



Tablero de control para el seguimiento del desempeño de una grúa torre

Dashboard for monitoring the performance of a tower crane

Diego Gamboa Araya

Estudiante de Ingeniería Civil.
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
diego.gamboaaraya@ucr.ac.cr

Erick Mata Abdelnour

Profesor de la Escuela de Ingeniería Civil.
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
eric.mata@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 14 de setiembre del 2020 / **Fecha de aprobación:** 16 de octubre del 2021

Índices y Bases de Datos:



Políticas de Uso:



Revista Métodos y Materiales por LanammeUCR se distribuye bajo: Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. ISSN electrónico: 2215-4558

Tablero de control para el seguimiento del desempeño de una grúa torre

Dashboard for monitoring the performance of a tower crane

Diego Gamboa Araya

Estudiante de Ingeniería Civil.
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
diego.gamboaaraya@ucr.ac.cr

Erick Mata Abdelnour

Profesor de la Escuela de Ingeniería Civil.
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
eric.mata@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 14 de setiembre del 2020 / **Fecha de aprobación:** 16 de octubre del 2021

RESUMEN

La grúa torre es un equipo con un alto costo de operación y crítico para el avance de las construcciones verticales. Por ello, surge la necesidad de tener instrumentos que permitan controlar el desempeño de la grúa torre en los proyectos de construcción verticales. En esta investigación, se creó un tablero de control, el cual posibilita la medición y el control del desempeño de la grúa torre durante la ejecución del proyecto constructivo. La herramienta diseñada se implementó en la construcción de un edificio con un sistema estructural compuesto por muros, columnas y losas postensadas. Se estudió solamente una grúa torre. En algunas ocasiones, se brindaron causas lógicas y razonables para explicar un determinado comportamiento de la grúa torre analizada. Sin embargo, estas causas podrían no ser ni las únicas ni las definitivas. Se recurrió al muestreo de trabajo para obtener representatividad en las muestras. Se estima que la herramienta propuesta traerá las siguientes mejoras: enfoque de la grúa torre en las tareas más críticas; medición y mejora de los rendimientos de diversas tareas esenciales para el avance; determinación y reducción del porcentaje de tiempo muerto; mejor seguimiento a los incidentes y reducción de los accidentes, lo que reduce el tiempo en el que el proyecto está detenido debido a accidentes; y, finalmente, mayor seguimiento al mantenimiento de la grúa torre, lo que disminuye el tiempo en el que el equipo está detenido debido a fallas. El costo de la implementación de la herramienta presentada es viable para la mayoría de empresas a cargo de construcciones de modalidad vertical. La relación costo-beneficio del instrumento propuesto se estimó en un factor de 9.8, lo cual sugiere que los beneficios de la herramienta son considerablemente mayores que sus costos.

PALABRAS CLAVE: grúa torre, productividad, indicador clave de desempeño, tablero de control

ABSTRACT

The tower crane is an equipment with a high operating cost and critical for the advancement of vertical constructions. Therefore, the need arises to have instruments that allow controlling the performance of the tower crane in vertical construction projects. In this investigation, a dashboard was created, which makes it possible to measure and control the performance of the tower crane during the execution of the construction project. The designed tool was implemented in the construction of a building with a structural system composed of walls, columns and post-tensioned slabs. Only one tower crane was studied. On some occasions, logical and reasonable causes were provided to explain a certain behavior of the analyzed tower crane. However, these causes may be neither the only ones nor the definitive ones. Work sampling was used to obtain representativeness in the samples. It is estimated that the proposed tool will bring the following improvements: focus of the tower crane on the most critical tasks; measurement and improvement of the productivity of various tasks essential for advancement; determination and reduction of the percentage of downtime; better monitoring of incidents and reduction of accidents, which reduces the time in which the project is stopped due to accidents; and, finally, greater monitoring of tower crane maintenance, which reduces the time in which the equipment is stopped due to failures. The cost of implementing the tool presented is viable for most companies in charge of vertical constructions. The cost-benefit ratio of the proposed instrument was estimated at factor of 9.8, which suggests that the benefits of the tool are considerably greater than its costs.

KEYWORDS: tower crane, productivity, key performance indicator, dashboard

1. INTRODUCCIÓN

La grúa torre es un equipo esencial para el progreso de las construcciones verticales, dicha maquinaria es capaz de levantar cargas bastante grandes. La capacidad de movimiento de aquel elemento levantado por la grúa torre es muy amplia: este se puede movilizar verticalmente, horizontalmente a lo largo de la pluma y 360 grados de forma horizontal. Charpentier-Molina (2010) indica que la pluma de la grúa torre es muy grande, lo que permite a la carga transportada recorrer grandes distancias, también señala que tal equipo disminuye la cantidad de mano obra requerida en una construcción. Un uso eficiente de la grúa torre contribuye a reducir el tiempo de las actividades en las que se utiliza.

Debido al alto precio que tienen las grúas torre, la operación de este tipo de equipo es costosa. El costo mensual de la grúa torre, asociado a su alquiler o a su depreciación, es alto. Dado el alto costo de operación de esta maquinaria, una baja productividad de la grúa torre traerá graves pérdidas financieras al proyecto de construcción. El objetivo de la investigación llevada a cabo fue la creación de un tablero de control que permita conocer y monitorear el desempeño de la grúa torre en un proyecto de construcción.

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En Costa Rica, ha habido investigaciones previas que estudiaron el desempeño de las grúas torre. Mena-Cubero (2007) evaluó una grúa torre de un proyecto de construcción en Heredia y determinó el porcentaje global de la productividad del equipo analizado, el desglose porcentual del tiempo de las actividades específicas de la grúa torre y los rendimientos de las principales actividades relacionadas con la maquinaria en consideración. Núñez-Cordero (2017) presenta una guía para la obtención de rendimientos de grúas torre. Por medio de esa guía y mediante la visita a diversas construcciones, este autor obtuvo diversos rendimientos correspondientes a actividades de la grúa torre. Por último, Charpentier-Molina (2010) midió los tiempos de duración de las actividades de colado de concreto y de desencofrado usando la grúa torre.

