

Information and Communications Technology in Construction: A Proposal for Identifying the Root Causes of CPI

Pablo Orihuela^{1,2*}, Jorge Orihuela², Santiago Pacheco^{1,2}

Received 09 December 2016

Abstract

To improve feedback from the Cost Performance Index (CPI), it is necessary to identify the reasons why Actual Cost differs from Planned Cost. At present, this information is collected and transferred orally, on paper, by telephone or e-mail. This paper proposes an information and communication technology that uploads information to an Intranet using electronic devices and mobile applications, thus encouraging the participation of workers and other stakeholders. This proposal aims to contribute towards information quality improvement in Production Control.

Keywords

automation, Information Systems in Construction, ICT in construction, Production Control, Earned Value Management

1 Introduction

If we want to talk about improvement of either companies or businesses from any field, we necessarily need to revisit Kaizen or Continuous Improvement; this proposes putting into practice the Shewhart Cycle, better known as the Deming Cycle in Japan since it was Dr Deming who made it public, or the PDCA Cycle (Plan–Do–Check–Act) (Walton, 1988; Imai M., 1986; Liker, 2013).

In the civil construction field, applying this cycle consists of planning, execution, evaluation, and corrective measures for improvement; however, in practice, the third stage—the one pertaining to evaluation—is not successfully complied with. This is because, significantly, information about the use of work resources is not reliable or is not available when necessary (Dave et al., 2010).

This article proposes an information and communication system to collect data directly from the worksite and process it on the Web, consequently, it will be possible to evaluate and control all construction site activities on a continuous basis, having access to it from anywhere. This system was already patented by its authors several years ago, with excellent results, but what we are incorporating in this new proposal is the technology to automatize both data collection and processing. Said system collects data from the three resources of production through electronic devices and process it with online software available in a Web application.

The labour resource is reported by the workers themselves using touch screens in the late morning, and in the late afternoon at the end of each shift. Material consumption is recorded online by tracking the materials leaving the warehouse and being subsequently used. The use of equipment is registered by the operators. Finally, work progress is reported online on a daily basis from their worksite through digital tablets using store-and-forward applications.

¹ Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima 15088, Peru

² Motiva S.A., Lima 15073, Peru

* Corresponding author, e-mail: porihuela@motiva.com.pe

2 Managing Production Information in Construction Works

The quality of production information in construction works is not consistent with current times; in practice, we can only obtain accurate information on the costs at the end of the works. Apart from being late, the information delivered by traditional control systems is too grouped to be useful for controlling and planning decision making (Marchesan and Formoso, 2001; Navon and Sacks, 2007).

In the last two decades, the construction industry has shown great advances in the use of ICT worldwide, even in small and medium-sized enterprises, as described by several authors (Howard et al., 1998; Tas and Irlayici, 2007; Michaloski and Cabral, 2010; Alaghbandrad et al., 2011; Abuelmaatti et al., 2014; Ibem and Laryea, 2015). However, as Dave et al. (2008) conclude, based on the work of Tartari et al. (2007), the “majority of ICT solutions within the construction industry are applied to the peripheral processes” and “site management and other construction related activities have remained virtually unaffected.” Additionally, 90% of ICT expenses are incurred in the technical work office or head office and only 10%, for field use (Anon., 2016).

This is consistent with Bowden’s studies (Bowden, 2002; Bowden et al., 2004), which presents the existence of 85 paper-based tasks carried out on-site as part of their normal daily work. “These were grouped into different document types revealing the most commonly identified tasks as completing data collection forms (25%), dealing with correspondence (18%), viewing and reviewing drawings (13%) and reading and writing specifications (6%)”.

From the research conducted in the UK by Chen and Kamara, it can be concluded that the information necessary for production monitoring (materials, labour, equipment and progress) is collected using paper-based forms (65%); by remembering the information (28%); and through mobile devices (only 7%), as can be seen in Fig. 1. Also, as shown in Fig. 2, transfer of the information collected is done mainly in face-to-face meetings (42%), by e-mail (31%) or phone (20%), and only 7% is sent over the Intranet or Extranet (Serpell, 2002).

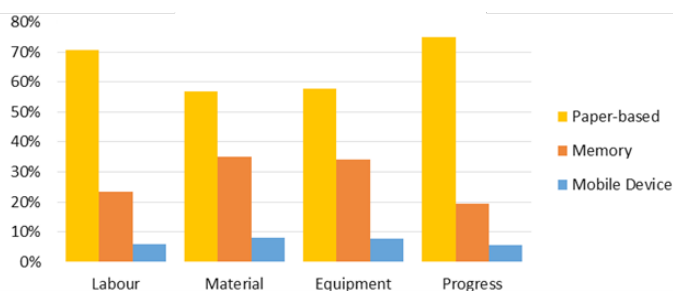


Fig. 1 Production information collection methods.

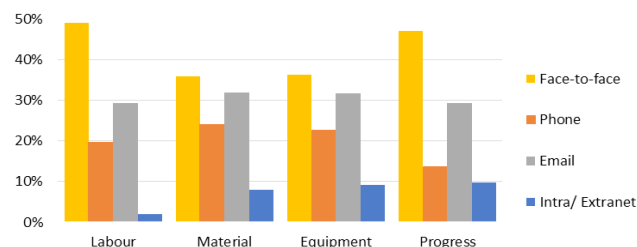


Fig. 2 Production information transfer mediums.

The results presented demonstrate the inefficient manner in which production information is handled on the construction site and the existence of great improvement opportunities. The Information Technology and System proposed in this paper eliminates the need to fill out information collection forms about the use of production resources during the information collection process. In addition, this information is entered directly into a Web application, so it does not require an additional information transfer process.

3 Continuous Improvement in Production Control

Production Control must be planned within the framework of Continuous Improvement. If control activities indicate that we are doing something wrong, it is necessary to identify the problem to solve it. Likewise, if we are getting good results, it is necessary to determine which the effective practices are to standardise them. Therefore, the control in the Check stage of the PDCA Cycle must provide enough information to identify why those results were obtained and act accordingly, thus closing the cycle.

To implement Continuous Improvement in Production Control, the Lean Construction Institute proposes using the Last Planner System®. For the first stage (Plan), they suggest following this sequence: Master Schedule, Phase Schedule, Look Ahead Plan, and Weekly Work Plan (Fig. 3a). After the Weekly Work Plan has been executed (Do), the Percentage of Plan Complete (PPC) and the Reasons for Non-Compliance (RNC) must be verified (Check) to complete the learning process. However, these indicators only shed light on the efficiency of the program, not on the costs.

On the other side, for Continuous Improvement, the Project Management Institute recommends the Earned Value Technique (Fig. 3b) in its PMBOK Guide. First, Planned Value (Plan) must be estimated, and then Earned Value and Actual Costs (Do) must be calculated at the end of any control period. After obtaining these three values, we calculate (Check) the Cost Performance Index (CPI) and the Schedule Performance Index (SPI) and then act accordingly. Nonetheless, these indicators are very broad, and we consider that CPI should also include some RNC like PPC does.

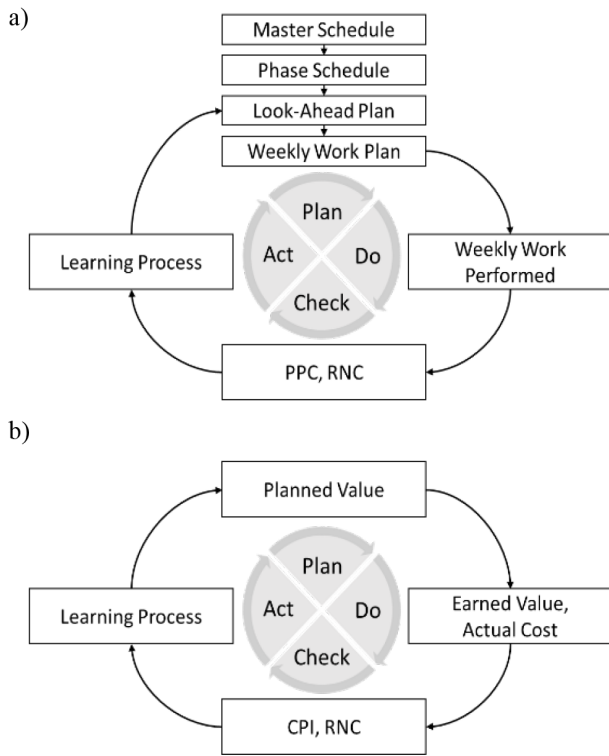


Fig. 3 (a) The Last Planner System® and Continuous Improvement; (b) Earned Value and Continuous Improvement.

