de operación, presenta paradas forzadas que representan 9% de las horas de servicio de la central (figura 13).

Figura 12. Tiempo de paralización forzada para la Central Guilma Amorim



*Cifras a Agosto 2018.
Fuente: Alarcón y Nogueira (2018).

El alto nivel de paradas forzadas en la generación hidroeléctrica brasileña evidencia una cantidad significativa de energía que no se está produciendo y permite calcular el costo asociado a realizar una menor inversión en mantenimiento de la que correspondería para maximizar el funcionamiento de las unidades generadoras.

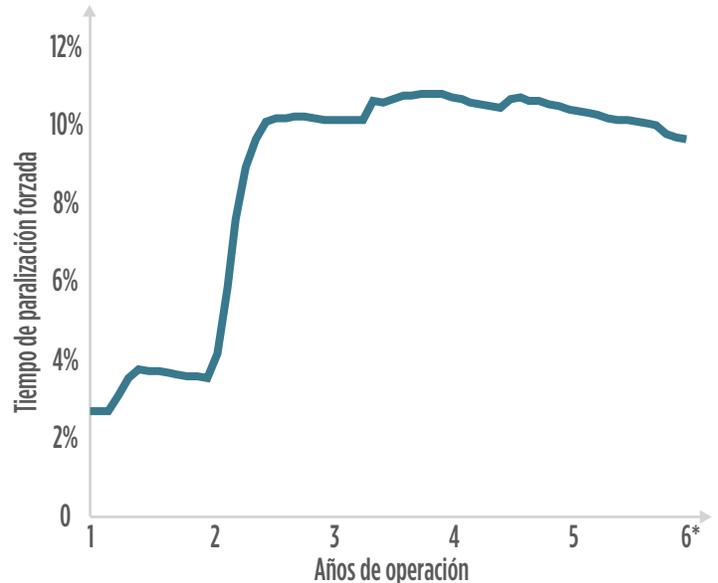
Utilizando la información de las tasas de paradas forzadas (TEIFa), Alarcón y Nogueira (2018), calcularon el total de energía anual que no se pudo generar debido las paradas forzadas.¹⁴ Los resultados ponen en perspectiva la magnitud de los costos que implica la falta de mantenimiento. Se estima que la falta de mantenimiento representó una “pérdida” promedio anual del 4.3% del total de la energía hidroeléctrica generada en Brasil.

Tomando los valores de costo de mantenimiento reportados por Alarcón y Nogueira (2018) se puede calcular el valor monetario asociado a la falta de mantenimiento. Este valor alcanzó en Brasil un total de US\$ 969 millones en el 2017 (tomando costos y precios de la energía de 2017 y energía no generada promedio entre 2007 y 2017). En términos relativos, este valor equivale a la rehabilitación compleja de 1.9 GW¹⁵ anuales

14 Los autores calcularon la cantidad de energía no generada por dichas paradas, multiplicando las horas de parada forzadas anuales por la potencia media de los turbogeneradores.

15 Se ha considerado un supuesto de costo de rehabilitación de \$500/MW.

Figura 13. Tiempo de paralización forzada para la Central Simplicio



*Cifras a Agosto 2018.
Fuente: Alarcón y Nogueira (2018).

(el 2% de la capacidad hidroeléctrica instalada en Brasil) o a la construcción de una central hidroeléctrica con reservorio con una potencia instalada de 454 MW.

Además de esta pérdida, debe tenerse en cuenta que la energía que no se pudo generar por falta de mantenimiento corresponde a una fuente de energía renovable sin impactos ambientales negativos y que, acumulada año tras año puede evitar la construcción de plantas generadoras adicionales, muchas de ellas alimentadas con fuentes no renovables.

4.5 La falta de cultura de mantenimiento en las empresas de agua

Como ya se ha mencionado previamente, las prácticas de mantenimiento son reducidas y, por ende, la data es escasa. En el sector agua y saneamiento, la situación es grave debido a que resulta más difícil realizar un inventario y seguimiento de gran parte de los activos ya que son inaccesibles al estar bajo tierra. Anualmente

las pérdidas de agua son bastante elevadas y tienen una gran repercusión en la empresa y en los clientes. Si bien no se cuenta con estimaciones de la brecha de mantenimiento en el sector agua y saneamiento en la región; la presente sección muestra el promedio de las prácticas de mantenimiento de 50 empresas distribuidoras de agua en ALC, las cuales forman parte de Aquarating, una herramienta del BID que certifica la performance de los operadores de agua en la región.¹⁶

Dentro de estas prácticas e indicadores analizados por Aquarating, hay algunos que si bien no permiten contabilizar las inversiones realizadas en mantenimiento, sí permiten conocer las prácticas vinculadas a mantenimiento correctivo y preventivo. De esta manera se puede saber el comportamiento de dichos operadores frente a este tema. Así de la muestra de empresas:

- 51% señaló no contar con un plan para el mantenimiento y reemplazo de activos físicos fijos basado en análisis de riesgo de fallas, costos, etc.
- 56% mostró no tener un sistema integrado para gestionar la inspección y el “mantenimiento preventivo de la infraestructura de distribución, recolección y tratamiento de agua.
- 64% mencionó no monitorear ni controlar los costos de mantenimiento preventivo y “correctivo” de la infraestructura de distribución, recolección y tratamiento de agua.
- 62% mencionó no contar con un sistema computarizado para gestionar el “mantenimiento preventivo” del “sistema” de recolección de aguas residuales.

En general, los resultados muestran que de la muestra considerada menos de la mitad de las empresas planifican el mantenimiento. Ya sea un protocolo para realizar un mantenimiento correctivo o una estrategia para planificar mantenimiento preventivo.

4.6 El uso de los contratos de conservación vial por nivel de servicio

En la década de 1990, la gestión de los contratos de mantenimiento de los activos viales pasó de contratos por insumos o productos hacia contratos basados en desempeño. Este tipo de contratos empezó en Argentina, luego se extendió su uso a Uruguay Chile Colombia y Brasil. Luego a otras regiones como Australia, Estados Unidos, Nueva Zelanda, Chad, España e India.

Estos contratos especifican los niveles de servicio que debe de tener el activo como el servicio del usuario en la carretera y medidas de confort, así como la durabilidad a largo plazo del activo con pagos de suma global. Al tratarse de un contrato de gestión, los pagos no se realizan por el volumen de obras si no por el cumplimiento del estado predeterminado de los caminos. Las normas son sobre la condición física de los caminos y puentes dejando flexibilidad para que la empresa contratada determine la mejor manera de alcanzar los niveles predeterminados. Esta asume plena responsabilidad, tanto por la eficiencia, como por la eficacia de las intervenciones. De darse una aplicación correcta, estos contratos motivan la mejora continua y la innovación por parte del contratista para reducir los costos de alcanzar los indicadores de servicio establecidos. Además se da una mayor transparencia y rendición de cuentas así como todos los beneficios de mejorar las condiciones de la red para los usuarios.