3. REFERENTES CONCEPTUALES

3.1. Grúa torre

Rodríguez-Ramírez (2013) señala que la grúa torre es un equipo que funciona gracias a un eje vertical giratorio y a un brazo con varias poleas (pluma), el cual permite levantar

cargas por medio de un gancho suspendido en un cable y llevarlas a otro lugar que se encuentre dentro de su radio de alcance a la altura requerida. En la Figura 1, se observa la grúa torre estudiada para la presente investigación:



Figura 1. Grúa torre estudiada en la investigación

3.2. Productividad

Prokopenko (1987/1989) afirma que la productividad puede definirse como la relación entre la producción obtenida por un sistema de producción o servicios y los recursos empleados para obtenerla. Según García (como se citó en Acosta, 2016), la productividad es la relación aritmética entre la cantidad producida y la cuantía de los recursos empleados en la producción. Prokopenko (1987/1989) y Acosta-Sandoval (2016) indican la ecuación (1) para la productividad:

$$Productividad = \frac{Producción}{Insumos} \quad (1)$$

3.3. Tablero de control e indicador clave de desempeño

Garrote-Bortolussi (2005) indica que el tablero de control consiste en una organización sistemática de la información, la cual se destina a facilitar el diagnóstico de una situación y permitir su monitoreo permanente. Así también, la autora señala que el tablero de control contiene únicamente la información más relevante del área que se desea controlar. Esta autora indica que esa información se presenta de manera organizada mediante un conjunto de indicadores clave de desempeño o KPI (*key performance indicators*) y que el seguimiento periódico de este conjunto permite conocer la situación a monitorear. La Organización de las Naciones Unidas (2010) menciona que un indicador clave de desempeño

es una característica específica, medible y observable. Cabe resaltar que los tableros de control presentan su información de forma gráfica. En la Figura 2, se puede visualizar un ejemplo de tablero de control y sus respectivos indicadores clave de desempeño.

3.4. Muestreo de Trabajo

Según Paz-Abdo, Torres-Contreras y Salazar-Rodríguez (2006), el censo (registro de la información de toda la población) no puede realizarse a veces debido a lo costoso o a lo extenso que puede resultar investigar todos los elementos de una población, por lo que surge la necesidad de recurrir al análisis muestral en tales ocasiones. Debido a las grandes cantidades de tiempo y de dinero que se consumirían si se realizara un censo en la presente investigación, se tomó una muestra de la población estudiada y se recurrió al muestreo de trabajo.

Salas-Bacalla (2000) indica que el muestreo de trabajo es un método de medición indirecto que consiste en realizar, durante cierto período de tiempo, un determinado número de observaciones instantáneas y aleatorias de un grupo de máquinas, procesos o trabajadores. En el muestreo de trabajo, para determinar el tamaño de la muestra en poblaciones finitas, se utiliza la ecuación (2):

$$n = \frac{N \times Z_{1-\alpha}^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_{1-\alpha}^2 \times p \times q} \quad (2)$$

Los siguientes son los significados de cada variable:

- n : tamaño de muestra
- N : tamaño de población
- Z : Coeficiente asociado a un nivel de confianza de $1-\alpha$
- p : Proporción esperada de la población
- q : Proporción esperada de la población ($1-p$)
- d : Error muestral

Según Ochoa (2013), algunos autores indican un máximo de 50 000 individuos para considerar a la población como finita. De acuerdo con este autor, en un tamaño de muestra de una población finita, la probabilidad de encontrar a un individuo con una determinada característica cambia conforme se van seleccionando individuos. Esta probabilidad, según Ochoa (2013), es constante en una población infinita.



Figura 2. Ejemplo de tablero de control y sus respectivos indicadores clave de desempeño (Anvil, s.f.)

El error muestral es aquel error presente en la estimación del parámetro y que es producto de recurrir a una muestra para estudiar a la población. Paz-Abdo, Torres-Contreras y Salazar-Rodríguez (2006) definen al parámetro como la característica de la población que es objeto de estudio. Por último, el nivel de confianza es la probabilidad de que la estimación del parámetro no rebase el error muestral. Un nivel de confianza $1-\alpha$ está asociado a un coeficiente $Z_{1-\alpha}$.

En caso de desconocer las proporciones esperadas de la población p y q , se puede utilizar un valor conservador de 0.5 para ambas variables. Este valor indica que la población es lo más diversa posible y maximiza el tamaño de muestra. En esta investigación, se usó esta cifra de 0.5 para las proporciones esperadas.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Metodología

Se diseñó un tablero de control que contiene los indicadores clave del desempeño de una grúa torre. La grúa torre observada se estudió durante tres meses consecutivos por medio del tablero de control diseñado.

El proyecto estudiado se ubica en el sector oeste de San José en Costa Rica. El edificio contiene oficinas, locales comerciales y apartamentos. El proyecto de construcción tiene 11 niveles comerciales y habitables y 4 sótanos de parqueos. El sistema estructural del edificio es una combinación de muros, columnas y losas postensadas. Durante la mayor parte del periodo de toma de datos, el proyecto contó únicamente con una grúa torre operando. Fue hasta el final del tercer mes de estudio (el noveno mes del proyecto aproximadamente) cuando se presenció la instalación y la operación de una segunda torre. Esta segunda grúa torre se utilizó para las actividades de acabados.

A continuación, se presentan los pasos más importantes de la metodología:

4.1.1. Diseño del tablero de control

El tablero de control debía contener la cantidad de información idónea para conocer el desempeño de la grúa torre. El diseño completo del tablero de control se presenta en el Apéndice. El diseño tomó en consideración los rendimientos de las actividades asociadas directamente a la ruta crítica de la obra gris del proyecto. Además, el diseño contiene otros resultados fundamentales del desempeño de la grúa torre. Se estableció que el tablero de control mediría los siguientes aspectos:

