

# MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF MACHINES USING AHP

Félix Fernández<sup>1</sup>[0000-0002-2414-029X], Eduardo Ortigoza<sup>1</sup>[0000-0002-8525-3984],  
Rodrigo González<sup>1</sup>, Lucas Cáceres<sup>1</sup>, Roberto Fariña<sup>1</sup>, and Victorio Oxilia<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica, Paraguay

<sup>2</sup> [ffernandez@pol.una.py](mailto:ffernandez@pol.una.py)

**Abstract.** A comprehensive analysis of the machines is a key aspect that must be considered in any production plant. In this sense, the objective of this paper is to categorize the machines that are part of a beer can packaging line, based on the criticality of each one, through an automated fault recording scheme and the calculation of lost production. An operational investigation has been carried out, in which the data collection has been based on the failures of the machines that compose the production line, and then carried out a descriptive investigation, of an empirical and documentary nature, supported by primary and secondary sources where cases of safety and quality events, which have occurred in similar plants of the same company, during the last two years were studied.

On the other hand, it is known that there is a constant technological advance in the industrial sector and an increasing demand for the product. In this context, it is intended to contribute with a methodology that facilitates planning for corrective, preventive and predictive maintenance, in order to improve the production process. The obtained result has revealed that it is possible to define a list of critical machines based on certain criteria, using the methodology called Hierarchical Analytical Process (AHP). It is concluded that through the simulations of unscheduled failures it is possible to carry out an analysis to obtain a list of machines with certain levels of criticality and thus improve the maintenance management of the company.

**Keywords:** Machines · Production line · Failures · Criticality · AHP.

## 1 Introducción

En Paraguay, las quince actividades económicas principales del sector industrial absorben el 79,1% del total de ingresos y concentran el 22,5% del total de unidades económicas. La actividad económica con mayores ingresos por el suministro de bienes y servicios, es la dedicada a la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica con el 25,8% del total de ingresos de las unidades económicas del país, seguida del procesamiento y conservación de carne con el 15,3%, luego la elaboración de productos de tabaco con el 5,0%, posteriormente la elaboración de otros productos alimenticios con el 4,2%, y finalmente, en el ranking de las

cinco primeras actividades económicas, se encuentra la elaboración de bebidas alcohólicas con el 3,2% [1].

En este contexto, en cuanto a la industria cervecera del país, la compañía Cervecería Paraguaya S.A. - CERVEPAR, sigue apostando al desarrollo de la industria local, a través de inversiones que tendrían un alto impacto dinamizador de la economía. Esto no sólo será en beneficio de la cadena de valor de la industria, sino en la percepción de los demás actores económicos [2]. Cabe resaltar que, en los últimos 5 años, Cervepar realizó inversiones por más de USD 175 millones en el país. El aporte tributario de la compañía en los últimos 5 años alcanza la suma de USD 320 millones. La comercialización de los productos de la compañía genera en el país un movimiento comercial de USD 591 millones, esto representa el 1,6% sobre el PIB, y el 5% del sector terciario [3].

Por lo tanto, mencionada la importancia de dicha compañía para el país, el presente trabajo se ha enfocado a la industria cervecera, donde se ha analizado específicamente el sector de envasado de cervezas. Ésta investigación tiene como principal misión brindar una herramienta de toma de decisión a los encargados de la planificación del mantenimiento de la línea de producción, buscando una mayor confiabilidad en los planes de mantenimiento de las distintas máquinas que componen una línea de envasado. Con esto, se pretende optimizar las funciones del personal de la línea, y tener un mejor control en cuanto a la producción, teniendo en cuenta la criticidad de las máquinas en los procesos y su priorización para intervenciones estratégicas.

Para llevar a cabo este trabajo, se han realizado simulaciones de paradas no programadas, utilizando un esquema automatizado de la línea de producción, de tal forma a que se pueda extraer del mismo informaciones de producción (tiempo de paradas, motivos y cálculo de producción perdida). Dichas informaciones son registradas en una bitácora de eventos, donde los datos y registros de producción fueron utilizados para el análisis. Además, han sido utilizados como insumos para el modelo, datos estadísticos relevantes, como por ejemplo: datos de eventos de seguridad y calidad ocurridos en plantas de producción similares, en los últimos dos años.

## 2 Toma de decisión multicriterio

En el área de toma de decisión multicriterio, una de las técnicas más utilizadas es el Analytic Hierarchy Process (AHP - Proceso Analítico Jerárquico). Dicha metodología fue desarrollada durante los años setenta por el matemático Thomas Saaty, buscando el desarrollo de una herramienta sistemática para la determinación de un ranking de alternativas que tenga un fundamento matemático sólido y que sea simple en su aplicación [4]. Ésta metodología es utilizada para resolver problemas complejos que utilizan múltiples criterios, en donde es necesario que quien analiza el problema otorgue un nivel de preferencia subjetiva respecto a la importancia de cada criterio y que posteriormente especifique un nivel de preferencia de cada alternativa en función a cada criterio, utilizando una escala de preferencias.