Thus, it is necessary to make a Root Cause Analysis of the Actual Cost and apply the 5 Whys Technique, with which we will obtain a Tree Diagram as shown in Fig. 4. Here, the seven root causes that can make the Actual Cost differ from the Earned Value are displayed.

4 The Seven Groups of Causes for Non-Compliance with the Actual Cost

Productivity in construction works poses a complex problem due to the number of variables involved. Therefore, it is important to know which factors are negatively or positively affecting the executed tasks to address them (McGregor, 1960). In this scenario, it is crucially important to identify the causes and source of variations concerning the planned cost to complete the continuous improvement cycle and start the feedback stage.

Figure 4 also outlines how the Actual Cost of a project is calculated from the savings and losses results of all the tasks, and how this can differ from the Earned Value due to the seven groups of root causes, based on the assumption that the baseline is correct:

Cause No. 1: Difference in the amount of work foreseen for each task due to errors in the calculations done based on the plans during the planning stage. In this case, feedback is directed to the planners.

Cause No. 2: Difference in the number of man-hours used due to a lower or higher workforce productivity, which in turn may have different causes such as lack of space, timely information, security aspects, availability of equipment, tools and materials, and motivation levels.

Cause No. 3: Difference in the number of machine hours used, which may be due to workforce productivity and machine performance.

Cause No. 4: Difference in the amount of materials used, which may be due to waste surpassing regular standards, overdosing, oversized materials, and reworking.

Causes No. 5, 6, and 7: Price differences concerning workforce, equipment or materials, which chiefly obey market reasons and are mainly controlled by the procurement management.

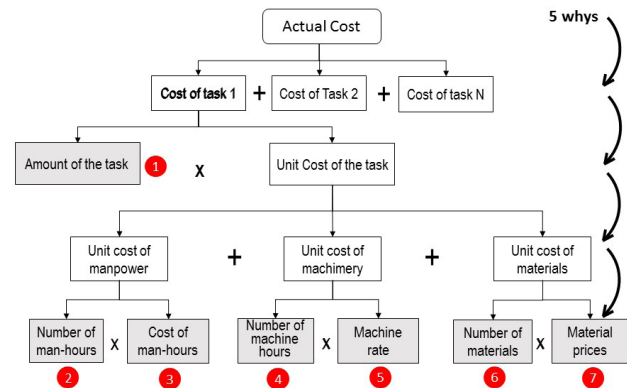


Fig. 4 Root Causes for the difference between Actual Cost and Earned Value.

From the information contained in this section, we can verify that if we want valuable feedback to complete the continuous improvement cycle, the Cost Performance Index (CPI), as shown in Fig. 3, must identify some Causes for Non-Compliance, so we know where to direct all corrective measures.

From these seven causes, three of them are very easy to obtain since they are market prices set for supplies. However, to obtain the remaining four causes, detailed field information is required. This is where our proposed ICT System contributes to Production Control.

5 Proposed Information Technology and System

Our proposal focuses on production improvement: The first issue is to improve the quality of poor communication and information between the management, professional and technical staff, and the productive entity by building a bridge that efficiently completes the feedback-based improvement cycle.

The proposed information collection is described below:

5.1 Defining the Baseline

Before starting the construction work, it is necessary to define the baseline that production control and tracking will be compared to. This baseline is made up of construction time, cost and scope; therefore, information about work budget, activities schedule and technical specifications must be previously entered in the system.

5.2 Collecting Information about the Use of Labour and Equipment

The main proposal of our system focuses on breaking the deep-seated paradigm, especially in the construction sector, which is managing works according to Theory X. Whereas this theory considers that the workers cannot control themselves, cannot be motivated, and just work for money (Ouchi, 1982), our system supports Theory Z, proposed by William Ouchi, an intermediate point between McGregor's Theory X and Theory Y [21]. This considers that workers are motivated not only by money but also by new challenges and the trust their company may place in them.

By delegating the responsibility for information to the source of production, i.e. the workers themselves, a permanent control is available, not over discretionary samples, but over 100% of the activities and 100% of the resources. Therefore, at lunch time and the end of their shifts, workers go to the registration site, identify themselves using a biometric face reader (Fig. 5a), and make a self-report about the time destined to each activity (Fig. 5b) using touch screens.

The Web application developed for this operation was designed to be user-friendly, so it does not pose any obstacle for workers to execute this action. The identification of activities shows images to help them easily identify the activities performed, while the display of images on the screen is automatically filtered according to the worker's profile after his identification. This requires less effort, and it is easier for workers to draw up self-reports about the time spent on each activity.



Fig. 5 (a) Worker Identification and self-report;
(b) Worker self-report on a touch screen.

Before entering the worksite, new workers watch a 30-minute training video that easily and readily explains the information system, the importance of this system for the company, and how they are expected to participate. Every new worker must watch this video and take a short guided test on self-reporting. Additionally, workers who have operated equipment or machinery must also make a report, in a similar manner, about how long they have been operating them.

5.3 Collecting Information about the Use of Materials

All material that enters the work site must be registered in the warehouse. For this task, the warehouse keeper can access the system to register it on the Web directly, also recording the quantity received and unit cost. Then, when these materials are required to be used, he must also record their exit, showing the quantity and destination record.

5.4 Collecting Information about the Amount Work Progress

Due to the nature of production in construction, the amount of work progress is recorded on site, going around the work-site registering information in different places where tasks have been carried out. This information is collected by a person in charge at the end of the workday using a digital tablet (Fig. 6a). This procedure helps save time normally spent transferring the collected data—generally on paper—to a control system, which in most cases is done in an electronic spreadsheet. To avoid the lack of Wi-Fi connection on the worksite, where we record the work progress, becoming an issue, an application for mobile devices with a store-and-forward feature is used. This allows information to be temporarily stored in the device (Fig. 6b) and then automatically uploaded to the Web as soon as a Wi-Fi connection is available.

5.5 The 7 Groups of CPI Indicators

Based on the data collected on site; when the cost of a task considerably differs from the baseline, we can ask the system to show the seven groups of indicators for the task at hand, which will consequently guide us to find the root causes for the cost difference. We say, a group of indicators because each one of them will have more than one indicator. They will have as many indicators as there are supplies in each task. For example, for the Groups related to Materials, there will be one indicator for each material; for the Workforce, one for each worker category; and for the Machine, one per each machine used for the task.

Figure 7 outlines the seven groups of indicators for the task we want to analyse. The difference between the actual cost of a task and its planned cost may be due to a combination of effects, which can be demonstrated and analysed in their corresponding indicators.