- a) Porcentaje de avance (programado y real) de obra gris del proyecto
- b) Porcentaje de tiempo productivo (promedio mensual y promedio acumulado) de la grúa torre
- c) Productividades específicas de la ruta crítica de la obra gris: Se dio seguimiento a las tres productividades que se consideraron las más importantes para el avance de la obra gris: 1) Colado de concreto mediante balde, en metros cúbicos por hora (m^3/h); 2) Colocación de formaleta, en metros cuadrados por hora (m^2/h), y 3) Transporte de piezas de material o equipo asociadas a la construcción de entresijos, en movimientos por hora (movimientos/h). El tablero de control dio un promedio mensual y un promedio acumulado para cada una de estas productividades. Además, en el tablero de control, se puede visualizar las metas mínimas de rendimiento, las cuales las establece el equipo del proyecto de construcción.
- d) Porcentajes de tiempo de las actividades de la grúa torre: Se creó una gráfica circular del desglose de actividades correspondiente al promedio mensual. Además, se creó una gráfica circular del desglose de actividades correspondiente al promedio acumulado. Se incluyeron el colado de concreto con balde, la colocación de formaleta, el transporte de piezas, la actividad no productiva y el tiempo muerto como variables del desglose de actividades.
- e) Porcentajes de tiempo muerto (promedio mensual y promedio acumulado) de la grúa torre
- f) Seguridad ocupacional: El tablero de control dio seguimiento a la seguridad ocupacional asociada directamente a la grúa torre. Esto se hizo mediante la recopilación y registro de los datos de incidentes y accidentes causados por la grúa torre o por su cuadrilla.
- g) Mantenimiento mensual de la grúa torre: Se creó una lista de chequeo, en el tablero de control, de aquellos mantenimientos mensuales más importantes y sus frecuencias recomendadas. El tablero de control presenta tanto los mantenimientos programados como los que sucedieron en la realidad.
- h) Consumo eléctrico de la grúa torre: Por medio de medidores eléctricos que midieron el consumo únicamente de la grúa torre, se recopilaron datos y se creó un gráfico del consumo eléctrico mensual y del consumo eléctrico promedio acumulado de la grúa.

4.1.2. Metodología de las mediciones y determinación del tamaño de muestra

Se utilizó el método de muestreo de trabajo para estimar una muestra representativa de las productividades correspondientes al rendimiento y al tiempo productivo. La totalidad de horas trabajadas por la grúa torre en un mes es el tamaño poblacional seleccionado. Se estimó un total mensual de 238 horas laboradas por la grúa torre. Este total mensual consideró un promedio de 4.33 semanas por mes, 5.5 días por semana y 10 horas por día. Para definir el tamaño de muestra, se utilizó la fórmula usada para la población finita. Se utilizó un nivel de confianza de 90% y un error de la muestra de 10%. El tamaño de muestra obtenido fue de 53 horas.

Con el fin de contar con aleatoriedad en los turnos en los que se tomaban las medidas, se utilizó una función aleatoria en Excel, la cual determinó en cuáles turnos (ya sean mañanas o tardes) del mes se debía ir al proyecto para tomar las medidas. Esto resultó en que se tomaron medidas durante mañanas, durante tardes, en días lluviosos o en días sin lluvia. En promedio, los periodos de toma de datos fueron de aproximadamente 4 horas. El plazo total de toma de datos fue del 9 de octubre del 2019 al 21 de enero del 2020. Se tomaron 1554 mediciones.

Dada la gran cantidad de mediciones, un aspecto importante fue contar con uniformidad al medir las duraciones de las actividades de la grúa torre. Para lograr uniformidad, se definieron reglas de cuándo debía iniciarse la medición del tiempo y cuando debía concluirse. Estas reglas se definieron para las actividades de colado de concreto con balde, colocación de formaleta y transporte de piezas para la construcción de entrepisos.

Se creó un archivo en Microsoft Word para la anotación de datos en campo y otro archivo en Microsoft Excel para el almacenamiento de aquellos datos recopilados en la construcción. Estos archivos se diseñaron como paso previo a la construcción de los tres tableros de control de los tres meses consecutivos.

Si el lector tuviera interés en conocer con mayor detalle la metodología o la investigación completa, lo puede hacer consultando el trabajo final de graduación efectuado por Gamboa-Araya (2020) con el título “Análisis del desempeño de una grúa torre y diseño de un tablero de control para el seguimiento de su productividad en un proyecto de construcción”.

4.2. ACTIVIDADES DE LA GRÚA TORRE

4.2.1. Actividades productivas

Las actividades de la grúa torre se clasificaron en productivas y no productivas considerando su contribución directa al avance de la ruta crítica de la obra gris del edificio.

Para efectos de la investigación, una actividad productiva es aquel proceso, con la grúa torre, que permite la construcción directa del entrepiso. Las siguientes actividades, realizadas por la grúa torre, son productivas:

- Colado de concreto con balde: En el colado de concreto, se hace uso de la grúa torre para verter concreto principalmente en columnas y muros.
- Colocación de formaleta: En el proyecto de graduación, se le denomina colocación de formaleta a la actividad en la que ocurre una de las siguientes situaciones:
 - Montaje de una formaleta
 - Desmontaje de una formaleta
 - Desmontaje y montaje de una formaleta
- Transporte de piezas (material o equipo) para la construcción de entrepisos: La actividad de transporte de piezas es aquella acción en la que se movilizan materiales y herramientas a los entrepisos. Estos materiales y herramientas permiten la confección directa del entrepiso.

4.2.2. Actividad no productiva

La actividad no productiva incluye las actividades de soporte de las instalaciones temporales, el transporte de cargas fuera de la huella del edificio y las labores de limpieza. La actividad no productiva es aquella acción que no contempla un aporte directo a la construcción del entrepiso.

4.2.3. Detención de la grúa torre

En la investigación, se consideró que la grúa torre está detenida cuando esta no se mueve y no tiene enganchada carga alguna. El tiempo transcurrido cuando la grúa torre está detenida puede ser tiempo muerto o puede ser tiempo de descanso durante la jornada laboral. Durante el tiempo muerto, la grúa torre se halla detenida por la ausencia de alguna de las condiciones para trabajar. En el tiempo muerto, puede faltar el material o el equipo a transportar, la mano de obra de apoyo, el espacio para trabajar o a las instrucciones por parte de superiores. El tiempo de descanso durante la jornada laboral no se considera ni para la productividad ni para el desglose del tiempo de la grúa torre.

5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo de la investigación no pretendía medir la productividad total de la grúa torre en el proyecto de construcción, sino más bien diseñar y poner a prueba un tablero de control y validar su utilidad como herramienta de control y de apoyo a la toma de decisiones. Debido a lo anterior, no se llevaron a cabo estudios exhaustivos sobre las causas del aumento o de la disminución de una determinada productividad de un mes a otro. Al hacer el análisis de los datos, se presentan causas lógicas y razonables de los cambios de productividad de la grúa torre. Sin embargo, estas causas pueden no ser ni las únicas ni las definitivas.

Como parte del proceso de análisis de resultados, para una determinada productividad, se decidió utilizar una meta mínima. Esto permitió tener un nivel contra el cual comparar los datos registrados, lo cual es usual en los tableros de control. La meta establecida para el porcentaje de tiempo productivo se fijó con base en los criterios del equipo a cargo del proyecto de construcción estudiado y del director del trabajo de investigación. Las opiniones de estos y el análisis preliminar a la grúa torre en sitio permitieron establecer las metas mínimas para los rendimientos. Tanto el equipo que dirigía la construcción como el director del trabajo de investigación tenían bastantes conocimientos y experiencia en el sector constructivo, lo cual favoreció a la obtención de valores acertados.