El AHP ayuda a determinar escalas relativas utilizando una ponderación de datos de una escala estandarizada, realizando una operación aritmética posterior en tales escalas. Por lo tanto, las ponderaciones se dan en forma de comparaciones por pares. Para ello, se asume de que existen varios criterios, cuyos pesos son respectivamente conocidos. En el proceso se determina una matriz de relación por pares, cuyas filas dan las relaciones de pesos de cada criterio con respecto a todos los demás.

Primeramente, es necesario conformar un árbol jerárquico de decisión, para ello es necesario conocer el objetivo del problema en cuestión, para luego establecer los criterios a ser evaluados y las alternativas a ser consideradas como comparables en el proceso de toma de decisión. La distribución de dicho árbol puede tener tantos niveles como sea necesario, en el nivel superior se encuentra el objetivo principal a lograr, en los niveles intermedios los criterios de evaluación, y en los niveles inferiores las alternativas a ser consideradas como comparables [5].

El segundo paso consiste en la ponderación obtenida de la comparación por pares. Los elementos del segundo nivel están dispuestos en una matriz y las ponderaciones (de los criterios) son realizadas con relación al objetivo principal. Por lo general, la metodología utiliza una escala de ponderación con valores de 1 al 9, como se describe en [4]. Luego de conformar la matriz de comparaciones pareadas de los criterios, obtenidos a partir de las ponderaciones, se puede obtener el vector resultante de dichas ponderaciones. Éste vector se estima a través del autovector de la matriz.

Posteriormente, en el tercer paso se realiza la comparación por pares de los elementos en el nivel más bajo, es decir, las alternativas son comparadas con respecto a cada criterio de evaluación. En esta parte del proceso, se evalúan las ponderaciones de cada alternativa con respecto a cada criterio, según [6]. Finalmente, se multiplica la matriz resultante de la ponderación de cada criterio por el vector resultante de la ponderación de cada alternativa en función de cada criterio, y este producto da como resultado un vector columna que representa la ponderación global de las distintas alternativas, en función de todos los criterios.

La aplicación del AHP ha sido utilizada en diferentes casos de estudio, con el fin de resolver diversos tipos de problemas, algunos trabajos son: [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]. Por lo tanto, el AHP es una herramienta matemática que permite evaluar las alternativas que se plantean a la hora de tomar una decisión.

### 3 Propuesta metodológica

#### 3.1 Situación actual de la empresa

En la actualidad, la compañía CERVEPAR, fundada en el año 1910, se ha convertido en la mayor planta industrial de bebidas del Paraguay. La misma cuenta con seis líneas de producción en el sector de envasado, dotando a la planta de una capacidad de envasado de 1.000.000 de litros de cerveza por día. Sin embargo, con el paso del tiempo y el avance de la tecnología, es de esperarse que surjan

nuevas problemáticas que deben ser solucionadas. Se ha evidenciado la necesidad de automatizar procesos en el área de envasado, para de esta manera mantener y mejorar el nivel de productividad de las líneas. Considerando ésta situación, en una de las líneas de producción dedicada al envasado de latas, se ha comprobado que, al momento de producirse una parada no programada de la línea, la recolección de los datos del evento representa un problema importante, ya que, al producirse la parada, un operador necesariamente debe recorrer toda la línea para identificar el problema, y en base a observaciones directas, determinar el motivo de la parada y el tiempo de duración. Éste procedimiento posibilita la existencia de errores humanos en el registro del evento, lo que genera inconvenientes a la hora de realizar un análisis post-falla, aumentando la dificultad de tener una visibilidad clara acerca de la eficiencia productiva de cada máquina que compone la línea de producción.

En este contexto, el presente trabajo tiene por objeto proponer una herramienta de toma de decisión, el cual implica un esquema de automatización y simulación para el proceso de recolección de datos de paradas no programadas. Con esto, sería posible tener una mayor confiabilidad en el cálculo de la eficiencia de producción de cada máquina, evidenciando problemas sin intervención manual en el registro. La aplicación de conocimientos de automatización de procesos ayudará a ahorrar tiempo a la hora de categorizar las distintas máquinas y a evidenciar los problemas que puedan surgir, al ocurrir cualquier tipo de evento. Asimismo, la aplicación de éste esquema permitirá cuantificar el volumen de producción que se ha perdido al ocurrir una falla, teniendo en cuenta el tiempo de parada de la máquina y finalmente, traducir esos datos en términos de costos. Con esto, se pretende dar una visibilidad diferente a los problemas y permitir al equipo de trabajo enfocarse en los puntos críticos, buscando optimizar los recursos necesarios para el mantenimiento de la línea.