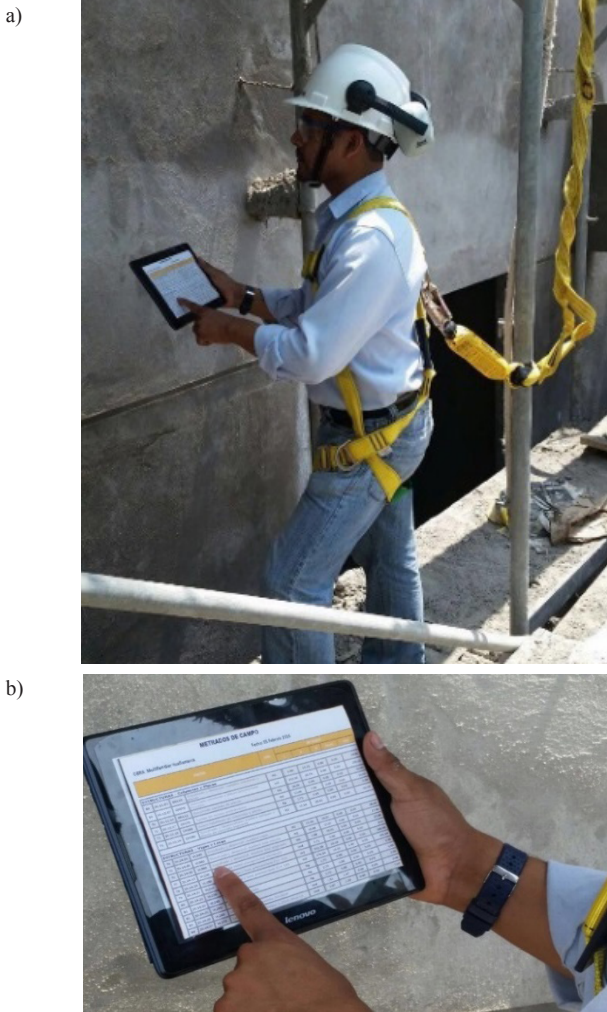


Fig. 6 (a) On-site work progress registration;
(b) Use of digital tablets and store-and-forward.

	PLANNED		ACTUAL		GROUP OF INDICATORS	
	A ₁		A ₂		I ₁ = A ₂ /A ₁	
AMOUNT OF TASK	Amount	Price	Amount	Price	Amount	Price
MAN-HOURS	A ₃	P ₁	A ₆	P ₄	I ₂ = A ₆ /A ₃	I ₃ = P ₄ /P ₁
MACHINE HOURS	A ₄	P ₂	A ₇	P ₅	I ₄ = A ₇ /A ₄	I ₅ = P ₅ /P ₂
MATERIALS	A ₅	P ₃	A ₈	P ₆	I ₆ = A ₈ /A ₅	I ₇ = P ₆ /P ₃

Fig. 7 The seven groups of CPI Indicators for an analysis task.

5.6 Production Reports

Once the system has all the daily production information uploaded to the Web, several reports will be available to track, control and provide a quite clear idea of the global labour productivity at any given time. The different reports can be accessed at any stage of the works with a one day delay. The performance diagnosis can be obtained within the periods matching the dates when the work progress was recorded, thus

reaching a 100% control of the works without incurring excessive control staff expenses, since the system is practically run by the workers themselves.

By reviewing each user profile, different stakeholders can access varied reports according to their needs. For instance, crew leaders and the foreman can check their staff performance; contractors can track their staff if they also participate in this system; warehouse keepers can check all incoming and outgoing materials as well as valued stock; administrative offices can get updated information on staff assistance to calculate payrolls; professionals involved in the works can check the details concerning schedule, costs and performance of each task; and management can check production ratios, actual results, and forecasts for the end of the works.

Figure 8 shows the traditional information flow corresponding to production in construction works, while Figure 9 shows the same flow with the system we propose if implemented. The benefit obtained can be clearly seen, by simplifying the collection, transfer, storage, processing, distribution and communication of data for the stakeholders.

6 Contribution of the System for Continuous Improvement

Feedback in construction works is managed late with approximate figures, isolated samples, and not very trustworthy information, which prevents us from implementing a continuous improvement cycle in an effective manner. Thanks to this system, information is continuous and permanent, and since the control of the activities executed is carried out with the same accuracy as the control of the activities planned, very efficient feedback is received the day after the execution of the works. Additionally, this system shows the root causes behind why the executed activities failed to meet the planned goals and allow corrective measures, learning from problematic issues, modifying of processes, and proposes innovations.

Having this Web-based system makes it possible to share information with all the stakeholders, thus providing feedback in every direction, promoting proposals of continuous improvement supported through collaborative teamwork. An important aspect is that management should be involved. Normally, due to restrictions on time, distance, access, or poor communication, management loses its connection with on-site problems, i.e. it does not get involved or support the continuous improvement programmes for the projects. Conversely, the workers are now contributing to the system in a significant way, making them important agents for project development.

This constant feedback allows us to evaluate innovations since we can compare the new results with the ones obtained before the implementation, and now have a historical data bank for the company, enabling improved planning of future projects.

7 Conclusions

CPI shows how different the Actual Cost is from the Earned Value, but after analysing the root cause of the Actual Cost and applying the 5 Whys Technique, the seven causes behind this difference can be identified. Getting information on three of them is easy because they are market prices; however, for the other four, an information and communication system as the one proposed in this paper is necessary. In this way, the seven performance indicators for each advanced task are identified and the reasons for changes in the Actual Cost compared to the Planned Cost are known in detail.

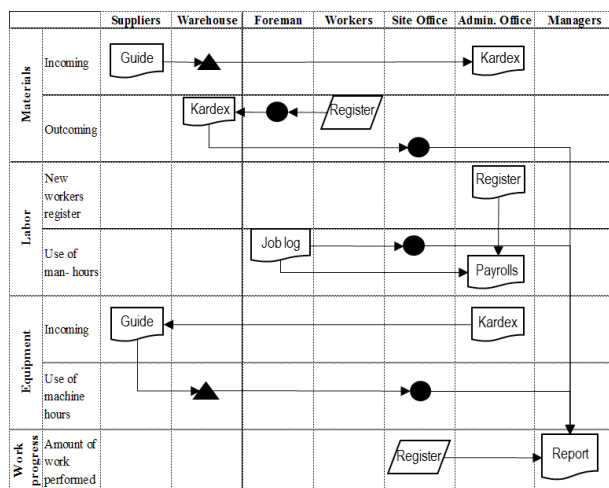


Fig. 8 Traditional production information flow.

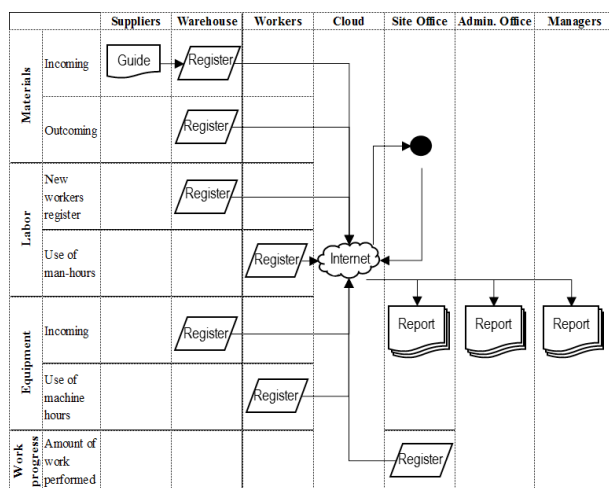


Fig. 9 Production information flow with the proposed system.

The system proposed is based on three main points: 1). Transfer the task to obtain most of the production information to the workers. 2). Use Web applications to promote collaborative work to enter data and distribute shared information. 3). Use electronic devices to make data collection easier.

The first point—considered crucial and questionable—has been a successful daily practice in all the works our company has been carrying out for many years. The second point also shows the same scenario since we already have an intranet containing a module with the presented proposal that is thoroughly

approved by all the stakeholders. On the other hand, the third point is an innovation in the pilot stage, which we intend to use to complete the missing link to create an efficient Continuous Improvement Cycle application for the construction sector.

