

Mejoramiento del proceso de secado de Nepe de una planta cervecera

Rodríguez C., María^{*a}, Artiles R., DalberJosé^a, Mujica F., Viky^a, Pérez, Cathy^a, Silva, Sulma^b

^aEscuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^bDepartamento de Humanidades, Estudios Básicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Resumen.-

El proceso de secado del Nepe se realiza mediante la mezcla de Nepe húmedo y levadura en un secador rotatorio, con vapor saturado como agente térmico. La humedad del Nepe seco se encontraba fuera de especificaciones, por lo cual, se hace necesario mejorar la operación del proceso de secado. Estas mejoras se realizaron mediante el uso del software STATGRAPHICS y con un diseño de experimento factorial 2^3 , encontrando las condiciones óptimas de operación para el rango de valores estudiados. Al implantar las nuevas condiciones de operación se obtuvo que la humedad del producto final se encontraba en el rango esperado 5 – 8 %, además se incrementó la producción del Nepe seco y mejoró el consumo de la levadura remanente del proceso cervecero. Se recomienda rediseñar el programa de automatización e instalar un medidor de humedad con principio infrarrojo, de forma que permita operar al proceso en un escenario de alta eficiencia utilizando como puntos de operación los propuestos.

Palabras clave: Secado, Nepe seco, Nepe húmedo, Diseño de experimento factorial 2^3 ,

Improvements to the Nepe Drying Process for a Brewery Plant

Abstract.-

The dry Nepe is obtained using the drying on a rotary furnace from a mixture of wet Nepe and yeast supply to the system as prime material, using saturated vapor as thermic agent. For develop the investigation was used a 2^3 factorial experiment design, which allows recollect the experimental data following a combination of the most influent variables on the dry Nepe humidity, on ways to find the major operation point of each dryer, using an answer surface gave by STATGRAPHICS software. Was obtained a new way to operate the process that guarantee the obtaining of a product between 5 – 8 % of humidity, besides to obtain an increase on the dry nepe production and improve the remained yeast consumption of the beer process. For install the operation process conditions, is recommended residing the automation program and install a humidity measure with infrared principle on ways that allows operate the process on a high efficiency scenario using the operation proposed.

Keywords: Drying, Dry Nepe, Wet Nepe, 2^3 factorial experiment design, answer surface

1. Introducción

Toda planta cervecera presenta entre sus subproductos el Nepe, el cual es un alimento proteico para animales, y se vende en dos presentaciones: húmedo y seco. Para la obtención del Nepe seco es necesario tratar el material húmedo por un sistema de secado, proceso que en la actualidad se encuentra fuera de control en sus variables de calidad del producto establecidas por la empresa. Por tal razón, surge la necesidad de mejorar el proceso de secado del Nepe, con la finalidad de ofrecerle al mercado un producto que cumpla con las normas exigidas.

Para llevar a cabo la investigación se plantearon los

siguientes objetivos específicos: Diagnosticar los sistemas que integran el proceso de secado del Nepe, determinar las condiciones de salida del Nepe del proceso de secado, analizar las variables involucradas en el proceso de secado del Nepe, establecer mejores condiciones de operación considerando las variables más influyentes, comparar las condiciones de salida del Nepe antes y después de manipular las variables y determinar la factibilidad económica de la estrategia propuesta.

Para realizar el estudio se debe efectuar un diagnóstico del proceso de secado del Nepe para detectar las posibles fallas operacionales del sistema así como determinar la humedad del Nepe seco para verificar el cumplimiento de las especificaciones de la empresa y las condiciones de operación actuales del proceso. A su vez, se realiza un análisis de las variables que inter-

* Autor para correspondencia

Correo-e: mcrc63@yahoo.com (Rodríguez C., María)

vienen en el proceso mediante una tormenta de ideas reflejada en el diagrama causa-efecto, donde se seleccionaron las más influyentes sobre la calidad del Nepe seco. Las mejores condiciones de operación del proceso se determinan realizando un estudio estadístico sobre las variables más influyentes en la calidad de Nepe seco utilizando como herramientas un diseño de experimento factorial 2^3 y una superficie de respuesta, herramientas suministradas por el software STATGRAPHICS.

El mejoramiento del proceso de secado del Nepe contribuye a obtener un producto de calidad para el mercado agro-industrial, favoreciendo la venta del mismo y por consiguiente disminuyendo el impacto ambiental que genera el desecharlo, creando un proceso controlado y generando más ganancias para la empresa.