5.1. Porcentajes de tiempo de las actividades específicas de la grúa torre

En la Figura 3, se muestra las distribuciones específicas del tiempo de la grúa torre para cada uno de los meses de mediciones.

La Figura 3 muestra la variabilidad existente en los distintos usos durante los tres meses registrados. También, muestra que la actividad de colado de concreto fue siempre una actividad prioritaria, ya que su porcentaje fue casi invariable. Se observan dificultades en el mes 3, puesto que los tiempos muertos de dicho mes son mayores a los de los otros meses. Este aumento de los tiempos muertos se debió a fallas en la grúa torre y a la instalación de la segunda grúa torre del proyecto.

5.2. Productividades de las actividades principales de la grúa torre

5.2.1. Productividad del colado de concreto con balde

En la Figura 4, se muestra la productividad mensual real del colado de concreto y su productividad mínima meta.

Se nota un incremento en la productividad del mes 1 al mes 2. Esta mejora podría deberse en parte a la curva de aprendizaje y a un mejoramiento en las capacidades de trabajo en equipo de las cuadrillas.

El tablero muestra además una disminución de la productividad del colado de concreto del mes 2 al mes 3 que podría deberse

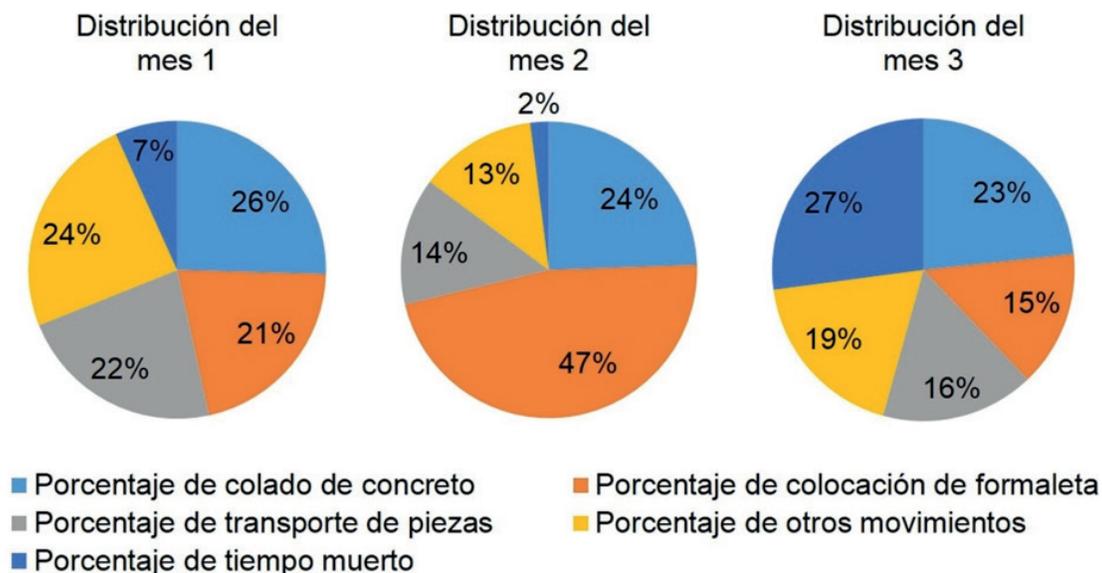


Figura 3. Desgloses porcentuales específicos del tiempo de la grúa torre de los meses de mediciones

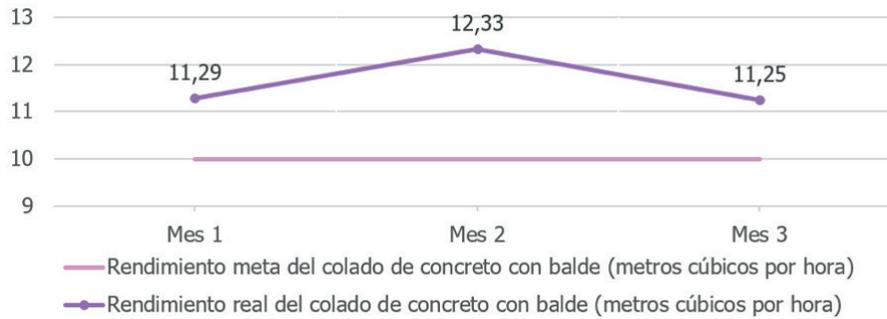


Figura 4. Productividad mensual real y productividad mínima meta correspondientes al colado de concreto con balde

en parte a una gran cantidad de incidentes ocurridos en el mes 3. Las cantidades mensuales de incidentes son visibles en la Figura 8. La instalación de otra grúa torre pudo haber afectado a la productividad del colado de concreto en el mes 3. El motor de elevación de la grúa torre analizada sufrió una falla mecánica en el mes 3. Esta falla mecánica ocurrió cuando se realizaba la actividad de colado de concreto. La falla mecánica pudo afectar a la productividad del colado de concreto en el mes 3.

La productividad mensual real se mantuvo por encima de la meta mínima, la cual era de 10 m³/h. Un buen mantenimiento de la grúa torre realizado desde octubre del 2019 hasta enero del 2020 pudo contribuir al cumplimiento con la meta establecida para el colado de concreto con balde. El mantenimiento mensual realizado a la grúa torre se puede visualizar más adelante en la Tabla 1.

5. 2. 2. Productividad de la colocación de formaleta

En la Figura 5, se observa la productividad mensual real de la colocación de formaleta. En la Figura 5, además, se visualiza la meta mínima establecida para la productividad de la colocación de formaleta.

La curva de aprendizaje y un mejoramiento en las capacidades de trabajo en equipo de las cuadrillas podrían ser factores que contribuyeron a las mejoras de la productividad de colocación de formaleta del mes 1 al mes 2 y del mes 2 al mes 3. La Figura 3 muestra un aumento en el tiempo empleado para la colocación de formaleta del mes 1 al mes 2, lo que pudo influir en el aumento de la productividad de la colocación de formaleta del mes 1 al mes 2.

Se cumplió con la meta mínima establecida para la colocación de formaleta en los tres meses estudiados. El cumplimiento con esta meta pudo deberse en parte al buen mantenimiento brindado a la grúa torre desde octubre del 2019 hasta enero del 2020. Las productividades del colado de concreto con balde y de la colocación de formaleta fueron siempre mayores a las metas mínimas.