### 3.2 Criterios de evaluación

Para poder definir cuál de las máquinas de la línea de envasado es más crítica, se optó por utilizar una herramienta de toma de decisión, el cual se basa en ciertos criterios de evaluación, para dar una priorización o ranking de las alternativas evaluadas, es decir, evaluar las máquinas según su criticidad. Para llevar a cabo esto, se optó por utilizar la técnica de decisión multicriterio denominada Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés).

El AHP es una metodología utilizada para resolver problemas complejos. Utiliza múltiples criterios de evaluación, donde es necesario que el que analiza el problema otorgue un nivel de preferencia subjetiva respecto a la importancia de cada criterio y que posteriormente especifique un nivel de preferencia de cada alternativa en función a cada criterio, utilizando una escala de preferencias (escala de Saaty) [4].

Este proceso de decisión, se ha realizado dándole un peso a cada alternativa (máquina), en función a tres criterios de evaluación definidos, éstos se han determinado de acuerdo a la experiencia de los tomadores de decisión, para finalmente conformar una matriz de priorización de máquinas. En la Fig. 1 se puede ver la

jerarquía de decisión empleada en el proceso de decisión.

**Fig. 1.** Árbol Jerárquico de Decisión



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen los criterios de evaluación utilizados en el análisis:

- **Impacto Económico:** para este criterio se evalúa el impacto de una parada de máquina, para ello se realizaron simulaciones de paradas habituales en cada una de las siete máquinas que componen la línea de envasado, con el fin de cuantificar el volumen de producción se ha perdido en cada parada. Una vez cuantificado y obtenido los datos del volumen de producción perdido, el mismo será valorizado según históricos de costos de producción [15], para utilizarlo como dato de entrada al modelo de toma de decisión, y así obtener el vector propio de éste criterio.
- **Riesgos de Seguridad:** para este criterio se tuvo en cuenta la seguridad, considerando qué tan crítica es una intervención de mantenimiento en cada una de las máquinas de la línea. Para ello, se han utilizado como datos de entrada al modelo de decisión, la base de datos de antecedentes históricos de eventos ocurridos en plantas similares; dichos eventos ocurrieron en el periodo 2016-2018[16]. Finalmente, con esto se pudo calcular el vector propio de éste criterio.
- **Impacto en Calidad:** para este criterio se consideró el impacto de la calidad del producto terminado, considerando la falla que se tuvo en el proceso de los productos. Para esto, se ha considerado como datos para el modelo de decisión, la cantidad de incidentes de calidad relacionados a las fallas de cada una de las máquinas durante el periodo 2016 – 2018 [16]. Así, con esto se pudo calcular el vector propio correspondiente a éste criterio.

### 3.3 Alternativas analizadas

Las alternativas consideradas para el análisis de este trabajo se pueden observar en la Fig. 1, dichas alternativas son máquinas que se encuentran en operación en

una línea de envasado de latas de la compañía CERVEPAR. Las mismas fueron seleccionadas de acuerdo a su importancia en la operación de la misma.

Las alternativas analizadas son las siguientes máquinas: Despaletizadora, Lavadora de latas, Llenadora, Pausterizadora, Empacadora, Paletizadora y Envolvedora.

## 4 Caso de estudio

### 4.1 Simulación de la línea de envasado

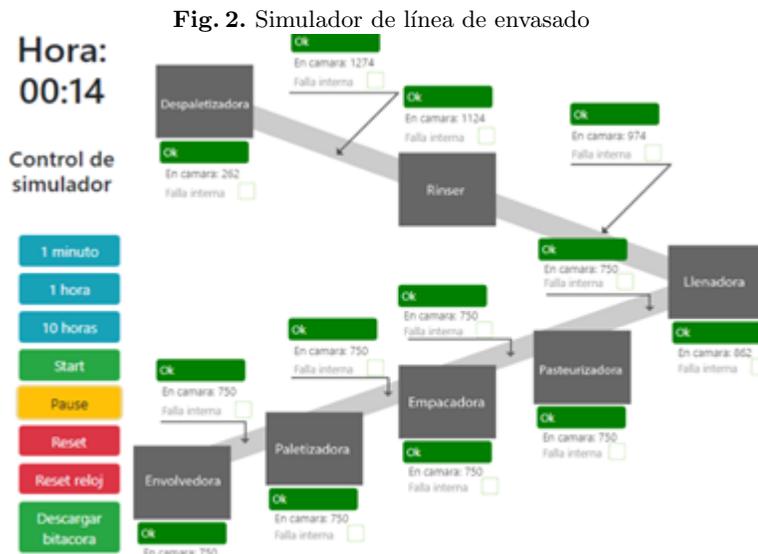
Para llevar a cabo las simulaciones, se ha recurrido al lenguaje de programación © Python, y además, como software de simulación se ha utilizado VirtualBox de © 2020 Oracle, ambos en sus versiones gratuitas.