References

- Abuelmaatti, A., Ahmed, V. (2014). Collaborative Technologies for Small and Medium Sized Architecture, Engineering and Construction Enterprises: Implementation Survey. *Journal of Information Technology in Construction*. 19, pp. 210-224.
- Alaghbandrad, A., Asnaashari, E., Preece, C. (2012). Problems and Barriers of ICT Utilization on Iranian Construction Sites: Case Study on the Successful Use of ICT in Remote Construction Sites. *Journal of Information Technology in Construction*. 17, pp. 93-102.
- Anon. (2016). Autodesk – BIM 360 Field, Overview, 2013. [Online]. Available from: <http://www.autodesk.com/products/bim-360-field/overview> [Accessed: 14 July 2016]
- Bowden, S. (2002). The Appropriate Use of IT on a Construction Site. Loughborough University, 2002.
- Bowden, S. L., Dorr, A., Thorpe, A., Anumba, C. J. (2004). Mapping site processes for the introduction of mobile IT. In: Proceedings of the 5th European conference on product and process modeling in the building and construction industry, Istanbul, Turkey, Sep 8-10, 2004. (Dikbas, A., Scherer, R. (eds.)), pp. 491-499. <https://doi.org/10.1201/9780203023426.pt7>
- Dave, B., Boddy, S., Koskela, L. (2010). Improving Information Flow within the Production Management System with Web Services. In: 18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Haifa, Israel, Jul 14-16, 2010. (Walsh, K., Alvarez, T. (eds.)), pp. 445-455.
- Dave, B., Koskela, L., Kagioglou, M., Bertelsen, S. (2008). A Critical Look at Integrating People, Process and Information Systems Within the Construction Sector. In: 16th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Manchester, 2008. (Tzortzopoulos, P., Kagioglou, M., (eds.)).
- Howard, R., Kiviniemi, A., Samuelson, O. (1998). Surveys of IT in the Construction Industry and Experience of the IT Barometer in Scandinavia. *Journal of Information Technology in Construction*. 3, pp. 45-56.
- Ibem, E. O., Laryea, S. (2015). E-Procurement Use in the South African Construction Industry. *Journal of Information Technology in Construction*. 20, pp. 364-384.
- Imai M., M. (1986). *KAIZEN: The key to Japan's Competitive Success*. 259 p. Random House Business Division, New York. 1986.
- Liker, J. K. (2013). *The Toyota Way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. 2nd Edition, McGraw-Hill, New York. 2013.
- Marchesan, P. R. C., Formoso, T. (2001). Cost Management and Production Control for Construction Companies. In: 9th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Singapore, 2001. (Ballard, G., Chua, D. (eds.)).
- McGregor, D. (1960). *The Human Side of Enterprise*. McGraw Hill, New York.
- Michaloski, A. O., Costa, A. P. C. S. (2010). A survey of IT use by small and medium-sized construction companies in a city in Brazil. *Journal of Information Technology in Construction*. 15, pp. 369-390.
- Navon, R., Sacks, R. (2007). Assessing research issues in Automated Project Performance Control (APPC). *Automation in Construction*. 16(4), pp. 474-484. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.08.001>
- Ouchi, W. (1982). *Theory Z*. Avon, New York. 1982.

- Serpell, A. (2002). *Administración de Operaciones de Construcción*. 296 p. Alfaomega, México D.F., 2002. (in Spanish)
- Tas, E., Irlayici, F. P. (2007). A survey of the use of IT in building product information acquisition in Turkey. *Journal of Information Technology in Construction*. 12, pp. 323-335.
- Tatari, O., Castro-Lacouture, D., Skibniewski, M. J. (2007). Current state of construction enterprise information systems: survey research. *Construction Innovation*. 7(4), pp. 310-319.
<https://doi.org/10.1108/14714170710780075>
- Walton, M. (1988). *The Deming Management Method*. 262 p. Penguin, New York.

TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN: UNA PROPUESTA PARA EL CONTROL DE PRODUCCIÓN (*)

Pablo Orihuela^{1,2}, Jorge Orihuela¹, Santiago Pacheco¹

(*) Traducción de la versión original en inglés. Disponible en: <https://pp.bme.hu/ar/article/view/10385/7279>

Para mejorar la retroalimentación del Índice de Performance del Costo (CPI), es necesario identificar las razones por las que el Costo Actual (AC) difiere del Costo Planeado (PC). En la actualidad, esta información es recolectada y transferida de manera oral, en papel, por teléfono o por correo electrónico. Este artículo propone tecnologías de la información y comunicación que cargan la información a una Intranet usando dispositivos móviles y aplicaciones móviles, fomentando la participación de los trabajadores y otros involucrados. Esta propuesta busca contribuir a la mejora de la calidad de la información en el Control de la Producción.

PALABRAS CLAVE

automation; information systems in construction; ICT in construction; production control; earned value management

INTRODUCCIÓN

Si queremos hablar de mejoramiento, ya sea de empresas o negocios de cualquier rubro, necesariamente caemos bajo la sombra del Kaizen o el Mejoramiento Continuo, el cual propone poner en práctica el Ciclo de Shewhart, más conocido en el Japón como el ciclo de Deming, porque fue el Dr. Deming quien lo dio a conocer, o como el Ciclo del PHEA (Planificar – Hacer – Evaluar – Actuar) (Walton, 1988; Imai M., 1986; Liker, 2013).

En el rubro de la construcción civil, la aplicación de este ciclo consiste en: el planeamiento de la obra, la ejecución, la evaluación y la toma de acciones con miras al mejoramiento; sin embargo, en la práctica el tercer paso, el referente a la evaluación, no se cumple satisfactoriamente. En gran medida, esto se debe a que la información acerca del uso de los recursos de la obra no es confiable o no está disponible en el momento en que es necesaria (Dave et al., 2010).

El presente artículo propone un sistema de información y comunicación para capturar los datos directamente desde el sitio de trabajo y procesarlos vía web, con lo cual podremos evaluar y controlar una obra de construcción en forma continua, en la totalidad de sus actividades y con un acceso desde cualquier lugar donde nos encontremos. Este sistema ya ha sido patentado por los autores varios años atrás con excelentes resultados, pero lo que se está cambiando en esta nueva propuesta es la

¹ Motiva S.A., Lima, Perú, Teléfono: 0051 2211093

² Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

incorporación de tecnología para automatizar tanto la toma de información como su procesamiento. Dicho sistema captura la información de los tres recursos de la producción a través de dispositivos electrónicos, y los procesa mediante un software en línea disponible en una aplicación web.

El recurso Mano de Obra, es reportado mediante pantallas táctiles, por los propios obreros al finalizar la mañana y al finalizar la tarde de cada jornada de trabajo; el consumo de los Materiales, es registrado en línea mediante su salida del almacén y posterior uso; la utilización de los Equipos, al igual que la mano de obra, es controlada por los propios operadores y, finalmente, las cantidades de trabajo ejecutado son reportadas diariamente desde el lugar de su ejecución, en línea y mediante tabletas digitales usando aplicaciones del tipo store and forward.

LA GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN OBRAS DE CONSTRUCCIÓN

La calidad de información de la producción en las obras de construcción no es acorde con los tiempos actuales; en la práctica, muchas veces la información precisa sólo existe al finalizar la obra mediante un estado financiero de ganancias y pérdidas ya consumado. Además de ser tardía, la información entregada por los sistemas tradicionales de control está muy agrupada para ser útil en la toma de decisiones de planeamiento y control (Marchesan and Formoso, 2001; Navon and Sacks, 2007).

En las últimas dos décadas, la industria de la construcción ha mostrado grandes avances en el uso de TICs a nivel mundial, incluso en empresas medianas y pequeñas (Howard et al., 1998; Tas and Irlayici, 2007; Michaloski and Cabral, 2010; Alaghbandrad et al., 2011; Abuelmaatti et al., 2014; Ibem and Laryea, 2015). Sin embargo, como concluyen Dave et al (2008) a partir del trabajo realizado por Tartari et al (2007), la “mayoría de las TICs dentro de la industria de la construcción son aplicadas en los procesos periféricos” y “la gestión de obra y otras actividades relacionadas a la construcción han permanecido casi sin cambios” Adicionalmente, el 90% de los gastos en TICs son incurridos en la oficina técnica de obra o en la oficina principal y solo el 10% corresponde a gastos en TICs para su uso campo (Anon, 2016).