5.2.3. Productividad del transporte de piezas

En la Figura 6, se muestra la productividad mensual real del transporte de piezas y su productividad meta mínima.

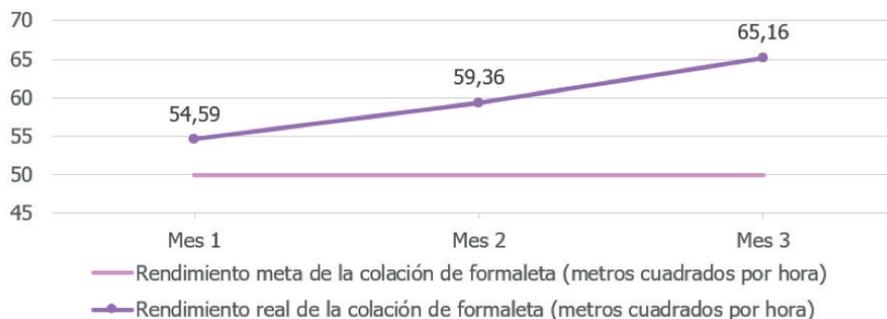


Figura 5. Productividad mensual real y productividad mínima meta correspondientes a la colocación de formaleta

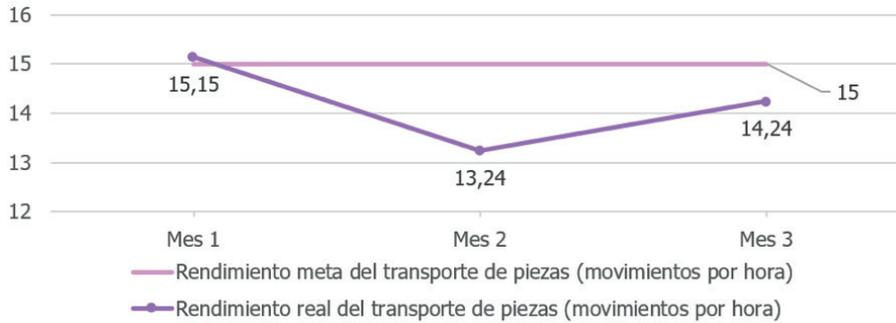


Figura 6. Productividad mensual real y productividad mínima meta correspondientes al transporte de piezas

La Figura 3 muestra una disminución del tiempo empleado en el transporte de piezas y en la actividad no productiva del mes 1 al mes 2. Esto podría haber contribuido al decremento de la productividad del transporte de piezas del mes 1 al mes 2.

En la Figura 3, se observa también un incremento en el tiempo empleado en el transporte de piezas y en la actividad no productiva del mes 2 al mes 3. Esto pudo haber motivado al aumento de la productividad del transporte de piezas del mes 2 al mes 3.

A partir del 11 de noviembre, algunas cargas correspondientes al transporte de piezas pasaban por un ducto cuando eran movilizadas. Las productividades de los meses 2 y 3 del transporte de piezas no cumplieron con la meta mínima establecida. Este incumplimiento pudo deberse en parte a las movilizaciones a lo largo del ducto.

5.3. Porcentajes de tiempo productivo, no productivo y muerto de la grúa torre

En la Figura 7, se presenta los porcentajes de tiempo productivo, no productivo y muerto de los tres meses de mediciones. En la Figura 7, también, se muestra la meta mínima de productividad.

El aumento en el porcentaje de tiempo productivo del mes 1 al mes 2 podría deberse a una curva de aprendizaje y al mejoramiento en las capacidades de trabajo en equipo.

Los buenos mantenimientos mensuales hechos desde octubre hasta enero pudieron haber contribuido a que los porcentajes de tiempo productivo de los meses 1 y 2 fueran mayores a la meta mínima.

La gran cantidad de incidentes ocurridos en el mes 3 y la instalación de otra grúa torre pudieron ser motivo del bajo porcentaje de tiempo productivo del mes 3 y del incumplimiento con la productividad mínima meta en dicho mes.

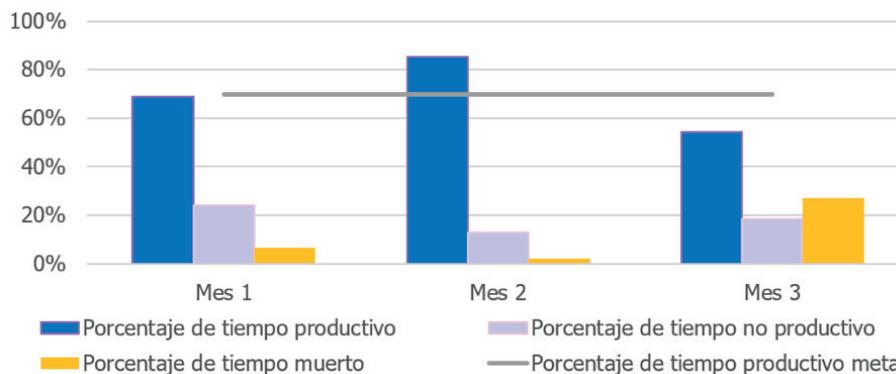


Figura 7. Porcentajes de tiempo productivo, no productivo y muerto de los tres meses de mediciones y meta mínima de productividad

5.4. Seguridad ocupacional asociada a la grúa torre

En la Figura 8, se observa la cantidad de incidentes y de accidentes asociados directamente a la operación de la grúa torre y ocurridos durante los meses de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero.

El tablero de control muestra que la cantidad de incidentes del mes 3 es considerablemente mayor respecto a la cantidad de incidentes de los otros meses. Los incidentes del mes 3 se debieron a que al operador de grúa torre le faltaba capacidad para ejercer la labor.