La línea de envasado de latas utilizada como caso de estudio pertenece a una línea de producción de la empresa Cervepar, ésta consta básicamente de siete partes llamadas islas automáticas, unidas entre sí por medio de cintas transportadoras. Cada isla es controlada por un PLC, el cual mediante una programación almacenada dentro del mismo realiza procesos de maniobra, control, señalización, conteo, temporización, etc.

La función de conteo es realizada a través de sensores de cada máquina, donde se van adquiriendo datos de los conteos de producción y el estado propio de la máquina. Éstos sensores son de alto desempeño y de alta performance en su punto de trabajo. Los datos de los sensores se parametrizan como entradas digitales dentro del PLC de las máquinas o islas automáticas. Las siete islas automáticas ya fueron mencionadas, y son: Despaletizadora, Lavadora de latas, Llenadora, Pasteurizadora, Empacadora, Paletizadora y Envolvedora.

El simulador es una herramienta de gestión que facilita al operador la interpretación de los datos referente a la producción obtenida en un periodo de 24 horas. Facilita la observación de los eventos que pudieran darse relacionados a la eficiencia de la máquina, con el fin de generar soluciones en tiempo real, adecuadas a situaciones específicas en el caso de fallas, lo cual posibilita mejorar la producción y el trabajo del personal. En la Fig. 2 se puede observar una visualización general del simulador de línea.

Cada máquina tiene programada una cantidad de modos de falla. Además, cabe resaltar que existe un modo de falla común, tanto para las cintas transportadores como para las máquinas, llamada falta de alimentación. Ésta falla o parada de máquina se da cuando se tiene faltante de producto o acumulación del mismo. Cada máquina posee una interfaz del simulador, que contempla un botón llamado falla interna. Dicha opción ofrece la posibilidad de acceder al informe de las fallas que pueden ocurrir, la cual es visualizada a través de la bitácora de eventos, y ésta contempla la cantidad de latas no producidas durante la parada.



Fuente: Elaboración propia

#### 4.2 Descripción operativa del simulador

El simulador desarrollado cuenta con las siguientes funcionalidades:

1. Permite tener un control del tiempo de simulación de la producción en un periodo de 24 horas, de modo a tener un registro de los eventos ocurridos.
2. Cuenta con un panel de botones de comando, donde el operador puede iniciar la simulación, pausarla, resetearla o adelantarla.
3. Cuenta con una representación en forma de bloques de la línea de producción, donde se detalla el estado de cada máquina y transportes que componen la misma, pudiéndose ver el status de cada máquina.
4. Despliega una lista de fallas típicas de cada máquina.
5. Dispone de una bitácora de eventos donde se registran las paradas con los datos de motivo, duración y volumen de producción perdida.

#### 4.3 Concepto de “V” de línea

Para realizar las simulaciones, se ha considerado éste concepto, el cual se basa en el balance de línea. Se considera balance de línea al funcionamiento adecuado de cada una de las máquinas que conforman la línea, ligada directamente a la configuración de las velocidades y ubicación de cada una de las máquinas. El balance es indispensable para asegurar el funcionamiento ideal de la línea de producción, lo cual asegura la producción óptima de la misma, teniendo en cuenta la configuración previamente establecida.

En el caso de la línea de latas, la misma está compuesta por siete máquinas que supone ciertos parámetros de velocidad (dichos parámetros son configurado

en consenso con el encargado del diseño del proyecto y el proveedor de la línea a ser instalada).

Éste concepto, básicamente expresa que el balance de línea debe darse con distintas velocidades, dependiendo de la ubicación física y función que tenga la máquina en una línea de producción. Sin este concepto, el diseño de una línea de producción no puede llevarse a cabo. Para éste caso, las siete máquinas deben tener las siguientes velocidades:

- Despaletizadora: 135% de la velocidad nominal
- Lavadora de latas: 125% de la velocidad nominal
- Llenadora: 100% de la velocidad nominal
- Pasteurizadora: 115% de la velocidad nominal
- Empacadora: 120% de la velocidad nominal
- Paletizadora: 125% de la velocidad nominal
- Envolvedora: 135% de la velocidad nominal

Por concepto, la máquina que define la velocidad nominal de una línea, es la Llenadora de latas, ya que es la máquina encargada de llenar con cerveza el recipiente y es directamente cuantificable como producto terminado cuando pasa por la misma.