2. Metodología

2.1. Descripción de los sistemas que integran el proceso de secado del Nepe

Para comprender los sistemas que integran el proceso de secado del Nepe, se procedió a inspeccionar el área que ocupa, se entrevistó el personal involucrado en el proceso, revisión de manuales de operación y diseño de los equipos [1–3] y con esta información se conocieron las etapas involucradas en proceso, así como las fallas operacionales del mismo, confirmadas con el personal involucrado.

2.2. Determinación de las condiciones de salida del Nepe del proceso de secado

Se determinaron las condiciones de salida del Nepe y desecho del proceso tales como: humedad, flujo másico y caracterización de los lodos descargados por el lavador de vapor (scrubber), verificando de esta forma el cumplimiento de la calidad del producto con las especificaciones de la empresa [2] y el control de desechos del proceso que son tratados por la planta de tratamiento de aguas residuales.

La humedad de Nepe seco fue obtenida por el método tradicional para la determinación de humedad de sólidos [3,4], el flujo másico fue determinado mediante un balance de masa [5–8] en el sistema de estudio, y las variables demanda química de oxígeno (DQO) [9–10], concentración de fósforo y sólidos suspendidos totales (SST) [9–10] vinculadas con las características de los lodos emitidos por el scrubber se procesaron siguiendo el instructivo de inspección, medición y/o ensayo de la empresa en estudio [3].

2.3. Análisis de las variables involucradas en el proceso de secado del Nepe

Se utilizó un diagrama de Causa-Efecto (6M) [11] para establecer las variables más influyentes en el proceso de secado del Nepe. Por medio de seis categorías fundamentales denominadas las seis «M»: Mano de obra, Maquinaria, Materiales, Métodos, Medición y Medio ambiente, las categorías se agruparon en la herramienta gráfica conocida como diagrama causa-efecto, donde se ubicaron las categorías y se determinaron las variables del proceso.

La construcción del diagrama se realizó, como recomienda la bibliografía [11], mediante una tormenta de ideas producidas en una reunión en planta, donde participaron los superintendentes del área de elaboración, coordinador de proyectos de la planta y pasante del área.

2.4. Determinación de condiciones óptimas de operación

La herramienta que se empleó en esta fase fue la creación de una superficie de respuesta, la cual es una estrategia experimental y de modelación que permite encontrar condiciones de operación óptima del proceso de secado para mejorar la calidad del Nepe. Se utilizó el programa estadístico STATGRAPHICS PLUS versión 5.1, el cual permite hacer el estudio de forma interactiva. La superficie de respuesta se realizó empleando un diseño de experimento tipo factorial [12–14], a las tres secadoras involucradas en el proceso, el diseño relaciona la interacción entre las tres variables a dos niveles de operación. Para encontrar las mejores condiciones de operación se verificó la influencia de cada factor sobre la variable de respuesta (humedad del Nepe seco) mediante un seguimiento gráfico a las interacciones del diseño de experimento, un análisis en la ANOVA y al diagrama de pareto estandarizado [11] emitidos por el software.

2.5. Comparación de las condiciones de salida del nepe antes y después de manipular las variables

Se realizó una corrida experimental en el proceso una vez implementadas las mejoras, y por medio de correlaciones estadísticas se determinó el porcentaje de incremento en el flujo de Nepe seco y en la humedad del mismo, verificando las mejoras obtenidas en éstos. Adicionalmente, se caracterizaron los lodos emitidos por el scrubber siguiendo la misma metodología expuesta anteriormente.

Tabla 1: Condiciones de operación de los equipos involucrados en las secadoras del proceso del secado del Nepe y medidores instalados

Equipos	Material que transporta	Condiciones de operación												Medidor	Observaciones
		Porcentaje de frecuencia de velocidad (V±1) %			Temperatura de operación (T±1) %			Presión (P±0.01)bar			Humedad (H±1) %				
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Secadora	Nepe húmedo, levadura	3	3	3	76	77	65	1.65	1.13	0.70	7	8	8	Humedad, temperatura y presión	El medidor de humedad presenta fallas de lectura
Tolva de alimentación	Nepe húmedo	13	13	15	NA			NA			NA			Nivel	Falta medidor de flujo
Tomillo sin fin 1	Nepe húmedo, levadura	87	87	87	NA			NA			NA			Frecuencia	-
Tomillo sin fin 2	Nepe húmedo, levadura	102	102	51	NA			NA			NA			Frecuencia	-
Mezclador	Nepe húmedo, levadura	150	265	230	NA			NA			NA			Frecuencia	Se sobrecarga y se apaga
Scrubber	Agua, Nepe	NA			NA			0.15			NA			Presión	Hay taponamiento