Esto concuerda con los estudios de Bowden (Bowden, 2002; Bowden et al., 2004), que presentan la existencia de 85 tareas que usan papel realizadas en obra dentro del trabajo cotidiano. “Estas fueron agrupadas en diferentes tipos de documentos, mostrando las tareas más comúnmente identificadas como completar formatos de recolección de datos (25%), atender la correspondencia (18%), ver y revisar dibujos (13%) y leer y escribir especificaciones (6%)”.

De la investigación realizada en Reino Unido por Chen y Kamara (2008), se puede concluir que la recolección de información necesaria para el control de producción (materiales, mano de obra, equipo y avance) se hace en un 65% usando formatos en papel, en un 28% en la memoria de quien recoge la información, y sólo en un 7% a través de dispositivos móviles, como se puede observar en la Figura 1. Asimismo, como se observa en la Figura 2, la transferencia de esta información

recolectada se realiza principalmente cara a cara (42%), por email (31%) y por teléfono (20%) y solo en un 7% por medio de una intranet o extranet (Chen y Kamara, 2008).

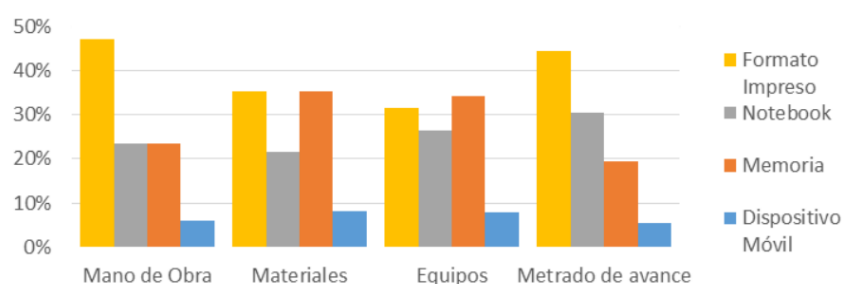


Figura 1. Métodos de toma de información de la producción.

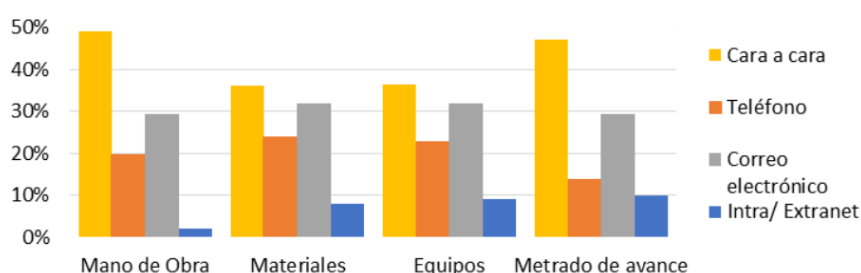


Figura 2. Métodos de transferencia de información de la producción.

Los resultados presentados reflejan la manera ineficiente en la cual la información de la producción es manejada en la obra y la existencia de grandes oportunidades de mejora. El Sistema y Tecnología de Información propuestos en este artículo reducen a cero el llenado de formatos de recolección de datos en el proceso de obtención de información acerca del uso de los recursos de producción. Adicionalmente, esta información es ingresada directamente a una aplicación web, por lo que no requiere un proceso adicional de transferencia de información.

LA MEJORA CONTINUA EN EL CONTROL DE LA PRODUCCIÓN

El control de la producción debe hacerse dentro del marco de la mejora continua. Si el control nos indica que estamos haciendo algo mal, es necesario saber qué es lo que se está haciendo mal para poder mejorarlo. De igual manera, si estamos teniendo buenos resultados, es necesario saber qué los está ocasionando para estandarizar la práctica. Por ello, el control dentro de la etapa Revisar del ciclo PHRA debe darnos la información suficiente para identificar por qué se obtuvieron los mismos y poder actuar, cerrando así el ciclo.

Para efectuar esta mejora continua en el Control de Producción, el Lean Construction Institute propone el uso del Last Planner System®. Para la primera fase (Planificar), ellos proponen la secuencia de la Planificación Maestra, la Planificación por fases, el Look-Ahead y la Planificación Semanal (ver Figura 3a). Luego de que el Plan Semanal ha sido ejecutado (Hacer), se deben verificar (Evaluar) el Porcentaje de Planificación Cumplida (PPC) y las Razones de no Cumplimiento (RNC), de tal manera

que se complete el proceso de aprendizaje. Sin embargo, estos indicadores nos informan acerca de eficiencia de la programación, pero no acerca del costo.

Por otro lado, para esta mejora continua, el Project Management Institute, a través de la Guía del PMBOK, propone la Técnica del Valor Ganado (ver Figura 3b), para lo cual primero debemos estimar el Valor Planeado (Planificar); luego, al terminar cualquier periodo de control debemos calcular el Valor Ganado y el Costo Actual (Hacer); después con estos tres valores debemos calcular (Evaluar) el Índice de Desempeño del Costo (CPI) y el Índice de Desempeño del Cronograma (SPI) y así actuar donde corresponda. Sin embargo, estos indicadores son muy generales por lo que creemos que, al igual que el PPC, el CPI deberían tener unas RNC.

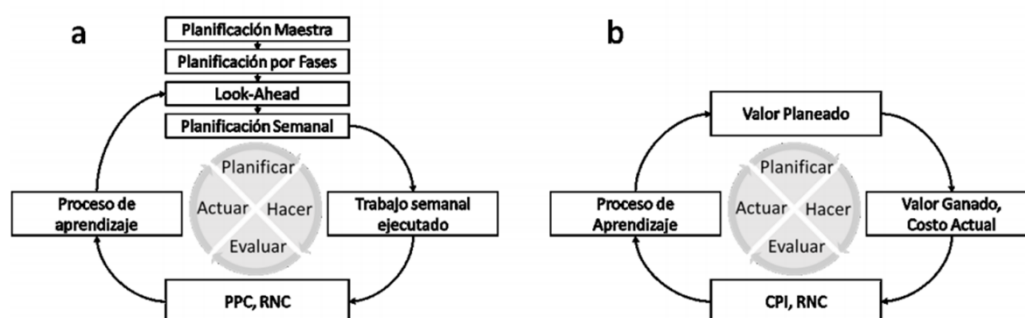


Figura 3. (a) El Last Planner System® y la Mejora Continua; (b) El Valor Ganado y la Mejora Continua

Para ello es necesario hacer un Análisis de Causa Raíz del Valor Actual y aplicar la Técnica de los 5 ¿Por qué?, con lo cual obtendremos un Diagrama de Árbol como el mostrado en la Figura 4, donde podemos ver las 7 causas raíz que pueden hacer que el Valor Actual difiera del Valor Ganando.

LOS 7 GRUPOS DE CAUSAS DEL NO CUMPLIMIENTO DEL COSTO ACTUAL

La productividad en la construcción es un problema complejo debido al número de variables involucradas. Por ello, es importante conocer qué factores afectan negativa o positivamente las tareas ejecutadas para mejorarla (Mc Gregor, 1960). En este contexto es crucial identificar las causas y las fuentes de variación respecto al costo planeado de las actividades realizadas para completar el ciclo de mejora continua e iniciar la etapa de retroalimentación.

La Figura 4, también esquematiza cómo el Costo Actual de un proyecto, sale del resultado del estado de ganancias y pérdidas de todas sus tareas y cómo éste puede diferir del Valor Ganado debido a 7 grupos de causas raíz, partiendo del supuesto que la línea base es la correcta:

Causa N°1: Diferencia en la cantidad de trabajo prevista en cada tarea, lo que se origina por errores en las cuantificaciones hechas sobre los planos, durante la fase de planificación. Aquí la retroalimentación es para los planificadores.