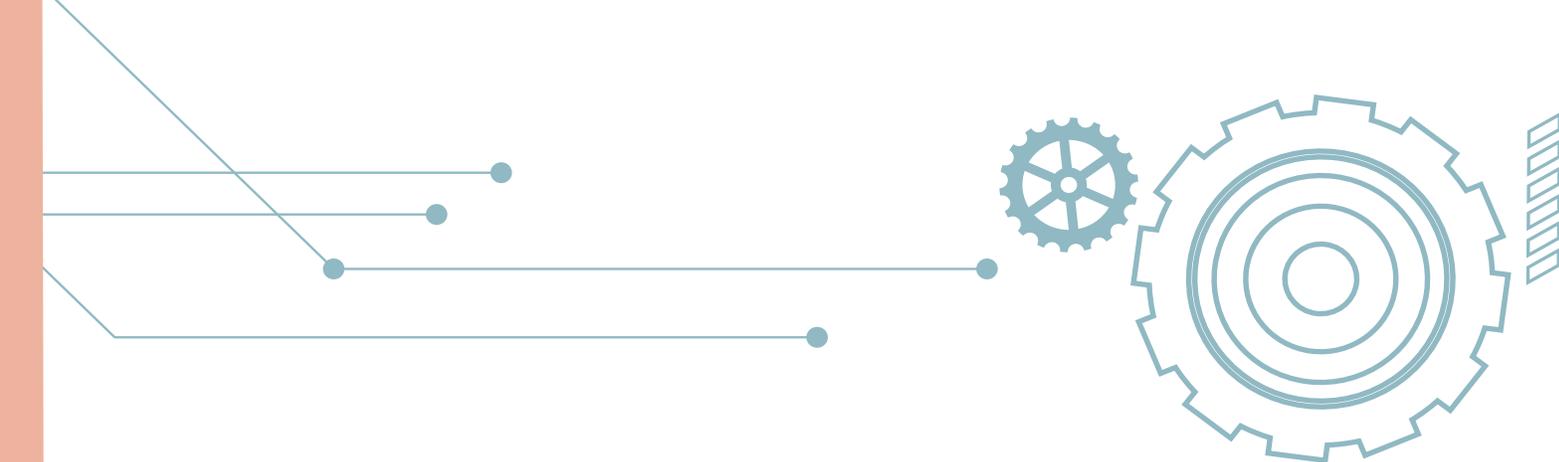
No obstante, las evaluaciones de estos contratos son escasas. Pérez et. al (2019) encontraron que en Uruguay la calidad del pavimento es de mayor calidad en segmentos administrados por este tipo de contratos versus caminos mantenidos bajo contratos de compras públicas tradicional (usualmente contratos basados en inputs).

¹⁶ Dado que las empresas eligen aplicar a la certificación, la muestra no es aleatoria y por lo tanto, no es representativa. No obstante, permite brindar cierta información sobre el comportamiento de un grupo de empresas frente al mantenimiento.

The background is a dark teal color with various white and light blue geometric and technical motifs. On the left, there are several interlocking gears of different sizes. A network of thin white lines with small circular nodes at the intersections extends across the upper and middle sections. On the right, there are clusters of hexagons, some solid and some outlined. In the top right corner, there are some abstract patterns resembling a barcode or a data visualization. Dashed lines with arrows indicate connections and flow between different elements.

5

**Experiencia
internacional**



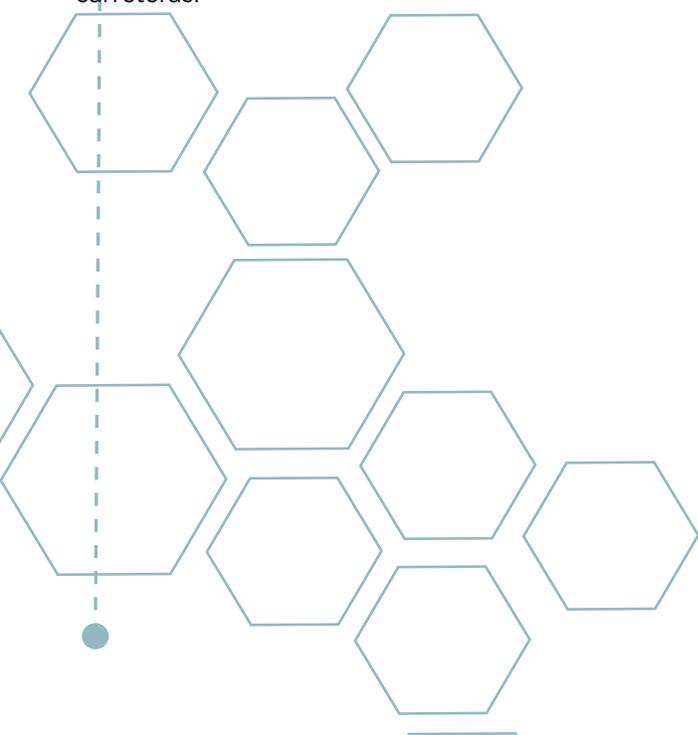
Por un largo tiempo el mantenimiento se ha encontrado rezagado. La infraestructura se construye y no se mantiene, sino que se esperaba hasta identificar un problema. Esto está cambiando en los últimos años. Por un lado, se han dado incidentes y accidentes que han expuesto la falta de mantenimiento. Además, las exigencias de clientes más informados y proactivos generan presión para que las empresas del sector mejoren los activos y servicios de infraestructura. Por otro lado, los avances tecnológicos están permitiendo que la infraestructura, y otras industrias, realicen una implementación costo efectiva para cumplir con las necesidades del futuro. Así, a medida que la tecnología avanza, el concepto de mantenimiento cobra protagonismo ya que se vuelve flexible y adopta diferentes enfoques y herramientas. El uso de sensores, drones e imágenes satelitales está ayudando a reducir los costos de mantenimiento en los servicios públicos. Por ejemplo, en agua al permitir la identificación precisa de fugas de las tuberías de agua; en energía permitiendo la identificación de sobrecalentamiento en las líneas de distribución, en transporte, los drones y las imágenes de satélite se están utilizando para evaluar el estado de las carreteras.

Hay empresas que se encuentran a la vanguardia de este tema. Algunas empresas de la región están empezando a aplicar estas tecnologías pero todavía a menor escala o en proyectos piloto. A continuación se presentan tres casos a nivel internacional de cómo la relación entre mantenimiento y tecnología ha ido cobrando importancia.

El primer caso muestra cómo el mantenimiento, de la mano con la tecnología, forma parte de la planificación y política pública. Se trata de una iniciativa europea que contempla el mantenimiento preventivo como política para mantener la red de carreteras y ferrocarriles en óptimo estado.

El segundo caso muestra el caso de mantenimiento predictivo en una empresa eléctrica en Estados Unidos.

El tercer y cuarto caso presentan dos casos pioneros en mantenimiento predictivo en Reino Unido que muestran que la actitud frente al mantenimiento en el sector agua y saneamiento ha venido cambiando en los últimos años en algunos casos, principalmente gracias a la tecnología.



