

APLICACIÓN DE MÉTODOS PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN UN CASO INDUSTRIAL

Luis Barberá*, Adolfo Crespo*, Pablo Viveros**
y Christopher Nikulin***

*Universidad de Sevilla

**Universidad Técnica Federico Santa María (Chile)

***Politecnico di Milano (Italia)

1. INTRODUCCIÓN

En las plantas de tratamiento de madera con procesos de cogeneración energética, una de las calderas más utilizadas para quemar los residuos, astillas o pellets son las llamadas calderas de lecho fluidificado (*Fluidized Bed Combustion*, FBC). El lecho fluido de la caldera sostiene el combustible sólido suspendido mientras que el aire es bombeado hacia arriba durante la combustión. El resultado es la formación de remolinos que favorecen la mezcla de gas y de combustible dentro de la caldera.

El presente caso de estudio ha sido desarrollado en la planta de celulosa de la empresa *ARAUCO S.A.*, Trupan-Cholguan, ubicada en la VIII región en Chile. El proceso de funcionamiento de la caldera de lecho fluidificado de la planta se muestra en la Fig. 1. Los combustibles que se utilizan principalmente en el proceso son virutas de madera o pellets procedentes de la corteza de los árboles, procesadas en los astilleros de la planta. La entrega de suministro de combustible se realiza mediante cintas transportadoras y tuberías de aire. La combustión se controla mediante el uso de arena en el proceso, lo que permite mantener la temperatura estable y la presión requerida en la caldera. La basura adherente del propio combustible se elimina a través de un

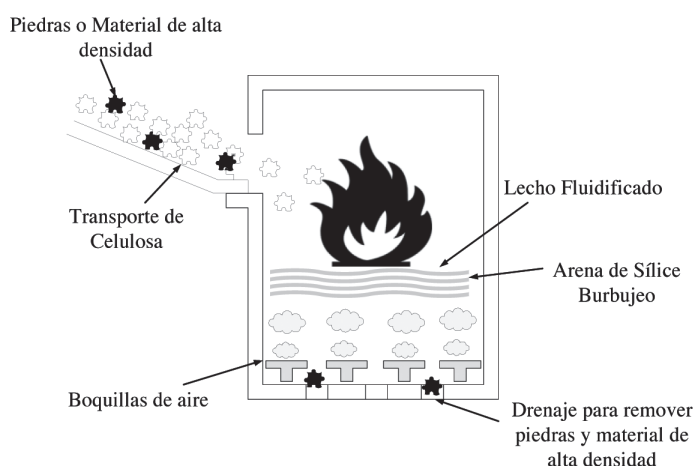


Fig. 1: Esquema funcional de la caldera de lecho fluidificado

drenaje que, debido a su alta densidad, caen a la base de la caldera de lecho fluidificado durante el proceso de combustión, en la zona donde se encuentran situadas las boquillas de aire que permiten que la arena se mantenga en movimiento dentro de la caldera.

2. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

El proceso de generación de energía por combustión de la planta debe llevarse a cabo de una manera óptima y continua. Eventualmente, la no disponibilidad de la caldera requiere el consumo de energía del Servicio Central Interconectado (SCI), produciendo un retardo de la producción e incluso limitar la operación normal de la planta. El objetivo propuesto ha sido la identificación de las diferentes causas del fallo de la caldera y la teoría de resolución de problemas de inventiva (TRIZ) se aplicó en el caso de estudio en complemento al análisis de fallos. Dicha metodología permitió la detección de causas, análisis y diseño de soluciones óptimas para acometer el problema.

2.1. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

2.1.1. Jerarquización de equipos

En el proceso de combustión estudiado, el componente crítico de fallo que ha sido identificado como el principal responsable de la falta de disponibilidad de la caldera corresponde a las boquillas. La obstrucción de las boquillas se considera un fallo crítico de alto impacto, debido a que una vez que se produce el fallo, los riesgos asociados a este son tanto económicos, operacionales como de seguridad de los propios operarios de planta. Por lo tanto, las causas de este suceso de fallo deben ser identificadas y analizadas para determinar las mejores soluciones que pueden implementarse.