Causa N°2: Diferencia en la cantidad de horas hombre empleadas, se origina por una mayor o menor productividad de la mano de obra, la que a su vez puede tener varias

causas como falta de cancha, información oportuna, aspectos de seguridad, disponibilidad de equipos, herramientas y materiales, niveles de motivación, etc.

Causa N°3: Diferencia en la cantidad horas máquina usadas, esta puede ser consecuencia tanto de la productividad de la mano de obra, como de la performance de la propia maquinaria usada.

Causa N°4: Diferencia en la cantidad de materiales utilizados, esta se puede deber a desperdicios fuera de los rangos típicos, a sobre dosificaciones, a sobre dimensionamientos, a trabajos rehechos, etc.

Causas N°5, N°6 y N°7: Diferencias de precio en la mano de obra, equipos o materiales, las cuales obedecen más a razones de mercado y se encuentran principalmente bajo la gestión del abastecimiento.

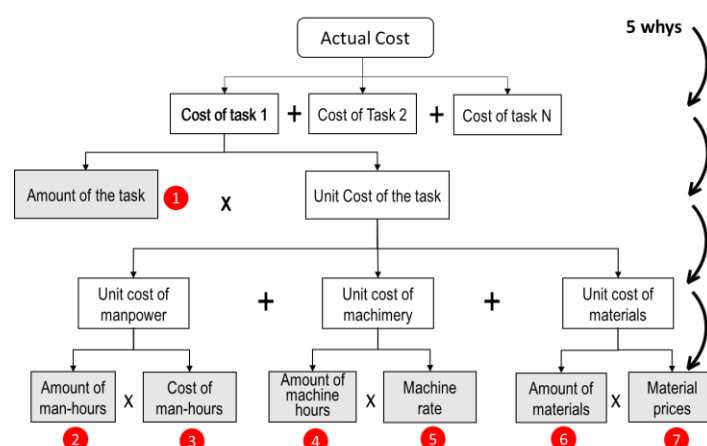


Fig. 4. Root Causes for the difference between Actual Cost and Earned Value.

De lo expuesto en este acápite podemos ver que si queremos tener una retroalimentación eficaz para cumplir con el ciclo de mejora continua, el Cost Performance Index CPI, tal como lo muestra la Figura 3, tendría que tener unas Razones de No Cumplimiento, de tal manera de saber a dónde dirigir las acciones de mejora.

De estas 7 causas, 3 de ellas son muy fáciles de obtener, ya que corresponden a precios de Mercado de los insumos. Sin embargo, para obtener las 4 causas restantes, se requiere información detallada de campo. Ahí es donde nuestro sistema de TICs contribuye al Control de la Producción.

EL SISTEMA Y TECNOLOGÍA DE INFORMACIÓN PROPUESTOS

Nuestra propuesta se enfoca en la mejora de la producción, resolviendo en primer lugar la mala calidad de la comunicación e información entre la gerencia, el personal profesional y técnico de la obra y el ente productivo, tendiendo para esto un puente que complete eficientemente el ciclo del mejoramiento basado en la retroalimentación. A continuación, se describe la toma de información propuesta:

INGRESO DE LA LÍNEA BASE

Antes del inicio de obra, se debe ingresar la línea base contra la cual se va a efectuar el seguimiento y control de la producción. Esta línea base está compuesta por

el Tiempo, Costo y Alcances del proyecto de construcción, por lo tanto el sistema debe ser previamente alimentado con el presupuesto de obra, la programación de actividades y las especificaciones técnicas.

CAPTURA DE LA INFORMACIÓN RESPECTO AL USO DE LA MANO DE OBRA Y EL USO DE LOS EQUIPOS

La propuesta central de nuestro sistema se basa en romper un paradigma muy arraigado, sobre todo en el sector construcción, que es administrar la obra basándose en la Teoría X, la cual considera que los trabajadores no son capaces de autocontrolarse, no son motivables y sólo trabajan por dinero (Ouchi, 1982). En cambio, el sistema apuesta por la Teoría Z, propuesta por William Ouchi e intermedia entre la Teoría X y la Teoría Y ambas de Mac Gregor (1960), la cual considera que a los trabajadores, además del dinero, también les motivan los nuevos retos y la confianza que la empresa pueda depositar en ellos.

Al delegar la responsabilidad de la información a la misma fuente de producción, es decir a los propios obreros, se dispone de un control continuo, no sobre muestras discrecionales y sobre el 100% de las partidas y el 100% de los recursos. Para ello, los obreros, a la hora del almuerzo y al salir del trabajo, se acercan al lugar de registro, se identifican con un lector biométrico de rostro (Figura 5a) y, mediante una pantalla táctil, efectúan un auto-reporte del tiempo que han destinado a cada actividad (Figura 5b).

La aplicación web desarrollada para esta operación ha sido diseñada de una manera muy simple y amigable, de tal manera que los obreros no tengan ninguna barrera que dificulte esta acción. La identificación de las actividades cuenta con imágenes que los ayudan rápida y fácilmente a identificar las labores realizadas y el despliegue de estas imágenes en la pantalla es automáticamente filtrado de acuerdo al perfil del obrero luego de su identificación, esto permite un menor esfuerzo y comodidad para el auto-reporte de los tiempos usados en cada actividad.



Figura 5. (a) Identificación del obrero y autoreporte; (b) Autoreporte del obrero mediante una pantalla táctil

Los nuevos obreros, antes de ingresar a la obra, reciben una capacitación con el apoyo de un video de 30 minutos de duración, en el cual se les explica de una forma muy simple y amigable en que consiste el sistema de información, la importancia que este tiene para la empresa y cómo es que ellos tienen que participar. Todo obrero nuevo,

obligatoriamente tiene que ver este video y hacer una pequeña práctica asistida del auto-reporte. Adicionalmente, los obreros que han operado equipos o maquinaria deben de reportar también, de una manera similar, el tiempo que han estado operándolos.

CAPTURA DE LA INFORMACIÓN RESPECTO AL USO DE LOS MATERIALES

Todo material que ingresa a la obra, debe ser registrado en el almacén, para esta tarea el almacenero dispone de un acceso al sistema que le permite registrarlo directamente en la web, consignando además la cantidad recibida y el costo unitario. Luego, cuando estos materiales sean solicitados para ser usados, deberán también ser registrados, indicando la cantidad y la partida de destino.

CAPTURA DE LA INFORMACIÓN DE LAS CANTIDADES DE TRABAJO REALIZADAS

Por la naturaleza de la producción en la construcción, las cantidades de trabajo realizado se toman en el sitio, recorriendo la obra y registrando la información en las distintas ubicaciones en las que se haya ejecutado una tarea. Esta información es capturada por un encargado al final de la jornada mediante el uso de una tableta digital (Figura 6a). Esto evita el re-trabajo de transferir la información tomada, generalmente en un papel, a un sistema de control, que en la mayoría de los casos se hace en una hoja de cálculo electrónica.

Para evitar que la falta de WiFi en la zona de la obra en la que se toma el avance sea una restricción, se emplea una aplicación para dispositivos móviles que usa “Store and Forward”, lo que permite que la información sea almacenada temporalmente en el dispositivo móvil (Figura 6b), para ser subida a la web en forma automática en el momento que haya disponibilidad de WiFi.



Figura 6. (a) Registro de las cantidades de trabajo en el sitio; (b) Uso de tabletas digitales y formatos Store and Forward

LOS 7 GRUPOS DE INDICADORES DEL CPI

Basados en la data recolectada en obra, cuando el costo de una partida difiere considerablemente de la línea base, podemos pedirle al sistema que muestre los siete grupos de indicadores para la partida de forma inmediata, lo que nos guiará a encontrar las causas raíz de la diferencia de costo. Decimos grupo de indicadores porque cada uno de estos tendrá más de un indicador. Habrá tantos indicadores como número de insumos tenga la partida. Por ejemplo, para el grupo de Materiales, habrá un indicador

por cada material; para la Mano de Obra, uno para cada categoría; y para equipos, uno por cada equipo utilizado para la partida.