3. Análisis y Discusión de resultados

3.1. Sistemas que integran el proceso de secado del Nepe

El proceso de secado del Nepe esta constituido por tres hornos rotatorios (secadoras) que llevan a cabo la función de retirar humedad al material (Nepe) que se le está suministrando, para así obtener un producto con una humedad establecida (5–8 %), que satisfaga las exigencias del mercado de dicho producto. Cada secadora esta conformada por un sistema de equipos que trabajan bajo las condiciones de operación establecidas por la empresa (Tabla 1), los cuales se verificaron mediante una inspección realizada en el área del proceso, observándose fallas operacionales que disminuyen la eficiencia de la faena diaria.

Estas problemáticas también fueron confirmadas mediante entrevistas con el personal que laboran en la planta, tales como los operadores, supervisores, analistas, superintendente del área, y personal involucrado con el proceso.

Es notable la necesidad de aplicar una reingeniería en el proceso de secado del Nepe debido a que las fallas expuestas afectan la calidad del material, disminuye la producción del Nepe seco y limita el control de las variables de operación del sistema, operando el proceso con baja eficiencia por reprocesamiento de material fuera de especificación de calidad de la empresa.

3.2. Condiciones de salida del nepe y subproducto del proceso de secado

La humedad a las muestras tomadas a la salida de las tres secadoras (Tabla 2), están fuera del rango de proceso de la empresa, entre 5–8 %.

Tabla 2: Humedad del nepe seco de acuerdo a las condiciones de operación que trabajan cada secadora

Secadora	Velocidad de alimentación del Nepe (V ± 0,01) rpm	Temperatura de operación (T ± 0,01)° C	Humedad del Nepe seco (H ± 0,01) %	Porcentaje de desviación estándar (D ± 0.1) %
1	2,17	75,53	1,50	70,0
2	1,63	76,56	1,40	72,0
3	1,88	65,42	3,50	30,0

El producto sale con una humedad entre 1,4–3,5 %, este rango tan bajo puede ocasionar explosiones, además que genera pérdidas de producto al ambiente. Presentando una desviación entre 30–72 %, lo que conlleva a realizar un estudio que permita encontrar condiciones de operación que mejoren la calidad del producto. La velocidad de alimentación del nepe a las secadoras debería estar cerca a 3 rpm y en realidad oscila entre 1,63 a 2,17 rpm, esto permite que el nepe tenga menos humedad a la salida de las secadoras. Los resultados obtenidos mediante la caracterización de los lodos (subproducto del secado) están reportados en la Tabla 3, observándose que se encuentran por encima de lo exigido por la norma de la empresa para la unidad de cedazo (Fósforo < 40ppm, SST < 900ppm y DQO < 6500 ppm), unidad donde llegan las aguas residuales de la empresa en la planta de tratamientos de aguas residuales (PTAR).

3.3. Análisis de las variables más influyentes en el proceso de secado del Nepe

Las variables a analizar en el proceso de secado del Nepe se muestran la Figura 1. Analizando el factor la

Tabla 3: Características de los lodos descargados por el scrubber del proceso de secado del Nepe

Día	Demanda Química de Oxígeno (DQO $\pm 0,1$) ppm	Fósforo (P $\pm 0,01$) ppm	Sólidos suspendidos totales (SST $\pm 0,1$) ppm
1	1600,00	45,07	74000,00
2	9600,00	42,07	83267,00

mano de obra, fue descartada, debido a que a la hora de contratar al personal involucrado con el proceso, se garantiza que posean un perfil calificado, además la empresa los motiva y capacita de ser necesario.

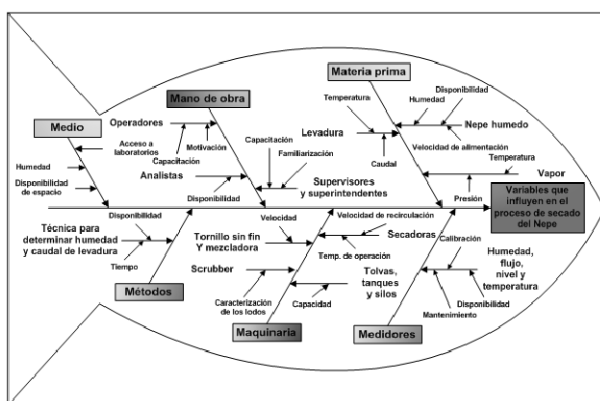


Figura 1: Diagrama causa-efecto que permite determinar las variables más influyentes en el proceso de secado del Nepe.