5.1 Mantenimiento predictivo en Transporte

La demanda de transporte urbano viene aumentando significativamente en todo el mundo. Europa no es ajena a esta situación y se encuentra en la búsqueda de opciones ya que no se espera que la red de carreteras y ferrocarriles se expanda de manera significativa en las próximas décadas debido a la poca disponibilidad de terrenos. Así, se vuelve necesario aumentar la capacidad de la infraestructura mediante la optimización del rendimiento de la infraestructura existente. Esto a través del mantenimiento de la infraestructura actual, el cual irá cobrando más visibilidad y relevancia pero también implicará una interrupción del funcionamiento normal del tráfico. Por ende, la única forma para sobrellevar esta situación es planificar las actividades e intervenciones de mantenimiento; en otras palabras aplicar un mantenimiento predictivo.

Por este motivo, el programa de investigación e innovación de la Unión Europea, llamado Plan Horizonte 2020, ha financiado un piloto de 77.000 millones de euros para la aplicación del mantenimiento predictivo en las áreas de transporte y energía entre el 2014 y 2020. El piloto se llama INFRAALERT y empezó en una red ferroviaria en Suecia y en una red carretera en Portugal debido al potencial de estas ciudades para ser replicadas.¹⁷

A través de *machine learning* y métodos de optimización, INFRAALERT está recopilando, almacenando y analizando datos de inspección, está determinando las tareas de mantenimiento necesarias para mantener el rendimiento del sistema de infraestructura en condiciones óptimas y está planificando cuales son las intervenciones óptimas. En otras palabras, está desarrollando un sistema de información¹⁸ para respaldar y automatizar la gestión de la infraestructura de transporte desde la medición hasta el mantenimiento. No solo se identifican las intervenciones óptimas pero se priorizan las alertas de mantenimiento de los activos de infraestructura que han sido predichas, de acuerdo con las intervenciones de mantenimiento requeridas basadas en la severidad pronosticada de la degradación, falla de los propios activos, y el conocimiento aportado por la información registrada.

17 <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-transport/infrastructure/infralart>

18 Esto incluye la recopilación, el almacenamiento y el análisis de los datos de inspección, la determinación de las tareas de mantenimiento necesarias para mantener el rendimiento del sistema de infraestructura en condiciones óptimas y la planificación óptima de las intervenciones.

19 <https://www.arcweb.com/blog/duke-energy-avoids-unplanned-downtime-and-improves-reliability-iiot-and-predictive-maintenance>

5.2 Mantenimiento predictivo en Energía

Duke Energy, la empresa de electricidad más grande de Estados Unidos, que cuenta con 7.4 millones de clientes en Estados Unidos y más de 60 plantas en 6 estados, también aplicó el “Internet de las cosas” para el mantenimiento predictivo. Todo empezó con una falla importante de energía en el 2010 que le costó a la empresa alrededor de USD 10 millones más 4 meses de generación perdida. Por dicho motivo Duke decidió evaluar la mejor manera de prevenir fallas futuras.

Así empezó con una iniciativa llamada Programa *SmartGen*¹⁹ que incluye sensores en línea, microprocesadores, adquisición y almacenamiento de datos, una infraestructura de gestión de datos y monitoreo de salud y rendimiento del equipo, análisis predictivo y diagnóstico.

El software de monitoreo de los activos y notificación de alertas utiliza el aprendizaje automático y le permite a Duke desarrollar modelos de datos. El objetivo de este sistema es una vez que se le enseñan los patrones normales, detecta patrones anormales en los datos de la planta de sensores y energía para ayudar a identificar las áreas más críticas de mantenimiento y rendimiento.

Por ejemplo, la iniciativa le permitió a Duke Energy ahorrar más de \$ 4.1 millones al activar una advertencia temprana cuando una de las turbinas de vapor comenzó a funcionar mal. Durante tres años, se han dado 384 hallazgos que le han ahorrado a Duke \$ 31.5 millones en costos de reparación.

5.3 Mantenimiento predictivo en Agua

Inglaterra: el caso de United Utilities

Los prestadores de servicios básicos domiciliarios están experimentando una presión por mejorar el desempeño de sus activos y la calidad del servicio que brindan, junto con una mejora en la eficiencia financiera y operacional. Una de las tantas mejoras gracias a la tecnología es la aplicación del mantenimiento predictivo.

Así, en los últimos años, *United Utilities*²⁰ se ha orientado en atender a la creciente demanda con un servicio de agua y saneamiento con altos estándares de calidad, pero de manera costo efectiva. Una de las áreas identificadas como fuente de mejoras y eficiencias fue el mantenimiento de sus activos. Por ello, dentro de la estrategia de mantenimiento se fijó como objetivo reducir el tiempo de inactividad de los equipos, así como el gasto anual en mantenimiento, todo esto considerando que la localización de los activos era dispersa y éstos se encontraban o en áreas remotas e inaccesibles, o en el corazón de zonas muy pobladas y congestionadas.

Para cumplir con este objetivo, se decidió que la mejor solución era reemplazar el mantenimiento correctivo que venía aplicándose hasta ese momento por una estrategia para condicionar el monitoreo de sus activos; es decir, por un mantenimiento predictivo. La tecnología ha hecho que el mantenimiento predictivo se expanda en muchas industrias. Esto incluye a las compañías de agua, donde las fallas pueden ser muy costosas. Estudios señalan que un mantenimiento planeado es la opción más costo efectiva en esta industria.

En este caso se utilizó el sistema de mantenimiento predictivo Artesis MCM²¹ (monitor de condición del motor), el cual fue originalmente desarrollado bajo un contrato de la NASA. Este sistema utiliza un enfoque inteligente basado en modelos para monitorear y diagnosticar los equipos (para la mayoría de los equipos impulsados por motores eléctricos), advertir tempranamente de posibles fallas y acercar las locaciones remotas con un monitoreo centralizado.

De manera un poco más detallada, un sensor que cubre el equipo y su motor se coloca donde se ubique el control del motor. Los costos de instalación son bajos porque se necesita conectar el sensor al motor de control y no al equipo. Esto es muy atractivo para las compañías de agua (también se ha implementado con éxito en una amplia gama de otras industrias) porque es una solución práctica para equipos inaccesibles como bombas sumergibles y de pozo. Así, todo el análisis se lleva a cabo en el motor, lo que reduce la necesidad de comunicaciones extensas entre instalaciones remotas y salas de control centralizadas. Una vez instalado, el sistema se entrena

por si solo para reconocer el funcionamiento normal, y luego monitorea continuamente el equipo para detectar posibles fallas. Cuando se detecta una falla, el sistema proporciona un diagnóstico de los problemas mecánicos y/o eléctricos, e indica la severidad de tal manera que la compañía pueda tomar decisiones sobre la intervención más adecuada.