2.1.2. Identificación de los modos de fallo

El modo de fallo es un evento único que causa un fallo funcional, lo que significa que es el evento que precede al fallo. Existen varios modos de fallo que pueden presentarse en una caldera afectando a su disponibilidad, sin embargo, la obstrucción de las boquillas de drenaje es el modo de fallo más catastrófico.

En la caldera bajo estudio, los informes de análisis del proceso indican la imposibilidad de eliminar todos los residuos de la reacción de combustión, debido a la presencia de piedras y otros elementos que, incluso si no participan en el proceso de combustión, se depositan en los tubos de drenaje y toberas de aire (obstrucción), haciendo necesario un mantenimiento adicional para corregir el problema. En el presente caso de estudio, el fenómeno denominado "*Obstrucción de boquillas de drenaje*" se identificó directamente como un modo de fallo crítico, de acuerdo con la experiencia de los operarios y un análisis previo del proceso.

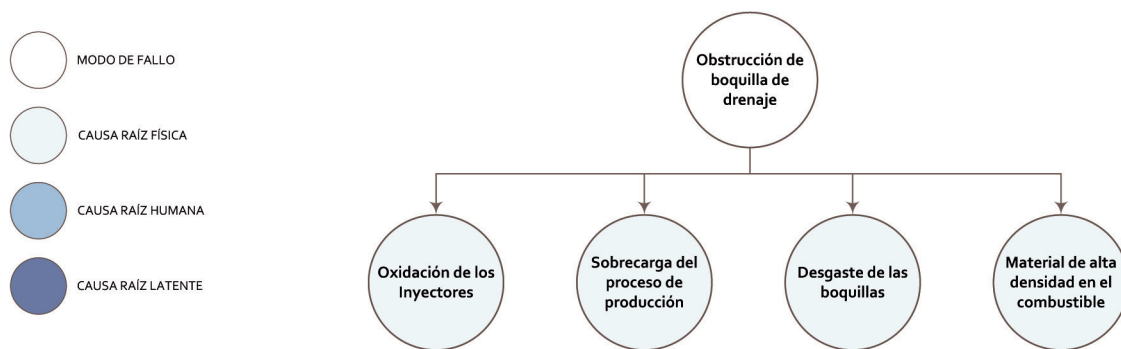


Fig. 2 y 3: Simbología del árbol lógico; Árbol lógico de los modos de fallo "Obstrucción de drenaje de boquillas" y causas raíces físicas, respectivamente

2.1.3. Identificación de las causas de fallo para controlar los modos de fallo

La herramienta utilizada para este caso fue el árbol lógico "PROACT", el cual es considerado como una metodología sistemática que se puede implementar tanto para eventos de alto impacto como para eventos de alta frecuencia, permitiendo la identificación no sólo de las causas físicas del fallo, sino también los errores humanos que pueden conducir a dichos fallos, así como a los problemas de la organización que explican la aparición de esos errores humanos. De esta manera se logran identificar tres tipos de causas: físicas, humanas y latentes/organizacionales. La siguiente nomenclatura se utilizará para diferenciarlos:

La implementación y análisis del Árbol Lógico, así como el conocimiento experto sobre el proceso, permite

identificar y discriminar las diferentes causas raíces del problema, identificando en el caso presentado que la entrada al proceso de «Materiales de alta densidad» (piedras y metales), fue la causa principal asignable, lo que generó como fenómeno (evidencia física) la obstrucción de las boquillas de drenaje. A su vez, de forma secundaria, la "Oxidación de boquillas" y "Sobrecarga de proceso productivo" fueron causas directas del problema identificado.