Es así, como cada máquina debe ser ajustada para que el balance de línea ocurra. Como se ha detallado anteriormente, las máquinas que anteceden y suceden a la Llenadora son más veloces, debido a que por la separación de las cintas transportadoras, ellas deben de compensar esa separación con velocidad superior, de modo a no tener paradas por alimentación o acumulación de producto.

Por último, el espacio entre máquinas representa a las cintas transportadoras en una línea de producción. Si bien no tienen una velocidad nominal propia, son dependientes de las velocidades y rendimientos en régimen normal de las máquinas que le suceden o anteceden. Las mismas actúan de “pulmones” entre máquinas, debido a que pueden contener una cierta cantidad de producto y en el caso de que alguna máquina sufra una falla o parada menor, la eficiencia y rendimiento de la línea de producción no se ve afectada, siendo el ejemplo ideal de la aplicación del concepto de “V” de línea.

#### 4.4 Análisis y aplicación del AHP

Este trabajo analiza un caso de estudio que supone las alternativas mencionadas anteriormente (árbol jerárquico), bajos los criterios de evaluación también citados. Como el objetivo del mismo es determinar la criticidad de máquinas que componen una línea de envasado, se recurre a la metodología de priorización denominado Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Por lo tanto, para unificar el nivel de preferencia de cada alternativa (máquina), cuando se compara con cada criterio, se ha utilizado la escala de valores de Saaty [4], cuya ponderación depende de qué tan crítica sea la máquina con respecto al criterio evaluado.

#### 4.5 Análisis y resultados de los criterios vs alternativas

##### Impacto Económico

Con el fin de cuantificar el impacto económico, se han realizado simulaciones de parada de máquinas, de manera a responder a la pregunta: ¿Cuál es el valor de la producción que se ha perdido en una parada de una hora de duración?. Una vez conocidos los valores de producción perdido en cada parada, a cada máquina se le asigna un peso según la escala de Saaty [4]. Para este trabajo se han considerado paradas de una hora para todas las máquinas, obteniéndose los siguientes resultados de la Tabla 1.

**Table 1.** Latas no llenadas por máquina en paradas de una hora

Máquinas	Latas no llenadas	Precio unitario	Total en Gs.
Despaletizadora	43.500	1.240	53.929.444
Lavadora de latas	44.250	1.240	54.859.262
Llenadora	45.000	1.240	55.789.080
Pasteurizadora	39.000	1.240	48.350.536
Empaquetadora	18.750	1.240	23.245.450
Paletizadora	12.750	1.240	15.806.906
Envolvedora	12.000	1.240	14.877.088

Teniendo en cuenta datos históricos, el costo de producción promedio de una lata se puede valorar en Gs. 1.240 (Guaraní: Gs., moneda de curso legal del Paraguay). Con ésta información es posible calcular el valor del producto no llenado, multiplicando el precio unitario por la cantidad de latas no llenadas, obteniendo así los resultados de la Tabla 1.

Para comparar todas las alternativas con respecto a cada uno de los criterios de evaluación, es necesario ponderar cada alternativa con un peso según la escala de Saaty. Para ésta parte del proceso de decisión, se estableció un rango de pérdidas al que se le asignó una valoración de 1 al 5. Los rangos de valores fueron calculados dividiendo en cinco partes iguales, el rango de montos definidos por el valor máximo y el valor mínimo obtenidos en las simulaciones, según se puede observar en la Tabla 2.

**Table 2.** Escala de ponderación de valores

Valor mínimo	Valor máximo	Pesos para el AHP
14.877.088	23.059.486	1
23.059.486	31.241.885	2
31.241.885	39.424.283	3
39.424.283	47.606.682	4
47.606.682	55.789.080	5

Considerando dichos rangos de valores, a cada máquina se le asigna un puntaje en función a la producción que se ha perdido, ésta valoración se puede ver en la Tabla 3.

**Table 3.** Valorización de la producción no llenada

Máquinas	Latas no llenadas	Precio unitario	Total en Gs	Pesos para el AHP
Despaletizadora	43.500	1.240	53.929.444	5
Lavadora de latas	44.250	1.240	54.859.262	5
Llenadora	45.000	1.240	55.789.080	5
Pasteurizadora	39.000	1.240	48.350.536	5
Empaquetadora	18.750	1.240	23.245.450	2
Paletizadora	12.750	1.240	15.806.906	1
Envolvedora	12.000	1.240	14.877.088	1

Con éstos resultados obtenidos, se puede observar que se tienen cuatro máquinas con paradas extremadamente críticas desde el punto de vista económico. Dichas máquinas son las siguientes:

- i) Despaletizadora.
- ii) Lavadora de latas.
- iii) Llenadora.
- iv) Pasteurizadora.