Los resultados del mantenimiento predictivo para *United Utilities* han sido significativos. A un mes de su instalación, el sistema diagnosticó por primera vez de manera acertada una falla en una válvula lo que permitió la corrección oportuna y se evitó que suceda una avería. Así, en el primer año de operación el 10% de los costos de mantenimiento se redujo gracias a la evasión de fallas y averías. A partir de 3 años de instalado el sistema, no se volvieron a detectar fallas no predichas. De ahí en adelante, el sistema de mantenimiento predictivo se incluyó dentro de los estándares para nuevas construcciones de la empresa que tuvieran el sistema. Pruebas e implementaciones de este sistema están teniendo lugar en compañías de agua en el Reino Unido y en el mundo.

Inglaterra: el caso de Yorkshire Water

*Yorkshire Water*²² es otra compañía que decidió usar la tecnología para mejorar muchos de sus procesos y servicios. Hay dos casos en particular donde las actividades avanzaron significativamente. En primer lugar, la compañía afrontaba muchos incidentes que provocaban inundaciones internas, por ello se quería predecir la probabilidad de que ocurriera un incidente de inundación en un área de manera fácil y rápida.

Así, la compañía adquirió un programa llamado Clementine que les permitió identificar factores determinantes de las inundaciones. (número de almacenajes, longitud de las alcantarillas, lluvia, trabajos de excavación, contacto de los clientes, etc.). La compañía pudo monitorear 24,000 cuadrantes en Yorkshire y elaborar un *ranking* semanalmente de acuerdo a la probabilidad de inundación. Antes de eso se manejaban hojas de datos manualmente y se analizaba la data mes a mes o trimestralmente. Así no había mucha predicción

20 Empresa del Reino Unido que brinda el servicio de agua y saneamiento a una población de aproximadamente 7 millones de personas al noroeste de Inglaterra. Es la más grande compañía de agua que esta listada en el Reino Unido. Posee activos de más de 120,000 piezas en 3,450 locaciones y cuenta con un presupuesto anual de operaciones de 371 millones de libras. <https://www.unitedutilities.com/>

21 Artesis Case Study-Water. http://www.artesis.com/case-studies/Artesis_case_study4-Water.pdf

22 Empresa del Reino Unido que brinda el servicio de agua y saneamiento 2.3 millones de hogares y 130,000 empresas. Así, gestiona la recolección, el tratamiento y la distribución de agua, suministrando alrededor de 1,24 billones de litros de agua potable por día en una red de 83,000 km de tuberías. También recolecta, trata y desecha cerca de mil millones de litros de agua de desecho para regresar al medio ambiente todos los días. <https://www.yorkshirewater.com/>

y la data que se ingresaba seguía siendo resultado de inundaciones. Ahora el proceso es más preventivo que correctivo.

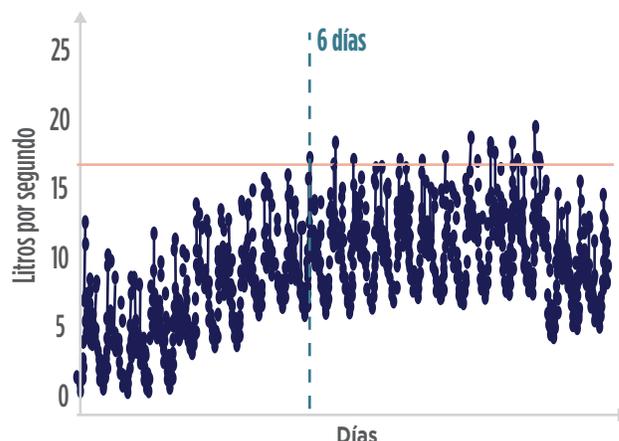
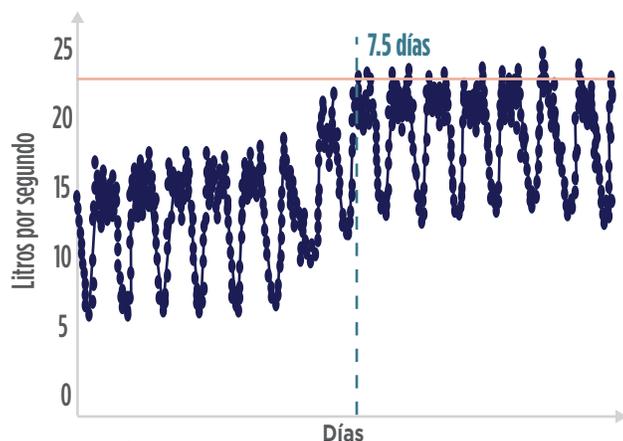
En segundo tema para el cual se aplicó la tecnología fue con las fugas de agua ocasionadas principalmente porque mitad de la red de distribución de la empresa (83,000km) corresponde a tuberías de metal pertenecientes a la década de 1950. Dado el elevado costo y tiempo requerido para realizar excavaciones, era necesario una solución que prediga las fugas de manera más eficiente antes de que sucedan y evite afectar al consumidor con cortes.

Así, para las pérdidas se instalaron 6,800 sensores para un monitoreo automatizado de flujo y presión en el sistema de distribución para revisar anomalías (una inusual y repentina caída en la presión o un incremento del flujo en un medidor o cadena de medidores podría indicar una fuga) e identificarlas a tiempo.²³

La figura 14 muestra dos situaciones sin un sistema de mantenimiento predictivo. Em ambos casos, se empezó con un pequeño pero gradual incremento de una fuga de agua alrededor de 6 litros por segundo pero la alarma solo se activó en el momento pico. Así, le tomo al umbral de la alarma detectar la fuga 7.5 días y 6 días, respectivamente. En cambio, un sistema predictivo hubiera detectado la fuga en el primer día.