Para la correcta identificación de las causas raíces, un análisis de expertos fue necesario para justificar cada paso del proceso de análisis e identificación, teniendo siempre una base teórica y empírica. Por esta razón, la causa raíz principal es la presencia de rocas y otros elementos de alta densidad, introducidos en la caldera junto con el combustible, los que se precipitan en el fondo de la caldera generan

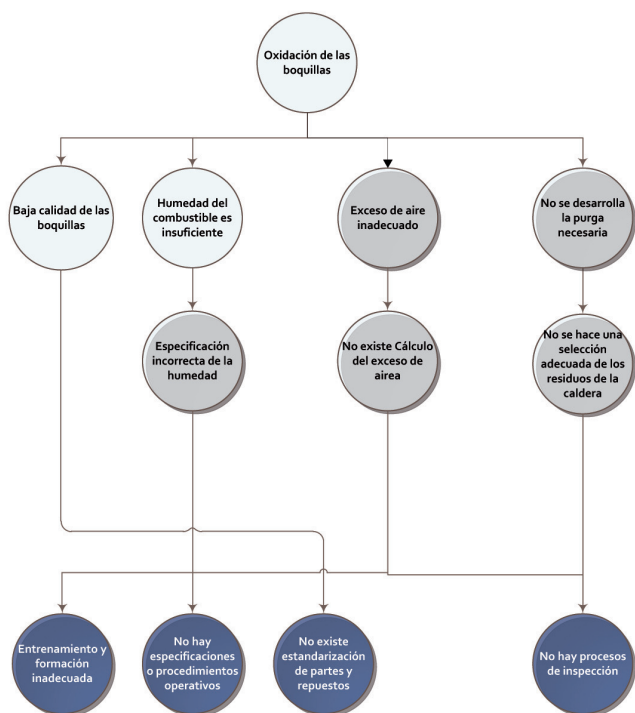


Fig. 4: Árbol lógico de las causas raíces físicas "Oxidación de Boquillas"

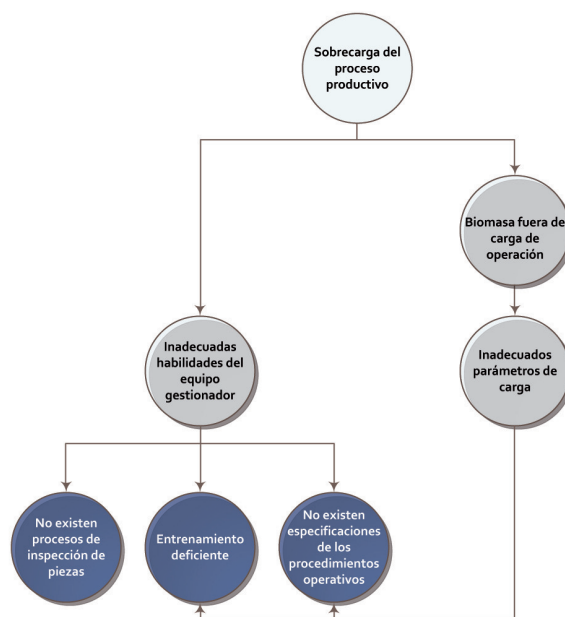


Fig. 5: Árbol lógico de las causas raíces físicas "Sobrecarga del proceso productivo"

do la acumulación y mal drenaje, así como la obstrucción de las boquillas de aire.

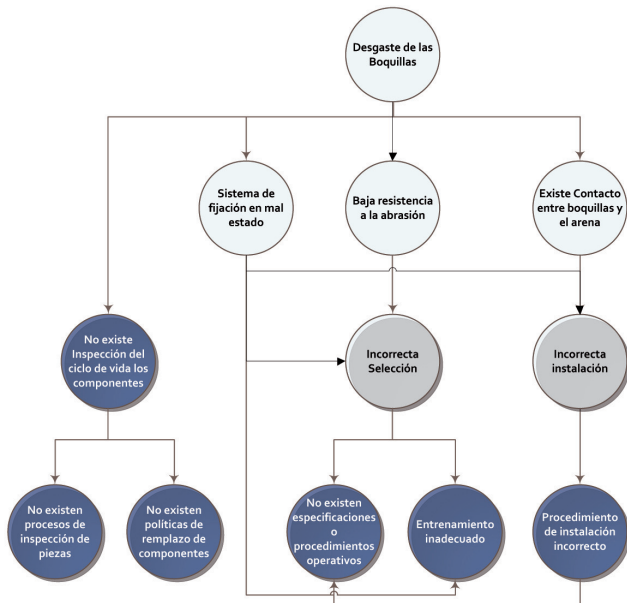


Fig. 6: Árbol lógico de causas raíces físicas "Desgaste de Boquillas"