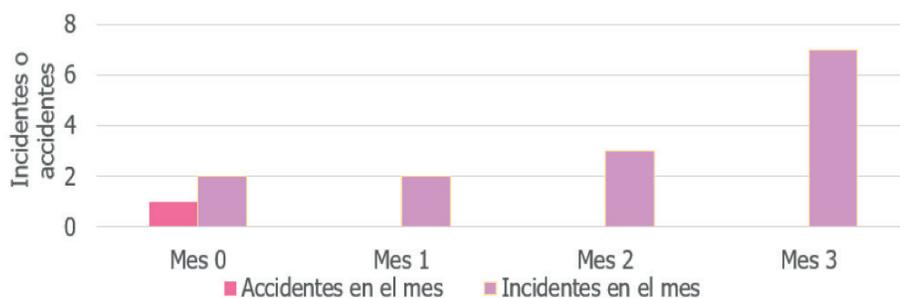


Figura 8. Cantidad de incidentes y de accidentes de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero

Tabla 1. Mantenimientos mensuales hechos desde septiembre del 2019 hasta enero del 2020					
Parte de la grúa torre	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
1. Estructura	-	-	X	X	X
2. Lastre	X	X	X	X	X
3. Alimentación eléctrica	X	-	-	X	-
4. Cable de desplazamiento horizontal	-	X	X	X	X
5. Cable de izado	-	X	X	X	X
6. Frenos	-	X	X	X	X
7. Motor eléctrico y transmisión	X	X	X	X	X
8. "Topes" (limitadores de seguridad)	-	X	-	-	-
9. Ruta del carro (tambores, poleas, cojinetes, soportes)	-	X	X	X	X
10. Ruta de carga (tambores, poleas, cojinetes, soportes)	-	X	X	X	X
11. Cabina (interior, vidrios, parabrisas, soporte)	-	X	-	-	-
12. Extintor al día	X	X	X	X	X
13. Iluminación	-	-	X	-	X
14. Anemómetro	-	X	-	X	-

5.6. Análisis de costo-beneficio

5.6.1. Costos

El tablero de control se puede implementar utilizando a una persona con un perfil de al menos nivel técnico que trabaje media jornada en esta tarea. Si una jornada mensual corresponde a 238 horas, un trabajo de medio tiempo tendría 119 horas mensuales. Estas 119 horas son una estimación del tiempo mensual necesario para implementar el tablero de control. Con un salario de 375 000 colones para un trabajo de tiempo completo y con un cincuenta por ciento de cargas sociales, el tablero de control tendría un costo de 281 250 colones por mes. Este costo equivale a 455.8 dólares por mes utilizando un tipo de cambio de 617 colones.

5.6.2. Beneficios

De acuerdo con el criterio de expertos, se estima que el uso del tablero de control traerá los siguientes beneficios:

- Enfoque de la grúa torre en las tareas más críticas
- Medición y mejora de rendimientos de diversas tareas
- Determinación y reducción de porcentajes de tiempos muertos
- Mejor seguimiento a los incidentes y reducción de accidentes: Esto implica un menor tiempo del proyecto en el que este está detenido debido a accidentes.
- Mejor seguimiento al mantenimiento de la grúa torre: Esto conduce a un menor tiempo en el que la grúa torre está detenida debido a fallas.

Según lo observado en campo y según lo obtenido de consultas a expertos, si los beneficios anteriores se suman, es razonable evitar 20 minutos de desperdicio de tiempo en promedio diariamente. Esto equivale a un ahorro de desperdicio de 1.8 horas por semana y, en promedio, 7.9 horas por mes.

Para estimar los beneficios, es necesario sumar los siguientes dos costos:

- Costo mensual de operar la grúa torre: El costo mensual debido a la operación de la grúa torre se puede desglosar de la siguiente forma: alquiler del equipo (8 000 dólares), salario y cargas sociales del operador (2 750 dólares), salario y cargas sociales de un operario monitor (950 dólares), salario y cargas sociales de un ayudante (750 dólares). En esta estimación, no se considera el costo de la energía y el costo del mantenimiento, lo cual resulta conservador. El costo total mensual de operar la grúa torre, sumando los rubros anteriores, es de 12 450 dólares al mes. Si esto se divide entre 238 horas de trabajo, se obtiene un costo de 52.3 dólares por hora.

- Costo mensual de la mano de obra asociada a la obra gris: En el proyecto de construcción estudiado, el pico máximo de trabajadores fue de aproximadamente 300 trabajadores y, en promedio, se tuvieron de 175 a 200 trabajadores, propios de la empresa y pertenecientes a subcontratistas. Se obtiene un costo total de la mano de obra de 122 500 dólares por mes utilizando conservadoramente la cifra de 175 trabajadores y empleando un promedio mensual conservador de 700 dólares correspondiente al salario y a las cargas sociales del personal trabajador. Si se divide el costo total de la mano de obra entre las 238 horas de trabajo del mes, se obtiene un costo de 514.7 dólares por hora.

Al sumar el costo de operación de la grúa torre más el costo de la mano de obra directa e indirecta, se obtiene un costo total de 567 dólares por hora.

El tablero de control disminuye las horas requeridas para hacer el trabajo y, por ende, también, disminuye los costos. El beneficio económico se estima como los costos no incurridos. Si se multiplica el costo total de 567 dólares por hora por las 7.9 horas por mes que el tablero puede ahorrar, se obtiene un beneficio estimado de 4479.3 dólares por mes.

El cociente de dividir el beneficio entre el costo ($4479.3/455.8$) es de 9.8. Esta relación costo-beneficio obtenida sugiere que el tablero trae beneficios importantes al proyecto de construcción. El costo de implementación del tablero de control es manejable si se considera la magnitud del presupuesto de este tipo de proyectos.

6. CONCLUSIONES

- Las técnicas de indicadores clave de desempeño, tableros de control y muestreo de trabajo se pueden emplear para el diseño, en el software Excel, de una herramienta que permita el registro, la medición y el control del desempeño de una grúa torre en un proyecto de construcción.
- Es viable realizar el seguimiento y el control de la grúa torre de un proyecto de construcción vertical por medio de tableros de control. En esta investigación, se hizo el seguimiento y el control para tres meses consecutivos de un proyecto.
- Cada tablero de control cumplió con el nivel de confianza y el error muestral previamente establecidos.
- El equipo a cargo del proyecto de construcción estudiado indicó que el tablero de control propuesto provee la información esencial para el seguimiento del desempeño de una grúa torre y que es de fácil comprensión y de sencilla utilización.