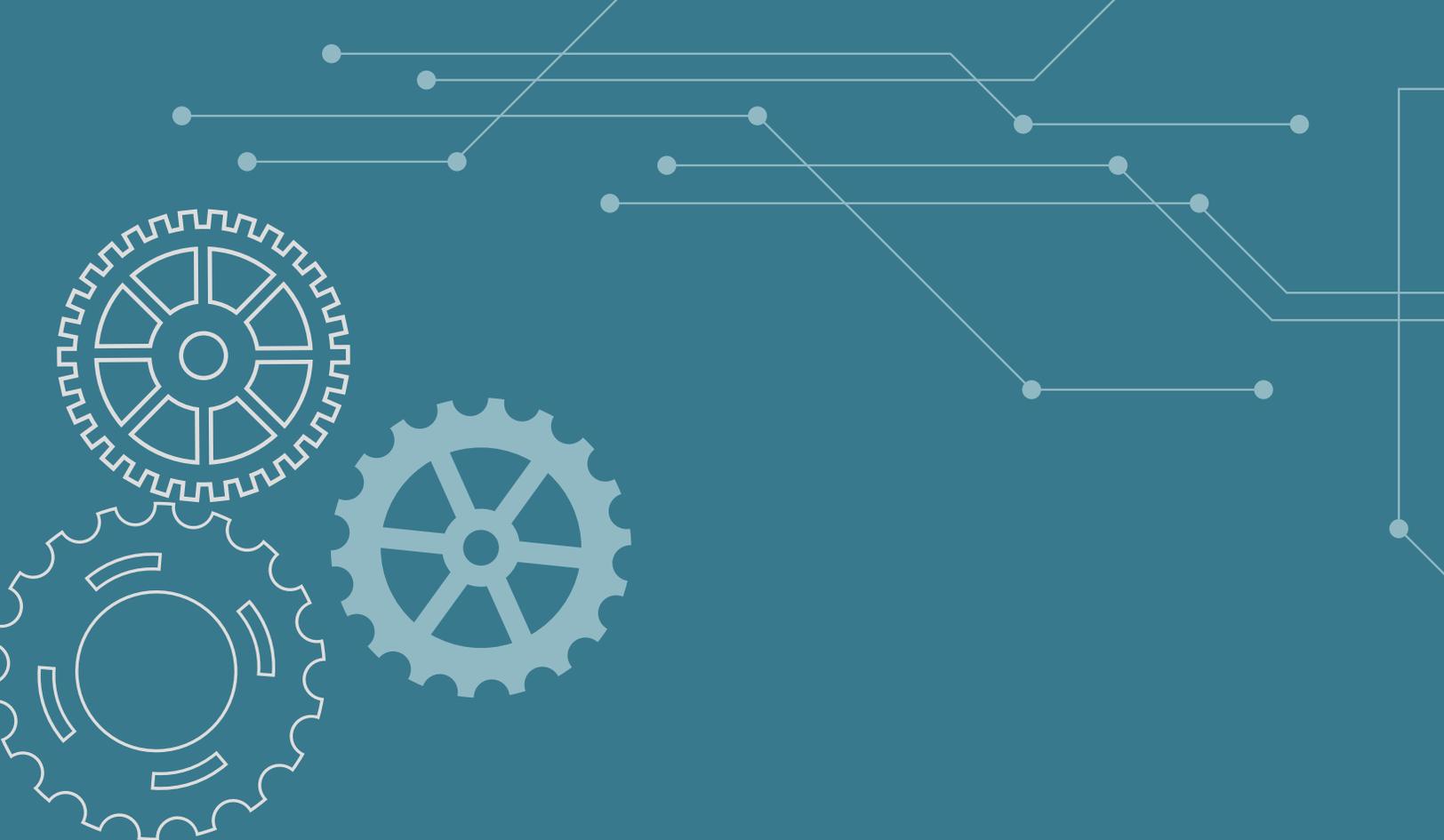
Actualmente la empresa recibe data operacional en tiempo real que está programada para darse cada 15 minutos pero se puede ajustar para ser recibida de manera más frecuente. Se han podido prevenir las fallas en un 96% y el tiempo que toma detectar una fuga y repararla se ha reducido de 30 a 10 días.

Figura 14. Detección de fuga con mantenimiento correctivo



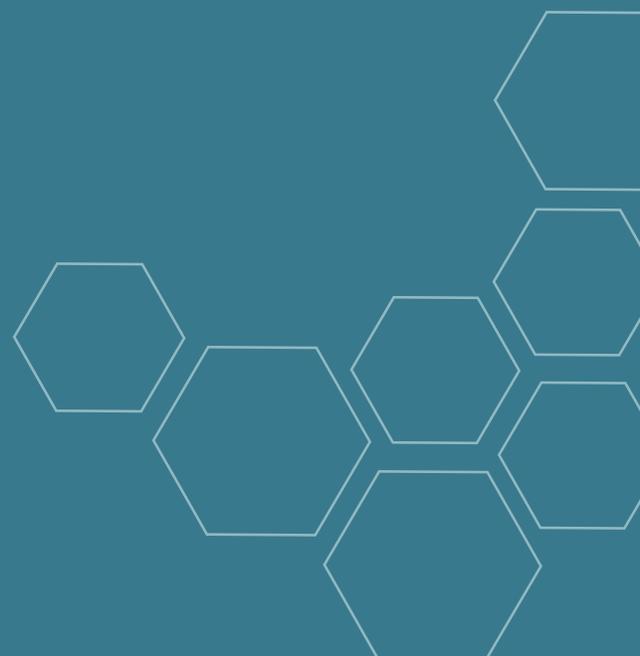
Fuente: Capula

23 Se usó el RTNet Project provisto por Capula. Véase: https://cdn.osisoft.com/osi/presentations/2017-uc-emea-london/UC17EU-D2PI01-YorkshireWater-Sewell-PredictingLeakageEvents.pdf?_ga=2.143979574.269455829.1534875487-2090511735.1534875486



6

Conclusiones





fuga con mantenimiento predictivo

Fuente: Capula

El mantenimiento es muy importante para que los activos puedan cumplir con sus funciones sin fallos o interrupciones. En especial en el caso de infraestructura ya que la depreciación de estos activos no es lineal y en muchos casos no visible o fácilmente identificable, el mantenimiento ya no puede revertir los daños y se requiere una rehabilitación o una reconstrucción que resulta mucho más costosa.

Lamentablemente, no existe data suficiente que permita fundamentar esta afirmación a pesar de su importancia. Un primer cambio debería darse mejorando la existencia de datos de mantenimiento e información sobre el estado de los activos de infraestructura.

Además, existe un sesgo en contra del mantenimiento en el sector infraestructura. No invertir en mantenimiento no tiene lógica económica. Los activos de infraestructura se planifican para que presten servicios durante décadas. Pero la prestación de servicios depende de invertir en mantenimiento. No hacerlo hace que la tasa de retorno social de la inversión en infraestructura sea mucho menor que la calculada al momento de construirla. En otras palabras, no invertir en mantenimiento es equivalente a un mal uso de los recursos de la sociedad.

A pesar de que el mantenimiento es una práctica fiscalmente prudente, existe un incentivo político para postergarlo durante épocas de restricciones fiscales, lo que finalmente eleva los costos futuros. Clasificar al mantenimiento como inversión, en lugar de hacerlo como gasto corriente, puede darle un espacio más preponderante en el presupuesto, ya que no se vería limitado a las reglas fiscales que restringen el gasto corriente. Más aún, puede ofrecer fuentes adicionales

de financiamiento y continuidad del mantenimiento, independientemente de cambios de gobierno o recortes presupuestarios.