Fig. 8: Conducto de drenaje y toberas de aire bloqueadas por material de alta densidad

2.1.4. Identificación de soluciones

La solución debe permitir que el proceso de combustión sea lo más continuo posible y el mantenimiento de los inyectores libres de materiales que puedan obstruir, asegurando el porcentaje correcto de aire para movilizar la arena y generar una buena combustión.

La aplicación de TRIZ ha permitido la identificación de dos principios de la invención sobre las problemas raíces: Principio 10 (acción anticipada) y el principio 24 (mediador: elemento o proceso intermedio entre dos etapas del proceso, de forma permanente o temporalmente). La solu-

ción generada mediante el uso de principios 10 y 24, recomendado por TRIZ, es el diseño de un sistema extractor de

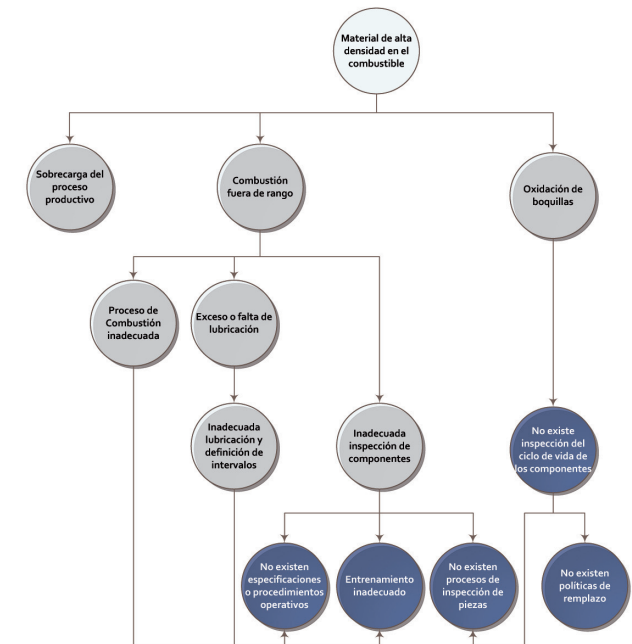


Fig. 7: Árbol lógico de causas raíces físicas "Material de alta densidad en el combustible"

materiales de alta densidad antes de la caldera, lo que podría ayudar a reducir al mínimo la entrada de materiales de alta densidad. Sin embargo, esta solución puede abordarse de dos maneras diferentes:

Alternativa 1: esta solución pretende resolver el problema mediante la modificación de la cinta transportadora existente, una cinta inclinada con un mecanismo de vibración que provoca el desplazamiento de materiales de alta densidad usando la gravedad en dirección contraria al movimiento. De esta manera, el combustible llega sin, o al menos con una cantidad reducida de materiales indeseables a la caldera.

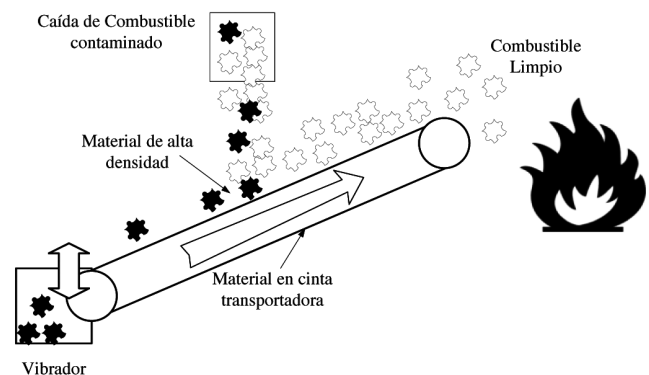


Fig. 9: Esquema de Alternativa 1, Cinta Transportadora con mecanismo de vibración