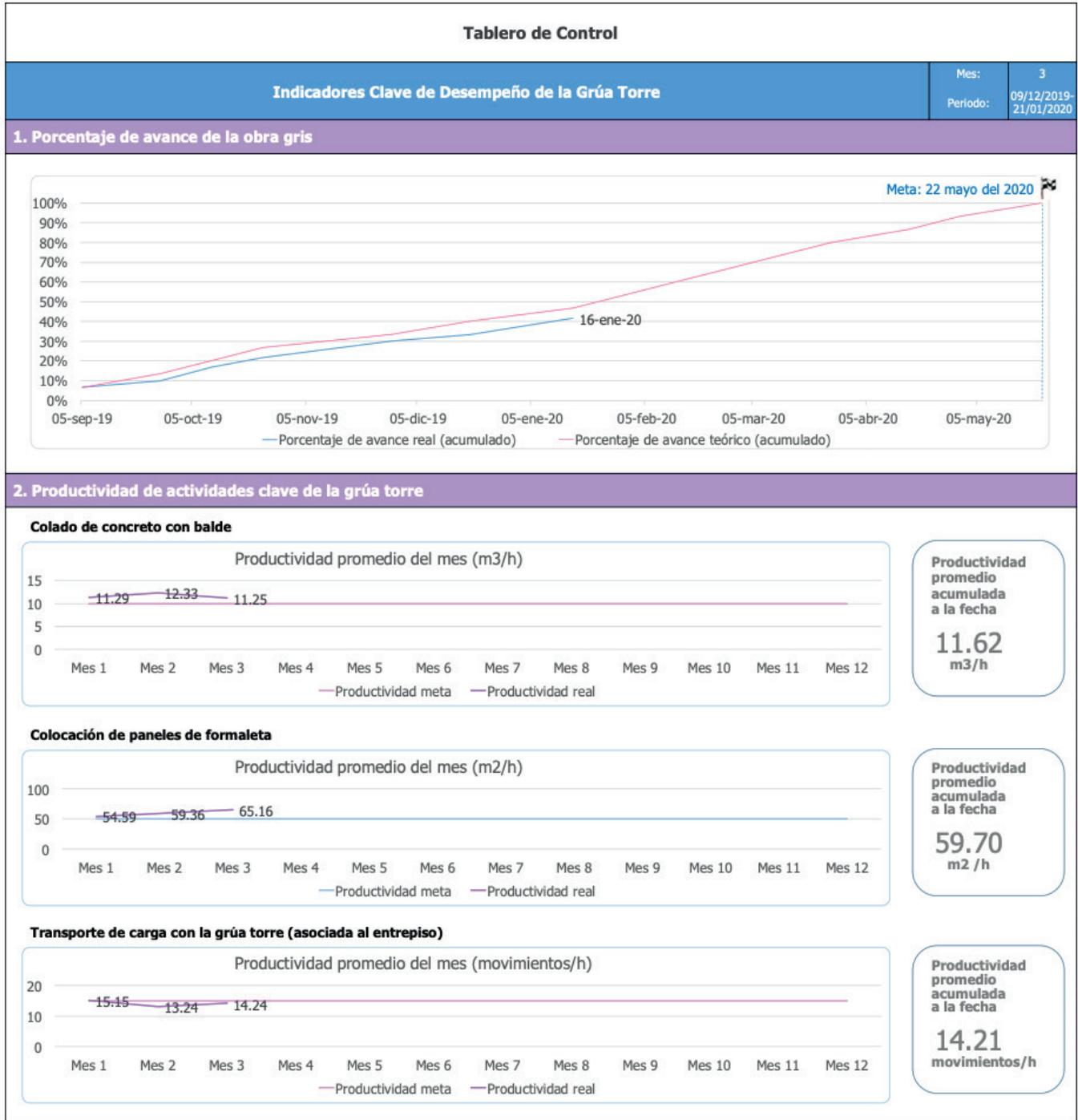
- El tablero de control diseñado permite la comparación de resultados clave mensuales, lo que facilita la identificación de cambios importantes en el desempeño de la grúa torre durante la ejecución del proyecto y promueve la toma de decisiones acertadas.
- El tablero de control de la investigación permite la comparación cuantitativa del desempeño entre los meses así como la comparación de los resultados promedio con las metas inicialmente planteadas. Estas comparaciones permiten al equipo a cargo del proyecto de construcción tener información mensual oportuna, la cual sirve de apoyo a la toma de decisiones y a los ajustes del rumbo del proyecto.
- La implementación del tablero de control construido requiere de una persona de nivel técnico que trabaje aproximadamente media jornada en la tarea, por lo que el costo de implementar la herramienta mostrada es viable para la mayoría de empresas que estén a cargo de construcciones verticales.
- Bajo un escenario conservador, se obtuvo una relación costo-beneficio de 9.8. Esta cifra sugiere que el tablero de control mostrado trae importantes beneficios con respecto al costo de ser implementado.

7. REFERENCIAS

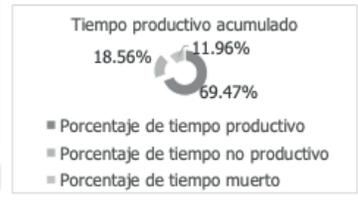
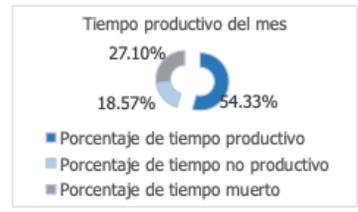
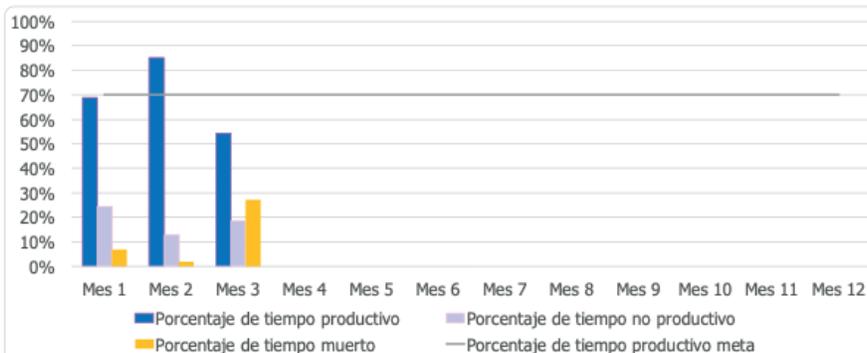
- Acosta-Sandoval, S. (2016). *Medición y mejoramiento de la productividad en la colocación de obra falsa, el montaje de elementos prefabricados y colado de entrepiso del condominio vertical residencial Q-BO* [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio del Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7270>
- Charpentier-Molina, L. A. (2010). *Eficiencia del uso de grúas en la construcción de edificios* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio del Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información de la Universidad de Costa Rica. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/3328>
- Gamboa-Araya, D. (2020). *Análisis del desempeño de una grúa torre y diseño de un tablero de control para el seguimiento de su productividad en un proyecto de construcción* [Tesis de licenciatura inédita]. Universidad de Costa Rica.
- Garrote-Bortolussi, M. (2005). *Tablero de control: optimizando la acción* [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Buenos Aires]. Repositorio Institucional del Instituto Tecnológico de Buenos Aires. <https://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/1059>
- Mena-Cubero, J. (2007). *Estudio de productividad y rendimientos en procesos constructivos, mediante el uso de grúa torre* [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio del Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6141>
- Núñez-Cordero, J. C. (2017). *Guía para la obtención y análisis de rendimientos de grúas-torre en la construcción de obra gris* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio del Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información de la Universidad de Costa Rica. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/7420>
- Ochoa-Gómez, C. (11 de noviembre del 2013). ¿Qué tamaño de muestra necesito? *Blog de Netquest*. <https://www.netquest.com/blog/es/que-tamano-de-muestra-necesito>
- Organización de las Naciones Unidas. (31 de octubre del 2010). *Indicadores*. <https://www.endvawnow.org/es/articles/336-indicadores.html>
- Prokopenko, J. (1989). *La gestión de la productividad: manual práctico* (1.ª ed.). Organización Internacional del Trabajo. (Trabajo original publicado en 1987).
- Rodríguez-Ramírez, M. A. (2013). *Propuesta de revisión y actualización de normativa para instalación, uso y desmontaje de grúas torre en Costa Rica* [Tesis de licenciatura inédita]. Universidad de Costa Rica.
- Salas-Bacalla, J. (2000). Muestreo de trabajo. *Industrial Data*, 3(1), 47–49. <https://doi.org/10.15381/idata.v3i1.6578>
- Torres-Contreras, E. M.; Paz-Abdo, K. S., y Salazar-Rodríguez, F. G. (2006). Tamaño de una muestra para una investigación de mercado. *Revista Electrónica Ingeniería Primero*, (2). https://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin02/URL_02_BAS02.pdf