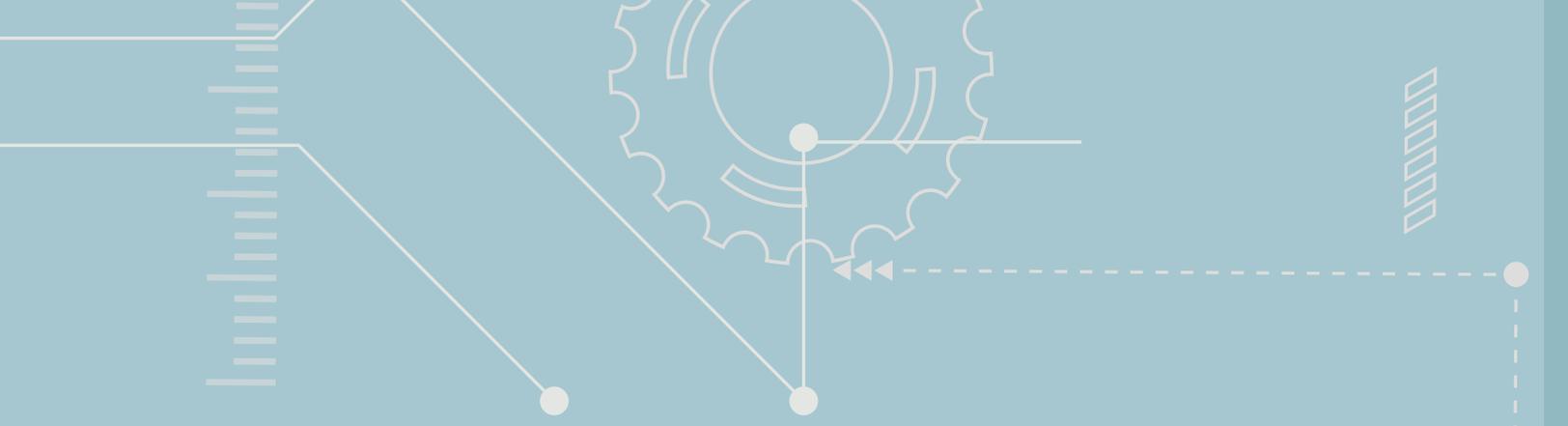
Los costos asociados a la falta de mantenimiento son significativos. Se requiere que ALC invierta en mantenimiento ya que es una oportunidad grande para que los países puedan aprovechar al máximo sus activos de infraestructura. En un contexto de cada vez mayores restricciones fiscales, pero al mismo tiempo mayor demanda por servicios públicos de calidad, el mantenimiento resulta un modo eficaz y eficiente de conseguir una buena infraestructura y provisión de los servicios relacionados. En especial actualmente cuando los avances tecnológicos están permitiendo que la infraestructura, y otras industrias, realicen una implementación costo efectiva para cumplir con las necesidades del futuro. Así, a medida que la tecnología avanza, el concepto de mantenimiento se vuelve flexible, menos costoso y adopta diferentes enfoques y herramientas.



7

Referencias





Abelson, P. y Flowerdew, A. (1975). "Models for the Economic Evaluation of Road Maintenance. *Journal of Transport Economics and Policy*, 9(2), pp. 93-114.

ADERASA (2018). "Grupo Regional de Trabajo de Benchmarking de Aderasa 2017."

Alarcón, A. y Nogueira, M. (2018). "Impacto de las paradas forzadas (no programadas) en la generación hidroeléctrica". Mimeo. Banco Interamericano de Desarrollo.

Alberti, J. y Pereyra, A. (2016). "Institucionalidad y eficiencia del transporte vial en América Latina y el Caribe: Un análisis de casos múltiples para la determinación de variables organizacionales relevantes". Banco Interamericano de Desarrollo.

_____. (2017). "Contratos por niveles de servicio, ¿mayor asignación presupuestal o mayor eficiencia?". Banco Interamericano de Desarrollo. Mimeo.

_____. (2017). 'Institucionalidad y Eficiencia Sectorial'. Banco Interamericano de Desarrollo.

_____. (2018). "Institucionalidad y eficiencia del transporte vial en América Latina y el Caribe: ¿Existe una relación entre institucionalidad y eficiencia sectorial?". Banco Interamericano de Desarrollo.

Alleman, R. (2018). "What Is Digital Twin Technology? 3 Ways It's Changing the World". Visto el 29 de Noviembre, 2018. Disponible en <https://blog.jive.com/what-is-digital-twin-technology/>

America, S. G. (2014). "Repair priorities 2014: Transportation spending strategies to save taxpayer dollars and improve roads". Smart Growth America and Taxpayers for Common Sense.

Austin, J., Jackson, T., Fletcher, M., Jessop, M., Cowley, P., y Lobner, P. (2003). "Predictive maintenance: Distributed aircraft engine diagnostics". *The Grid*, 2nd ed, I. Foster and C. Kesselman, Eds. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.

Briones, H. (2014). "Institucionalidad para la Gestión del Mantenimiento Vial: Caso Chileno". Universidad de Chile.

Brox, J. A. (2008). "Infrastructure Investment: The Foundation of Canadian Competitiveness", 9(2), p. 48. Institute for Research on Public Policy.

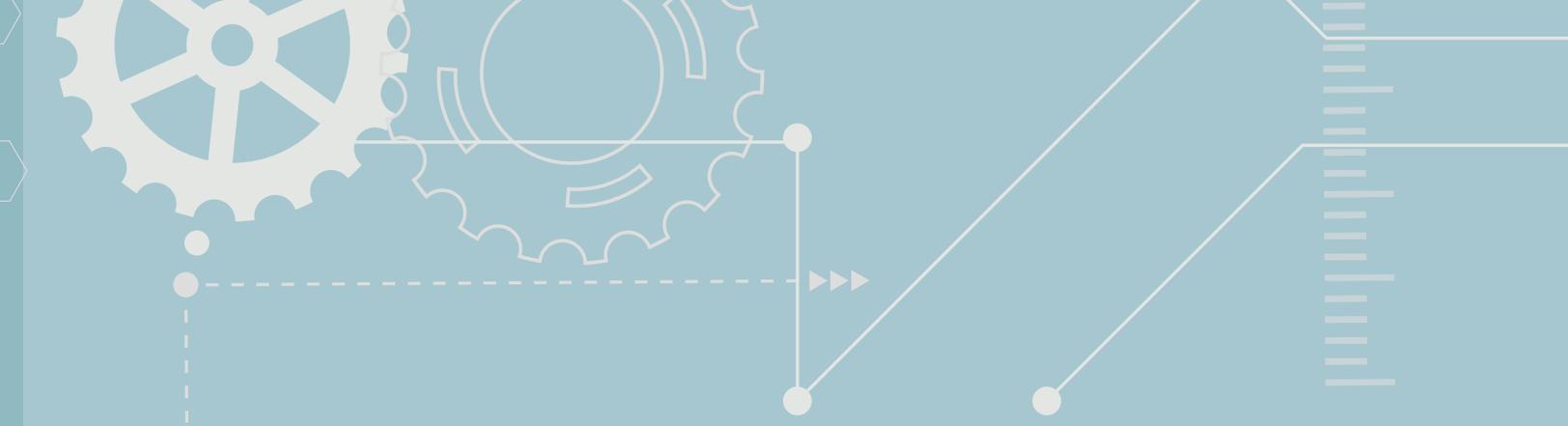
Burningham, S. y Stankevich, N. (2005). "Why road maintenance is important and how to get it done". The World Bank, Washington DC Transport Note No. TRN-4 June, 2005.

Congressional Budget Office. (2007). "Trends in public spending on transportation and water infrastructure, 1956 to 2004". Washington, DC: U.S. Government Printing Office.