Alternativa 2: Esta solución pretende resolver el problema mediante la incorporación de un sistema de inyección de aire controlado antes de la caldera para todo el material transportado dentro de la caldera, haciendo que el material más ligero (combustible) flote, como consecuencia de la inyección de aire los materiales no deseados (alta densidad) caen por gravedad a través de un conducto de descarga instalado para este propósito. Mediante la instalación de un ventilador similar a las boquillas de aire existentes en la caldera, el material de alta densidad son forzados a través de una tubería de modo que el combustible limpio puede continuar hacia la caldera.

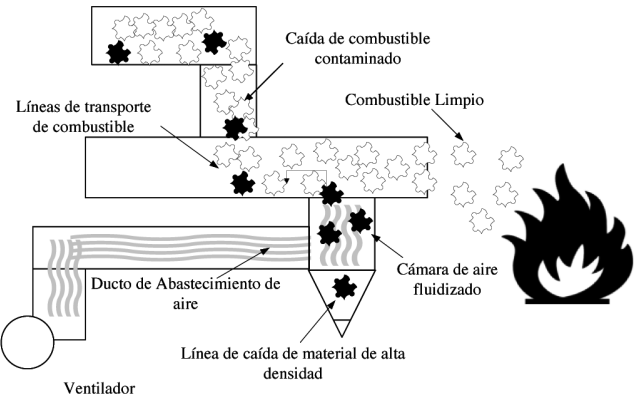


Fig. 10: Esquema de Alternativa 2, sistema de inyección de aire previo entrada a la caldera

2.1.5. Implementación de la solución

Las alternativas son comparadas en la tabla 1 de acuerdo al resultado esperado de cada una de ellas.

Posteriormente, ambas alternativas se analizan para determinar cuál de ellas presenta una mayor oportunidad de desarrollo dentro de la empresa, calculándose ésta en función de tres parámetros:

La Tabla 2 muestra que la alternativa que se presenta como la mejor solución desde el punto de vista de la empresa es la alternativa 2, principalmente por motivos económicos, ya que la empresa posee sopladores en las bodegas de reciclaje, además, esta alternativa no requiere modificaciones importantes en la instalación inicial.

Alternativa	1	2
Resultados esperados		
Disminuir el tiempo de inactividad existente producto de la existencia de material de alta densidad	80%	90%
Reducir la oxidación en las boquillas usadas	50%	60%
Prevenir el desgaste de las boquillas de la caldera	70%	70%
Aumento del proceso de producción	60%	70%
Promedio de las soluciones (Grado de impacto de la solución innovadora)	65%	73%

Tabla 1: Comparación de alternativas

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La aplicación de la metodología propuesta ha permitido la detección de problemas, principalmente los que generan una disminución de la disponibilidad de la caldera que en el caso de estudio corresponde a la presencia excesiva de contaminantes que no están implícitos en la combustión, especialmente materiales de alta densidad, tales como piedras de tamaño significativo. El modo de fallo más crítico fue analizado, el denominado “obstrucción de boquillas” de aire dentro de la caldera.

El uso de TRIZ en la generación de soluciones ayudó a reducir el riesgo latente desde el momento de la aplicación de las soluciones al proceso. Sin embargo, TRIZ es una herramienta que debe ser complementada con herramientas de búsqueda e identificación de fallos y análisis de criticidad., dado que si el problema no es identificado correctamente, se puede trabajar hacia la dirección equivocada. Por ello, este trabajo busca fortalecer esta debilidad mediante el uso de técnicas como el AMEF y RCA.