Para éste análisis en particular, la Llenadora resulta ser la más crítica de las cuatro máquinas. Esto resulta lógico ya que una parada en la misma significa automáticamente un producto no llenado.

### Riesgos de Seguridad

Para este criterio, se han considerado los datos históricos de eventos de seguridad ocurridos en líneas de producción de envasado de latas en plantas similares a Cervepar, considerando eventos de seguridad durante el periodo 2016 – 2018.

Por lo tanto, considerando el periodo de tiempo mencionado y la cantidad de eventos relacionados a seguridad, se pudo elaborar la siguiente 4.

Para poder comparar el impacto económico con el impacto en seguridad, es necesario llevar ambos datos a una misma unidad de medida, en este caso a la escala de Saaty ya definida anteriormente.

Estos rangos de valores fueron calculados dividiendo en cinco partes iguales, el rango formado por el valor máximo y el valor mínimo de la cantidad de eventos de seguridad ocurridos. Evaluando los eventos de seguridad, cada máquina tiene un puntaje según se puede observar en la Tabla 4.

**Table 4.** Eventos de seguridad ocurridos en plantas de Sudamérica 2016- 2018

Máquinas	Total de eventos	Pesos para el AHP
Despaletizadora	22	2
Lavadora de latas	5	1
Llenadora	79	5
Pasteurizadora	38	3
Empaquetadora	10	1
Paletizadora	44	3
Envolvedora	22	2

Con este resultado parcial obtenido, se puede notar que considerando dichos eventos de seguridad, se pueden identificar una máquina como extremadamente crítica y dos máquinas como medianamente críticas, como sigue:

- Llenadora
- Pasteurizadora
- Paletizadora

### Impacto en Calidad

Para el análisis de este criterio, se ha considerado la cantidad de incidentes de calidad relacionados a las fallas de cada una de las máquinas durante el periodo 2016 – 2018. Es importante tener en cuenta, que se define como incidente de calidad a todo evento de producción que genera un producto no conforme con su calidad y debe ser retenido para su posterior inspección. El resultado de ésta inspección puede derivar en la liberación del producto o en el derrame del mismo, en caso de que no cumpla con los parámetros de calidad establecidos.

Considerando el periodo de tiempo mencionado, los incidentes de calidad relacionados a fallas en máquinas son los que se observan en la Tabla 5.

**Table 5.** Número de incidentes de calidad 2016 – 2018

Máquinas	Incidentes de calidad	Pesos para el AHP
Despaletizadora	10	1
Lavadora de latas	50	4
Llenadora	66	5
Pasteurizadora	28	5
Empaquetadora	28	2
Paletizadora	25	2
Envolvedora	10	1

Además, considerando la cantidad de eventos de calidad registrados y unificando las unidades de medida con los otros dos criterios de evaluación, se tienen los siguientes puntajes para cada máquina, ver Tabla 5.

De manera análoga al criterio anterior, fueron calculados rangos de valores, dividiéndolos en cinco partes iguales, conformando así el valor máximo y el valor mínimo de la cantidad de incidentes de calidad.

Luego de realizar los cálculos, se puede identificar a la Llenadora como una máquina extremadamente crítica. Esto es lógico, ya que una falla en la misma compromete directamente la calidad del líquido envasado. Para el caso de la Pasteurizadora, es también crítica, debido a que una falla es motivo directo de un incidente de calidad.

#### 4.6 Análisis y resultados de los criterios vs criterios

Antes de poder definir cuál es la máquina más crítica en función a todos los criterios, es necesario hacerse la pregunta: ¿son todos los criterios igualmente importante?. Para éste trabajo se ha decidido dar un peso relativo a cada criterio, partiendo de la base que siempre la seguridad del personal y la calidad del producto terminado deben ser más importantes que una posible pérdida económica. Por lo tanto, se ha asignado un peso a cada criterio, donde los mismos fueron evaluados de par en par, el resultado se observa en la Tabla 6.

Como se puede apreciar en dicha tabla, cada criterio comparado contra otro tiene un nivel de criticidad diferente, por ejemplo, el criterio de seguridad es extremadamente más crítico que el económico, ya que la seguridad del personal debe prevalecer siempre, por lo que en la casilla correspondiente, se pondera con 5. Dicha ponderación, directamente en su forma recíproca, da una valoración de 1/5, cuando se compara el criterio económico con el de seguridad.

Posteriormente, para poder definir cuál de los tres criterios es más importante es necesario normalizar la matriz y hallar el promedio ponderado. Para realizar la normalización de la matriz primeramente debemos obtener la suma de cada columna para así conocer el puntaje acumulado de cada criterio.