Contreras, S. (2018). "Mantenimiento Preventivo: Tipos, Ventajas, Desventajas y Características". Visto el 23 de Enero, 2019. Disponible en <https://www.lifeder.com/mantenimiento-preventivo/>

Corporación Latinobarómetro. (2018). "Informe Latinobarómetro 2018". Banco de Datos en Línea. Disponible en www.latinobarometro.org

Cusato, A. y C. Pastor. (2007). "Lecciones del Mantenimiento de Carreteras en el Perú, 1992 - 2007". Instituto Peruano de Economía.



Daigger, G.; Voutchkov, N., Sarni, W. and U. Lall. 2018b. “The Future of Water: A collection of essays on “disruptive” technologies that may transform the water sector in the next 10 years. IDB Discussion Paper IDB-DP-00657. Washington, DC: Inter-American Development Bank.

De Michele, R. (2017). “Escándalos de corrupción en América Latina ¿Por qué soy optimista?” Banco Interamericano de Desarrollo. Visto el 19 de Octubre, 2018. Disponible en: <https://blogs.iadb.org/gobernarte/2017/05/31/escandalos-corrupcion-optimista/>

Djankov, S., Ghossein, T., Islam, A. y Saliola, F. (2017). “Public Procurement Regulation and Road Quality” World Bank Policy Research Working Paper No. 8234.

Easterly, W., T. Irwin, y L. Servén. (2008). “Walking up the down escalator: Public investment and fiscal stability”. World Bank Research Observer 23(1):37-56.

Escobal, J., y C. Ponce. (2003). “El beneficio de los caminos rurales: ampliando oportunidades de ingreso para los pobres”. Documento de Trabajo No. 40. Grupo de Análisis para el Desarrollo (GRADE).

Estache, A., y M. Fay. (2007). “Current debates on infrastructure policy”. Policy Research Working Paper Series 4410. Washington, DC: World Bank.

Fay, M., y T. Yepes. (2003). “Investing in Infrastructure: What is Needed from 2000-2010.” Policy Research Working Paper 3102. World Bank, Washington, DC.

Financial Times. (2017). ‘Road congestion in emerging markets pours cold water on forecasts’. Visto el 19 de Octubre, 2018. Disponible en: <https://amp.ft.com/content/6dbbba6-9c64-11e7-9a86-4d5a475ba4c5>

Gagnon, M., V. Gaudreault, y D. Overton. (2008). “Age of Public Infrastructure: A Provincial Perspective.” Ottawa: Statistics Canada. 11-621-MIE2008067: 1-27.

Gaudry, M., Lapeyre, B. y Quinet, E. (2015). “Infrastructure maintenance, regeneration and service quality economics: A rail example”. Working Paper 2011-03. Paris School of Economics.

Gibson, J. y Rioja, F. (2017). “Public infrastructure maintenance and the distribution of wealth: maintenance and the distribution of wealth”, Economic Inquiry, 55(1), pp. 175-186.

_____. (2015). “A Bridge to Equality? Aggregate and Distributional Effects of Investing in Infrastructure”. Mimeo.

Glaeser, E. y Ponzetto, G. (2017). ‘The Political Economy of Transportation Investment’. No. 1556. 2017.

Guasch, J. L., Rojas-Suarez, L. y Gonzales, V. (2011). “Competitiveness in Central America The Road to Sustained Growth and Poverty Reduction”. Center for Global Development.

Gwilliam, K., y A. Kumar. (2002). “Road funds revisited: A preliminary appraisal of the effectiveness of “second generation” road funds”. TWU Series, TWU-47. Washington, DC: World Bank.

Gwilliam, K., y Z. Shalizi. (1999). “Road funds and user charges”. World Bank Research Observer 14(2):159-185.

Gyamfi, P. (1992). “Infrastructure Maintenance in LAC: The Costs of Neglect and Options for Improvement.”



Regional Studies Program, vol 4, report 17. World Bank, Latin America and the Caribbean Technical Department, Washington, D.C. Processed.

Haavelmo, T. (1960). "A Study in the Theory of Investment" (No. 332.6 HAAs).

Harral, C. y Asif, F. (1988). "Road Deterioration in Developing Countries: Causes and Remedies". World Bank Policy Study. Washington, D.C.

Hartgen, D. T., Fields, M. G. y Feigenbaum, B. (2016). "22nd Annual Highway Report: The Performance of State Highway Systems". Reason Foundation Policy Study, (448).

Heggie, I. G. (1995a). "Commercializing Africa's Roads: Transforming the Role of the Public Sector." *Transport Reviews* 15 (2): 167-84.

_____. (1995b). "Management and Financing of Roads: An Agenda for Reform." Documento Técnico 275, Serie Técnica del África, Banco Mundial, Washington, DC.

IBM. (2017a). "Explore Watson at Work: Airline Maintenance". (360 Video) [Video File]. Visto el 29 de Noviembre, 2018. Disponible en https://www.youtube.com/watch?time_continue=3&v=u2n_2JxO-al

_____. (2017b). "Korean Air is using Watson to search vast amounts of data to improve operational efficiency and on-time performance". Visto el 29 de Noviembre, 2018. Disponible en <https://www.ibm.com/watson/stories/airlines-with-watson/>

Inter-American Development Bank (IDB) (2018a). "Acción para el crecimiento: Recomendaciones de Políticas y Plan de Acción 2018-2021 para el Crecimiento en las Américas". *Diálogo Empresarial de las Américas*, 2018. Washington, DC: IDB.

Jaffe, E. (2015). "America's Infrastructure Crisis Is Really a Maintenance Crisis." Citylab. Visto el 12 de Noviembre, 2018. Disponible en <http://www.citylab.com/cityfixer/2015/02/americas-infrastructure-crisis-is-really-a-maintenance-crisis/385452/>.

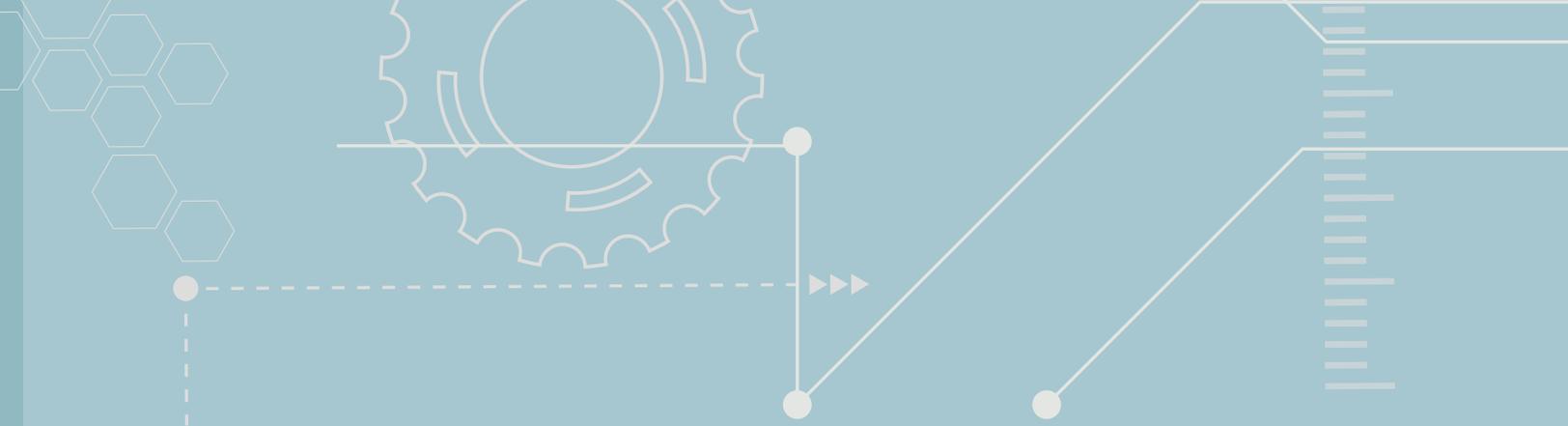
Jimenez-Redondo, N., Calle, A., Kandler, U., Simroth, A., Morales, F., Reyes, A., Odelius, J., Thaduri, A., Morgado, J. y Duarte, E. (2017). "Improving linear transport infrastructure efficiency by automated learning and optimised predictive maintenance techniques (INFRALERT)", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 236, p. 012105.