Es importante destacar el rol de las personas que participaron en el desarrollo de la metodología, aspecto fundamental para el correcto desarrollo y el logro de los objetivos. Los perfiles principales de las personas participantes son: Operador (experto en la gestión y operación de los sistemas y equipos bajo análisis), Mantenedor (experto en la reparación y mantenimiento de los sistemas y equipos bajo análisis), Programador (ofrece una visión sistémica de la activi-

Alternativa	Grado de Impacto de la solución innovadora	Grado de complejidad del sistema	Costo USD	Desarrollo de oportunidades ¹
1	65%	100%	15.000	-15.035%
2	73%	70%	5.000	-4.997%

Tabla 2: Análisis de oportunidades de desarrollo

¹ La oportunidad de desarrollo de calcula según [1]:

$$\text{Desarrollo de la oportunidad} = \text{Grado de Impacto} - (\text{complejidad} + \frac{\text{Costo de solución}}{\text{Costo Promedio}} * 100)$$

dades), Ingeniero especialista (experto en áreas específicas de dominio), Facilitador (asesor metodológico) y Experto de Proceso (proporciona información general y detallada del proceso de producción).

4. AGRADECIMENTOS

Este trabajo se ha realizado con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación Español y de los fondos FEDER. Los autores también quieren agradecer su colaboración a la Planta de Celulosa de Arauco S.A., Planta Trupan-Cholguan en Yungay, Chile.

The research work was performed within the context of iMaPla (Integrated Maintenance Planning), an EU-sponsored project by the Marie Curie Action for International research Staff Exchange Scheme (project acronym PIRSES-GA-2008-230814 iMaPla).

PARA SABER MÁS

1. Ulwick, A. (2005). *What Customers Want: Using Outcome-Driven Innovation to Create Breakthrough Products and Services*. New York: McGraw-Hill.
2. E. Zio. (2009). Reliability engineering: Old problems and new challenges. *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009) 125–141.
3. Ruff, D. N., and Paasch, R. K. (1993). Consideration of failure diagnosis in conceptual design of mechanical systems. *Design Theory and Methodology*, ASME, DE-53, 175–187.
4. Crespo A, Moreu P, Gómez J, Parra C, González V. (2009). "The maintenance management framework: A practical view to maintenance management." Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48513-5.
5. Barberá L, Crespo, A, Viveros P, Stegmaier R. (2012). Advanced model for maintenance management in a continuous improvement cycle: integration into the business strategy. *International Journal System Assurance Engineering and Management*. ISSN 0975-6809. DOI 10.1007/s13198-012-0092-y. Springer.
6. Crespo A. (2007). "The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance". Springer-Verlag London Limited. ISBN: 9781846288203.
7. Barberá L, Crespo A, Viveros P et al. (2012). "The Graphical Analysis for Maintenance Management Method: A Quantitative Graphical Analysis to Support Maintenance Management Decision Making". *Journal of Quality and Reliability Engineering International*, Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Ltd. (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/qre.1296.
8. Viveros P, Zio E, Nikulin C, et al. Integration of root cause analysis and theory of inventive problem solving. In: *Proceedings of the 11th international Probabilistic Safety Assessment and Management Conference and The Annual European Safety and Reliability Conference*. Helsinki, Finland. June 25-29, 2012.
9. Paradies M, Busch D. (1988). Root Cause Analysis at Savannah River Plant. *Conference on Human Factors and Power Plants*, (págs. 479–483).
10. Doggett A. (2004). A statistical comparison of three root cause analysis tools. *Journal of Industrial Technology*, 1–9.
11. Osborn AF. *Applied imagination: Principles and procedures of creative problem solving* (Third Revised Edition). New York, NY: Charles Scribner's Sons, 1963.
12. Michalko M. *Thinkertoys: A Handbook on Creative-Thinking Techniques*. 2nd ed. Berkeley, CA: Ten Speed Press, 2006.
13. Altshuller G. (1984). *Creativity as an Exact Science: The Theory of the Solution of Inventive Problems*. Rusia: Gordon and Breach Science Publishers.
14. Savransky S. (2000). *Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving*. Florida: CRC Press.
15. Silverstein D, Samuel P, DeCarlo N. *The Innovator's Toolkit: 50+ Techniques for Predictable and Sustainable Organic Growth*, John Wiley & Sons, Inc. 2008