**Table 6.** Puntaje acumulado de criterios e impacto de criterios comparados de a par.

	Económico	Seguridad	Calidad	Promedio Ponderado
Económico	1	1/5	1/2	0,13
Seguridad	5	1	2	0,59
Calidad	2	1/2	1	0,28
Total	8,0	1,7	3,5	1

Además, se ha calculado el promedio ponderado de cada fila, el resultado de ésta operación indica el nivel de preferencia de cada criterio. Como se puede apreciar en la Tabla 6, el criterio con mayor preferencia es la Seguridad, seguido de la Calidad y por último el Económico.

## 5 RESULTADOS

Para determinar cuál de las máquinas resulta ser la más crítica en toda la línea de envasado, es necesario evaluar la matriz de indicadores, teniendo en cuenta los pesos obtenidos del nivel de preferencia que se ha calculado para cada uno de los criterios. Para efectuar ésta operación, se ubica el promedio ponderado como una fila en la matriz de indicadores, resultando la siguiente Tabla 7.

**Table 7.** Matriz de comparación de criterios vs alternativas

Máquinas	Imp. Económico	Riesgos de Seguridad	Imp. en Calidad
Despaletizadora	5	2	1
Lavadora de latas	5	1	4
Llenadora	5	5	5
Pasteurizadora	5	3	5
Empaquetadora	2	1	2
Paletizadora	1	3	2
Envolvedora	1	2	1
Prom. Ponderado	0,13	0,59	0,28

Luego, es necesario efectuar el promedio ponderado entre el valor de cada celda con respecto al promedio ponderado de cada criterio. Con este proceso se obtiene finalmente el ranking de las máquinas más críticas de la línea de envasado de latas. Los valores de priorización de máquinas se obtienen realizando la multiplicación de cada celda con el promedio ponderado del criterio correspondiente, luego es necesario sumar el valor resultante de cada fila. Ésta operación se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$PP = (PIE \times Pon.IE) + (PRS \times Pon.RS) + (PIC \times Pon.IC)^3$$

Finalmente, los resultados obtenidos, para cada criterio, se pueden observar en la Tabla 8.

**Table 8.** Ranking de máquinas críticas de la línea de envasado

Máquinas	Económico	Seguridad	Calidad	Priorización
Despaletizadora	5	2	1	2,11
Lavadora de latas	5	1	4	2,34
Llenadora	5	5	5	5,00
Pasteurizadora	5	3	5	3,81
Empaquetadora	2	1	2	1,41
Paletizadora	1	3	2	2,47
Envolvedora	1	2	1	1,59
Prom. Ponderado	0,13	0,59	0,28	-

Como puede observarse en la tabla anterior, la matriz brinda como resultado el

<sup>3</sup> PP = Promedio Ponderado; IE = Impacto Económico; PIE = Puntaje del IE; Pon. IE = Ponderación del IE; RS = Riesgos de Seguridad; PRS = Puntaje del RS; Pon. RS = Ponderación de RS; IC = Impacto en Calidad; PIC = Puntaje de IC; Pon. IC = Ponderación del IC

nivel de criticidad de todas las máquinas. En este caso, la máquina más crítica es la Llenadora, seguida de la Pausterizadora, luego la Paletizadora y por último, con el menor nivel de criticidad, la Empaquetadora.

Por su parte, el criterio de evaluación más importante es la seguridad de los empleados, ya que éstos intervienen en las paradas de mantenimiento preventivo o correctivo de las máquinas de la línea, y en segundo lugar, se encuentran las máquinas que generan impacto en la calidad del producto terminado, finalmente, en último lugar están las máquinas que generan mayores pérdidas económicas.

## 6 CONCLUSIONES

Con el presente trabajo se ha conseguido brindar una herramienta de toma de decisión que permite realizar un análisis multicriterio de las máquinas que componen una línea de envasado de latas, a través de simulaciones de fallas.

Con dicha herramienta, además de utilizar datos estadísticos de la compañía cervecera, se ha podido categorizar las máquinas de la línea de producción, en función a la criticidad de los mismos, llegando a la conclusión de que la máquina más crítica es la Llenadora de latas. Esto se debe a que, al realizar una intervención de mantenimiento en la misma, representa niveles de impacto interesante en cuanto a producción se refiere, además, el trabajo debe ser realizado en espacios confinados. Asimismo, tiene un alto impacto en la calidad del producto terminado, ya que cualquier problema relacionado a calidad afecta directamente al líquido envasado, y ésta, es la máquina cuya parada implica la mayor cantidad de latas no llenadas, es decir, repercute en mayores pérdidas económicas.