La Figura 7 presenta los siete grupos de indicadores para la partida que queramos analizar. La diferencia entre el Costo Actual (AC) de la partida y el Costo Planeado (PC) para la misma puede darse por una combinación de efectos, que pueden ser demostrados y analizados con sus indicadores correspondientes.

	PLANEADO		ACTUAL		GRUPO DE INDICADORES	
METRADO	M_1		M_2		$I_1 = M_2/M_1$	
	Cantidad	Precio	Cantidad	Precio	Cantidad	Precio
HORAS HOMBRE	C_1	P_1	C_4	P_4	$I_2 = C_4/C_1$	$I_3 = P_4/P_1$
HORAS MÁQUINA	C_2	P_2	C_5	P_5	$I_4 = C_5/C_2$	$I_5 = P_5/P_2$
MATERIALES	C_3	P_3	C_6	P_6	$I_6 = C_6/C_3$	$I_7 = P_6/P_3$

Figura 7. Flujo tradicional de información de la producción.

INFORMES DE PRODUCCIÓN

Una vez que el sistema tiene en la web toda esta información diaria de la producción, se dispone de muchos reportes que nos permiten hacer el seguimiento y control y tener una idea bastante precisa sobre la productividad global de la obra en cualquier momento. Los diferentes reportes se pueden obtener dentro de cualquier período de la obra con la precisión de un día y el diagnóstico de aportes y rendimientos puede obtenerse dentro de los períodos que coincidan con las fechas en las que se han reportado las cantidades de trabajo, obteniéndose un control del 100% de la obra sin ocasionar gastos exagerados en personal de control ya que el sistema es operado prácticamente por los propios trabajadores.

Con el debido control de cada perfil de usuarios, los diferentes involucrados pueden tener acceso a diversos reportes de acuerdo a sus necesidades, por ejemplo, los jefes de cuadrilla y el maestro de obra pueden conocer los rendimientos del personal a su cargo, los contratistas pueden controlar a su personal si estos se acoplan al sistema, el almacenero puede obtener el ingreso, salida y stock valorizado de materiales, la administración puede acceder a la asistencia diaria del personal para el cálculo de las planillas, los profesionales de la obra pueden controlar al detalle los plazos, los costos y los rendimientos de cada una de las partidas o la gerencia puede conocer los ratios de producción, los resultados de lo realizado y los resultados proyectados al término de la obra.

La Figura 8 muestra el flujo tradicional de la información de la producción en una obra de construcción y la Figura 9 muestra este mismo flujo con el sistema propuesto. Se puede observar claramente el beneficio obtenido en la simplificación de la captura, traspaso, almacenamiento, procesamiento, distribución y comunicación de la información entre todos los involucrados.

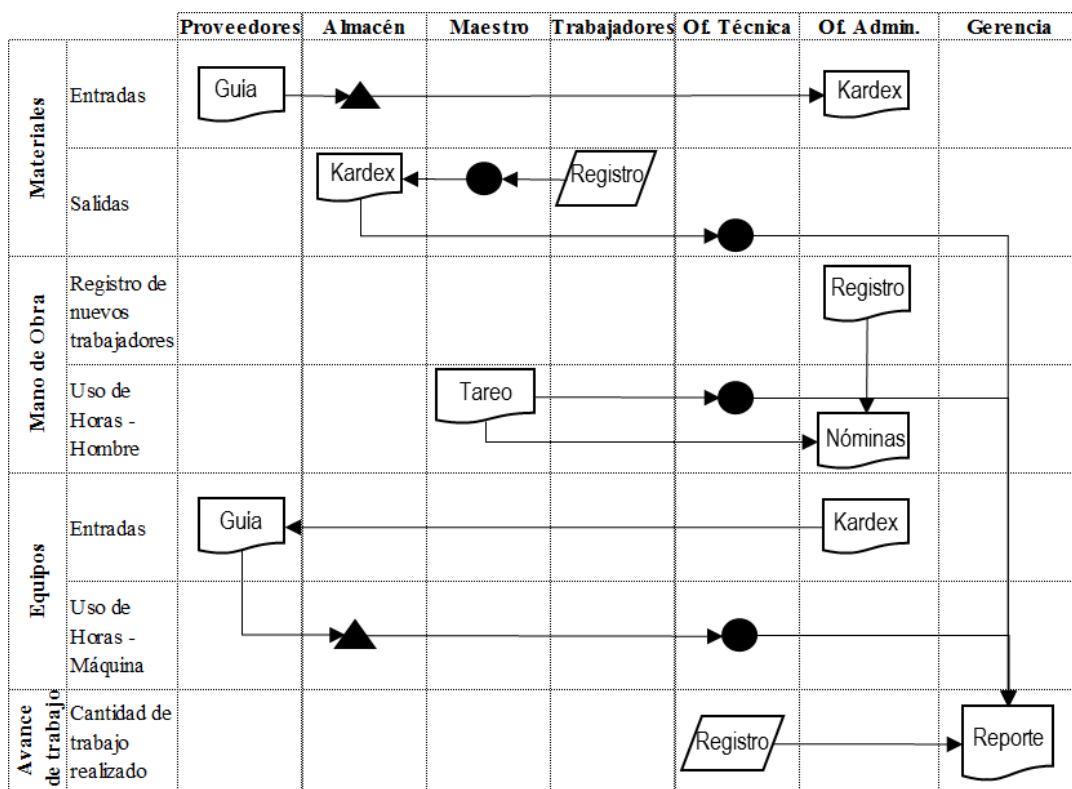


Figura 8. Flujo tradicional de información de la producción.

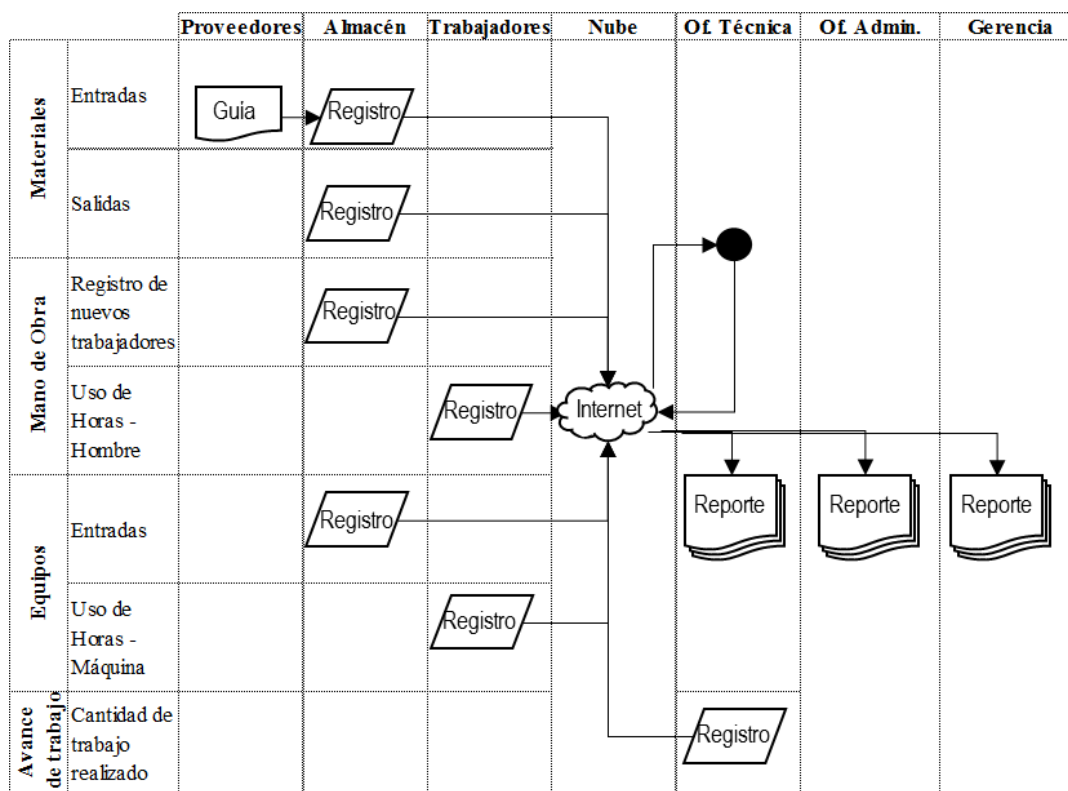


Figura 9. Flujo de información de la producción con el sistema propuesto.