8. APÉNDICE

Tablero de control del mes 3

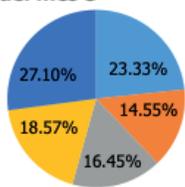


3. Tiempo productivo vs. tiempo no productivo



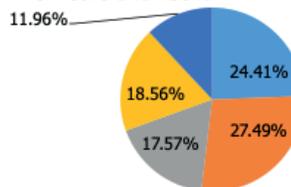
4. Usos de la grúa torre

Promedio del mes 3



- Porcentaje de colado de concreto
- Porcentaje de colocación de formaleta
- Porcentaje de transporte de piezas
- Porcentaje de otros movimientos

Promedio a la fecha



- Porcentaje de colado de concreto
- Porcentaje de colocación de formaleta
- Porcentaje de transporte de piezas
- Porcentaje de otros movimientos
- Porcentaje de tiempo muerto

5. Seguridad ocupacional asociada a la grúa torre

Horas trabajadas por la grúa torre en el mes: **238.15**

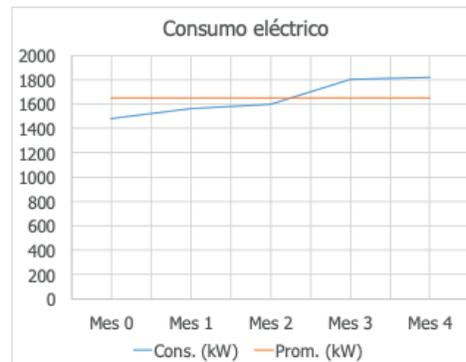
Horas acumuladas a la fecha: **714.45**

	Meta	Real
Accidentes acumulados	0	1
Incidentes acumulados	<15	14



6. Consumo eléctrico de la grúa torre

Mes	Cons. (kW)	Prom. (kW)
Mes 0	1480	1652.0
Mes 1	1560	1652.0
Mes 2	1600	1652.0
Mes 3	1800	1652.0
Mes 4	1820	1652.0
Mes 5		1652.0
Mes 6		1652.0
Mes 7		1652.0
Mes 8		1652.0
Mes 9		1652.0
Mes 10		1652.0
Mes 11		1652.0
Mes 12		1652.0



7. Mantenimiento crítico de la grúa torre

Mantenimiento	Mes del proyecto											
	sep	oct	nov	díc	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago
1. Estructura			X	X	X							
2. Bases y lastres	X	X	X	X	X							
3. Alimentación eléctrica	X			X								
4. Cable de desplazamiento horizontal		X	X	X	X							
5. Cable de izado		X	X	X	X							
6. Frenos		X	X	X	X							
7. Motor eléctrico y transmisión	X	X	X	X	X							
8. "Topes" (limitadores de seguridad)		X										
9. Ruta del carro (tambores, poleas, cojinetes, soportes)		X	X	X	X							
10. Ruta de carga (tambores, poleas, cojinetes, soportes)		X	X	X	X							
11. Cabina (interior, vidrios, parabrisas, soporte)		X										
12. Extintor al día	X	X	X	X	X							
13. Iluminación			X		X							
14. Anemómetro		X		X								

X: Revisión y mantenimiento necesario indicados en la Boleta de Revisión, Mantenimiento y Reparación de Equipos

X: Revisión y mantenimiento necesario indicados por el Director del Proyecto de Construcción

8. Comentarios y situaciones especiales

- El día 15 de enero del 2020 tuvo una situación especial. Un operador de grúa torre había sido el responsable de muchos incidentes relacionados con la grúa torre. Por ello, la empresa a cargo del proyecto decidió prescindir de los servicios del operador. Durante gran parte del día 15 de enero del 2020, el operador estaba en la grúa torre estudiada y se negaba a salir de allí. Esto se debió a la decisión tomada por la empresa a cargo del proyecto de prescindir de los servicios del operador.
- El día 16 de enero de 2020 tuvo otra situación especial. El motor de elevación de la grúa torre tenía un desperfecto mecánico. La falla mecánica se manifestó cuando se realizaba la actividad de colado de concreto. Era muy difícil subir el balde de concreto con la grúa torre a la altura requerida: el balde concreto subía y bajaba sin elevarse a la altura deseada, se quedaba colgado del gancho de la grúa torre y estático y duraba mucho cuando se movía verticalmente. Al final el colado de concreto ocurría, pero este se hacía de forma excesivamente lenta. Finalmente, en el mismo día de la falla mecánica, la grúa torre se reparó y esta siguió funcionando adecuadamente.
- El operador de grúa torre sustituido fue el responsable de la gran cantidad de incidentes asociados a la grúa torre ocurridos del 9 de diciembre del 2019 al 21 de enero del 2020.