Kahn, M. E. y D. M. Levinson. (2011). "Fix It First, Expand It Second, Reward It Third: A New Strategy for America's Highways". Informe 2011-03. Proyecto Hamilton.

Kahn, T; Baron, A. y Vieyra J. C. (2018). "Digital Technologies for Transparency in Public Investment: New Tools to Empower Citizens and Governments". Discussion Paper No IDB-DP-634. InterAmerican Development Bank. Washington DC.

Kalaitzidakis, P., y S. Kalyvitis. (2004). "On the macroeconomic implications of maintenance in public capital". *Journal of Public Economics* 88:695-712.

Kalaitzikakis, P., y S. Kalyvitis. (2005). "New Public Investment and/or Public Capital Maintenance for Growth?"



The Canadian Experience.” *Economic Inquiry* 43 (3): 586-600

Kang, D. (2010). ‘The Effect of Public Capital on the Productivity – An Analysis on the U.S. Highway Stock’. *The Korean Economic Review*, 26(1).

Kotschwar, B. R. (2012). “Transportation and Communication Infrastructure in Latin America: Lessons from Asia”. Working Paper 12-6. Peterson Institute for International Economics.

Lagunes, P. (2017). “Guardians of Accountability: A Field Experiment on Corruption and Inefficiency in Local Public Works”. International Growth Centre Working Paper C-89335-PER-1.

Lamb, W.S. y Didriksen, M. (2017). “Electric and Gas Utility Mergers and Acquisitions: Trends in Deal Terms, Contract Provisions, and Regulatory Matters”. *Energy LJ*, 38, p.133.

Latin Consult. 2017. “Estudio Conceptual De Proyecto De Reducción De Pérdidas en el Sistema Del Gran Asunción - Paraguay”.

Levy, H. y Freeman, P. N. W. (2007). “Evaluation of Bank support for road funds: background paper for evaluation of World Bank assistance to the transport sector, 1995-2005”. Washington, D.C.: World Bank, Independent Evaluation Group.

Mahalingam, S. (1991). “Maintenance of Highways: An Evaluation”, *Economic and Political Weekly*, 26(49), pp. 2821-2826.

Marzec, M., Morkisz, P., Wojdyła, J., y Uhl, T. (2016). “Intelligent Predictive Maintenance System”. *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys) 2016*. Springer, Cham (Lecture Notes in Networks and Systems), pp. 794-804.

McGrattan, E., y Schmitz, J. (1999). “Maintenance and repair: Too big to ignore”. *Federal Reserve Bank of Minneapolis Quarterly Review* 23:2-13.

Mobley, R.K., (2002). “An introduction to predictive maintenance”. Elsevier.

Moreno, L. A. (2017). “How Tech can Fight Corruption in Latin America and the Caribbean”. *World Economic Forum*. Visto el 14 de Diciembre, 2018. Disponible en <https://www.weforum.org/agenda/2017/12/how-technology-is-becoming-a-powerful-ally-in-the-fight-against-corruption-in-latin-america-and-the-caribbean>

OECD. (2017). “Transport - Infrastructure Maintenance OECD Data”. Visto el 19 de Octubre, 2018. Disponible en <http://data.oecd.org/transport/infrastructure-maintenance.htm>

Rioja, F. (2003a). “Filling Potholes: Macroeconomic Effects of Maintenance versus New Investments in Public Infrastructure.” *Journal of Public Economics* 87(9-10):2281- 304.

_____. (2003b). “The Penalties of Inefficient Infrastructure.” *Review of Development Economics* 7(1): 127-37

_____. (2013). “What is the value of Infrastructure Maintenance? A Survey”. *Infrastructure and Land Policies*, 13, pp.347-365.

Road Research Laboratory. (1970). "The Marshall Committee's Recommendations for Standards of Highway Maintenance and for a Maintenance Rating System". LR 367. Ministry of Transport, US.

Sacmex. 2018. "Diagnóstico, Logros y desafíos". Sistema de Aguas de la Ciudad de Mexico.

Schiessler, A. y Bull, A. (1992). "Caminos: Un nuevo enfoque para la gestión y conservación de redes viales". CEPAL.

Servén, L. (2007). "Fiscal Discipline, Public Investment, and Growth." In G. Perry, L. Servén, and R. Suescun, eds., *Fiscal Policy, Stabilization, and Growth: Prudence or Abstinence?* Washington, D.C.: World Bank

Stantec. 2016. "Water Supply Upgrade and Development Project (WSUDP) Feasibility Study Final Report." Stantec Consulting International LLC, February 29th, 2016. Barbados.

Timashev, S. A. y Bushinskaya, A. V. (2010). "Practical Methodology of Predictive Maintenance for Pipelines". ASME, pp. 329-338.

United Nations. (2017). "United Nations Conference on Trade and Development".

Vela, A., Martínez, F., García-Serra, J. y Pérez, R., (1994). "Estrategias óptimas para la reducción de pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento". *Ingeniería del agua*, 1994, vol. 1, núm. 1.

Vieyra, J. C. (2016). "Cuatro claves para entender la corrupción en América Latina". *Foreign Affairs Latinoamérica*. Visto el 29 de Octubre, 2018). Disponible en: <http://revistafal.com/cuatro-claves-para-entender-la-corrupcion-en-latinoamerica/>

Water & Wastewater International. (2017). "Pipe Dreams - Developments in Water Pipeline Monitoring". Magazine 32-3. Water & Wastewater International.

WEF. (2014). "Strategic Infrastructure Steps to Operate and Maintain Infrastructure Efficiently and Effectively".

Weltbank. (1994). "Infrastructure for development". 1. pr. Oxford: Oxford Univ. Press (World development indicators, 17).

Wessel, P. O. y D. (2017). "The case for spending more on infrastructure maintenance". Brookings.

Willis, H. L. y Philipson, L. (2005). « Electric and Gas Utility Mergers and Acquisitions: Trends in Deal Terms, Contract Provisions, and Regulatory Matters". CRC Press.