APORTES DEL SISTEMA PARA LA MEJORA CONTINUA

La retroalimentación en las obras de construcción se gestiona de manera aproximada, con muestreos aislados, en forma tardía y con información no muy confiable, lo que impide desplegar con eficiencia el ciclo de la mejora continua. Con el sistema propuesto, la información se vuelve permanente y continua, y como el control de lo ejecutado se efectúa con el mismo nivel de detalle de lo planificado, tenemos la posibilidad de obtener una retroalimentación muy eficiente al día siguiente de ejecutada cada una de las partidas presupuestadas. El sistema nos permite encontrar las causas raíz por las cuales lo ejecutado no cumple con lo planificado, para tomar acciones correctivas, sacar lecciones aprendidas, modificar procesos, plantear innovaciones, entre otros.

El tener el sistema en la web hace posible compartir la información con todos los involucrados, generando así la retroalimentación en diferentes direcciones, promoviendo propuestas de mejora continua hechas mediante el trabajo en equipo y en forma colaborativa. Un aspecto importante es que dentro de estos involucrados está la Gerencia, la que muchas veces por restricciones de distancias, tiempo, accesibilidad y falta de calidad en la comunicación pierde el acercamiento a los problemas de campo y con ello su involucramiento y apoyo a la mejora continua de los proyectos. Al otro lado están los obreros quienes ahora contribuyen de una manera significativa en el sistema, reivindicándolos como importantes actores en el desarrollo de un proyecto.

Esta constante retroalimentación permite también evaluar innovaciones ya que podemos comparar los nuevos resultados con los resultados antes de su implantación, así como disponer de un banco de datos histórico de la empresa que nos sirva para planificar futuros proyectos.

CONCLUSIONES

El CPI muestra cuan diferente es el Costo Actual (AC) del Valor Ganado (EV), pero luego de analizar la causa raíz del costo actual y aplicar la técnica de los 5 Porqués, las 7 causas de esta diferencia pueden ser identificadas. Tener información de 3 de ellas es fácil porque son precios de mercado; sin embargo, para las otras 4 se requiere un sistema de información y comunicación como el propuesto en este artículo. De esta forma, los 7 indicadores de desempeño para cada partida avanzada son identificados y las razones para la variación del Costo Actual (AC) respecto al Valor Ganado (EV) se conocen a detalle.

El sistema propuesto está basado en 3 puntos principales: 1). El traspaso de la tarea de obtener gran parte de la información de la producción a los propios trabajadores. 2). El uso de aplicaciones web que promueve el trabajo colaborativo en la entrada de los datos y la distribución compartida de la información. 3). El uso de dispositivos electrónicos que facilita la captura de dicha información.

El punto 1, que consideramos es el más neurálgico y cuestionable, ya es una práctica cotidiana y exitosa en todas las obras de nuestra empresa desde hace muchos

años atrás. Lo mismo sucede con el punto 2, ya que disponemos de una intranet que contiene un módulo con la propuesta presentada que es muy apreciada por todos los involucrados. El punto 3 sí es una innovación que está en una etapa piloto, con el cual pretendemos completar el eslabón faltante para una aplicación eficiente del Ciclo de Mejoramiento Continuo en el sector construcción.

BIBLIOGRAFÍA

- Abuelmaatti, A., Ahmed, V. (2014). Collaborative Technologies for Small and Medium Sized Architecture, Engineering and Construction Enterprises: Implementation Survey. *Journal of Information Technology in Construction*. 19, pp. 210-224.
- Alaghbandrad, A., Asnaashari, E., Preece, C. (2012). Problems and Barriers of ICT Utilization on Iranian Construction Sites: Case Study on the Successful Use of ICT in Remote Construction Sites. *Journal of Information Technology in Construction*. 17, pp. 93-102.
- Anon. (2016). Autodesk – BIM 360 Field, Overview, 2013. [Online]. Available from: <http://www.autodesk.com/products/bim-360-field/overview> [Accessed: 14 July 2016]
- Bowden, S. (2002). *The Appropriate Use of IT on a Construction Site*. Loughborough University, 2002.
- Bowden, S. L., Dorr, A., Thorpe, A., Anumba, C. J. (2004). Mapping site processes for the introduction of mobile IT. In: *Proceedings of the 5th European conference on product and process modeling in the building and construction industry*, Istanbul, Turkey, Sep 8-10, 2004. (Dikbas, A., Scherer, R. (eds.)), pp. 491-499. <https://doi.org/10.1201/9780203023426.pt7>
- Chen, Y., Kamara, J. (2008). The Mechanisms of Information Communication on Construction Sites. *Forum Ejournal*. 8, pp. 1-32.
- Dave, B., Boddy, S., Koskela, L. (2010). Improving Information Flow within the Production Management System with Web Services. In: *18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Haifa, Israel, Jul 14-16, 2010. (Walsh, K., Alvarez, T. (eds.)), pp. 445-455.
- Dave, B., Koskela, L., Kagioglou, M., Bertelsen, S. (2008). A Critical Look at Integrating People, Process and Information Systems Within the Construction Sector. In: *16th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Manchester, 2008. (Tzortzopoulos, P., Kagioglou, M., (eds.)).
- Howard, R., Kiviniemi, A., Samuelson, O. (1998). Surveys of IT in the Construction Industry and Experience of the IT Barometer in Scandinavia. *Journal of Information Technology in Construction*. 3, pp. 45-56.
- Ibem, E. O., Laryea, S. (2015). E-Procurement Use in the South African Construction Industry. *Journal of Information Technology in Construction*. 20, pp. 364-384.
- Imai M., M. (1986). *KAIZEN: The key to Japan's Competitive Success*. 259 p. Random House Business Division, New York. 1986.
- Liker, J. K. (2013). *The Toyota Way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. 2nd Edition, McGraw-Hill, New York. 2013.
- Marchesan, P. R. C., Formoso, T. (2001). Cost Management and Production Control for Construction Companies. In: *9th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Singapore, 2001. (Ballard, G., Chua, D. (eds.)).
- McGregor, D. (1960). *The Human Side of Enterprise*. McGraw Hill, New York.

- Michaloski, A. O., Costa, A. P. C. S. (2010). A survey of IT use by small and medium-sized construction companies in a city in Brazil. *Journal of Information Technology in Construction*. 15, pp. 369-390.
- Navon, R., Sacks, R. (2007). Assessing research issues in Automated Project Performance Control (APPC). *Automation in Construction*. 16(4), pp. 474-484. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.08.001>
- Ouchi, W. (1982). *Theory Z*. Avon, New York. 1982.
- Tas, E., Irlayici, F. P. (2007). A survey of the use of IT in building product information acquisition in Turkey. *Journal of Information Technology in Construction*. 12, pp. 323-335.
- Tatari, O., Castro-Lacouture, D., Skibniewski, M. J. (2007). Current state of construction enterprise information systems: survey research. *Construction Innovation*. 7(4), pp. 310-319. <https://doi.org/10.1108/14714170710780075>
- Walton, M. (1988). *The Deming Management Method*. 262 p. Penguin, New York.