En segundo lugar del ranking, se ubica la Pasteurizadora, debido al alto impacto en pérdidas económicas y a los riesgos de seguridad, lo cual implica una intervención del operador principalmente en la máquina.

Finalmente, en el tercer lugar del ranking queda la Paletizadora, debido principalmente a los riesgos asociados a las intervenciones del operador con relación a trabajos de mantenimiento correctivo (alto número de fatalidades históricas en plantas similares).

## References

1. Situación Económica del Paraguay. <https://www.dgeec.gov.py/Publicaciones/Biblioteca/Dipticos/2%20Sector%20industria.pdf>
2. Cervecería Paraguaya sigue apostando al desarrollo de la industria local. link: <http://economaviirtual.com.py/web/pagina-general.php?codigo=19785>
3. Ministerio de Industria y Comercio. link: <http://www.mic.gov.py/mic/w/contenido.php?pagina=2id=1174>
4. Saaty, T. L.: "How to make a decision: the analytic hierarchy process", Interfaces, vol. 24, no. 6, p. 19-43, (1994).
5. De Las Nieves, G. D. L. N. S.: "Técnicas participativas para la planeación de procesos Breves de intervención", Fundación ICA, AC, 2003, p. 167-182.
6. Vargas, R. V., IPMA-B, P. M. P.: "Using the analytic hierarchy process (ahp) to select and prioritize projects in a portfolio", PMI global congress. 2010, p. 1-22.

7. Ortigoza, E., Gonzalez, A., Martinez, A., Blanco, G.: Multi-criteria Analysis of Paraguay's Productive Sector Transformation: An Economic Complexity View, in Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2016 IEEE. IEEEARGECON. <https://www.semanticscholar.org/paper/Multi-criteria-Analysis-of-Paraguay-%E2%80%99-s-Productive-Ortigoza-Gonz%C3%A1lez/a350751601d002759e56ccd6bddb068f7884e525>.
8. Ortigoza, E., Gonzalez, A., Blanco, G., Martinez, A.: TRANSFORMACIÓN ESTRUCTURAL DEL SECTOR PRODUCTIVO DEL PARAGUAY: UN ENFOQUE DESDE LA PERSPECTIVA DE LA COMPLEJIDAD ECONÓMICA Y DEL ESPACIO PRODUCTO. vol. 4. Issue. 6. pp. 69. <https://doi.org/DOI: 10.5380/relainep.v4i6.49839>. ISSN: 2317-4846. (2016).
9. González, A., Ortigoza, E., Llamosas, C., Blanco, C., Amarilla, R.: Multi-criteria analysis of economic complexity transition in emerging economies: The case of Paraguay. *Socio-Economic Planning Sciences*, 100617. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.02.004>
10. Blanco, G., Amarilla, R., Martinez, A., Llamosas, C., Oxilia, V.: Energy transitions and emerging economies: A multi-criteria analysis of policy options for hydropower surplus utilization in Paraguay. *Elsevier*. 312-321. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.06.003> Author, F.: Article title. *Journal* **2**(5), 99–110 (2016)
11. Romero, C., Morinigo, L., German, R., González A., Blanco, G., Ortigoza, E.: Multi-criteria analysis considering uncertainty for the selection of the electric power supply system - Pozo Hondo, Paraguayan Chaco. Conference: The International Symposium on the Analytic Hierarchy Process. July 2018. <https://doi.org/DOI: 10.13033/isahp.y2018.038>
12. González, A., Blanco, G., German, R., Llamosas, M., Oxilia, V., Fernández, F.: OPPORTUNITY COST ANALYSIS OF THE SALE OF PARAGUAYAN ENERGY FROM ITAIPU TO THE BRAZILIAN MARKET BASED ON A AHP MODEL. Conference: The International Symposium on the Analytic Hierarchy Process <https://doi.org/DOI: 10.13033/isahp.y2018.042>
13. González, A., Rodríguez, J., Fernández, F., Blanco, G., Oxilia, O.: Multi-criteria Analysis of the Expansion Plan of the Transmission System of Paraguay. 2019 IEEE CHILECON. <https://doi.org/10.1109/CHILECON47746.2019.8988081> .
14. Félix Fernández ; Raúl Amarilla ; Gerardo Blanco ; Victorio Oxilia: Multi-criteria valuation of electric energy from Itaipu Binational in the Brazilian power market. 2016 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON). <https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2016.7585355>
15. Sistema de gestión de documentos - ABInBev. (2019). Listado de precios y valores de producto terminado. Asunción: Cervecería Paraguaya S.A.
16. Sistema de gestión de documentos - ABInBev. (2018). Histórico de incidentes de seguridad y calidad. Buenos Aires.