El factor medio ambiente no afecta, ya que el proceso está en un circuito cerrado y no existen contaminantes, y tampoco diferencias a la hora de tomar las muestras, por lo tanto fue descartado para el análisis, así como el factor métodos, ya que todos los análisis fueron realizados bajo las mismas condiciones. El factor de medidores no fue considerado para el análisis, ya que a los medidores existentes se le realizan continuamente calibración y mantenimiento.

El factor **medio ambiente** no afecta, ya que el proceso está en un circuito cerrado y no existen contaminantes, y tampoco diferencias a la hora de tomar las muestras, por lo tanto fue descartado para el análisis, así como el factor métodos, ya que todos los análisis fueron realizados bajo las mismas condiciones. El factor de medidores no fue considerado para el análisis, ya que a los medidores existentes se le realizan continuamente calibración y mantenimiento.

El factor **maquinaria**, los equipos más influyentes son las secadoras y la variable a controlar es la temperatura de secado, ya que al modificarla se ve afecta-

da la humedad del nepe seco. El factor **materia prima**, la humedad de entrada del nepe oscila entre 73–75 %, se puede considerar constante; La temperatura de la levadura es constante, sin embargo, la velocidad de alimentación del nepe y el caudal de la levadura son variables influyentes sobre la humedad, ya que estas son manipuladas por los operadores. La temperatura, presión y flujo de vapor son constantes para el estudio. Una vez realizado el descarte, (Figura 2), se establecieron como variables influyentes en el proceso de secado: la velocidad de alimentación del nepe húmedo, la temperatura de operación y el caudal de alimentación de la levadura.

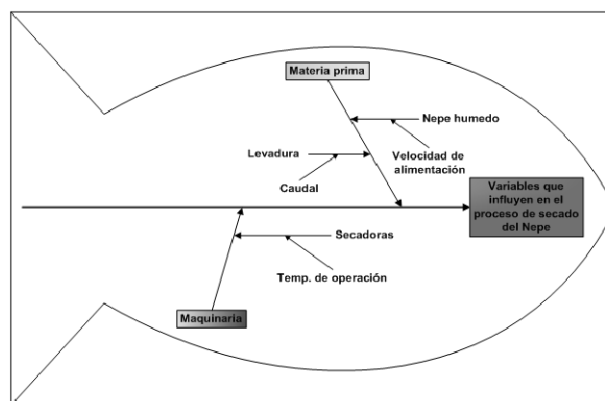


Figura 2: Diagrama causa-efecto con las variables más influyentes en el proceso de secado del Nepe

3.4. Determinación de condiciones óptimas de operación

El diseño de experimento factorial resultó 2^3 , consistió en modificar las tres variables influyentes, velocidad de alimentación del Nepe húmedo, caudal de levadura y temperatura de operación de las secadoras, a dos niveles de variación. Una vez desarrollado el experimento se realizaron 24 muestras por secadora. Estableciendo como hipótesis nula (H_0) que «la velocidad de alimentación de Nepe húmedo, el caudal de levadura y la temperatura de operación no son influyentes en la humedad de Nepe». Los parámetros estadísticos suministrados por el software, se muestran en la Tabla 4.

La hipótesis nula se rechazó, ya que todas las significancias (p -value) fueron menores a 0,05, como se observa en la Tabla 4. Por lo antes expuesto, se corroboró que las variables seleccionadas son influyentes y si afectan al proceso de secado del Nepe. Los valores óptimos de operación para cada secadora se muestran en la Tabla 5.

Tabla 4: Parámetros estadísticos involucrados en el análisis de las variables más influyentes en el proceso de secado del Nepe

Variables	Significancia calculada (p-value $\pm$ 0,0001) adim		
Secadora	1	2	3
Velocidad de alimentación del Nepe	0,0000	0,0000	0,0000
Caudal de alimentación de levadura	0,0065	0,0009	0,0001
Temperatura de operación	0,0037	0,0000	0,0000

Tabla 5: Punto óptimo de operación de las secadoras involucradas en el proceso determinado por el programa STATGRAPHICS

Secadora	Velocidad de alimentación del Nepe húmedo (Vn $\pm$ 0,1) rpm	Caudal de alimentación de levadura (C $\pm$ 0,1) L/h	Temperatura de operación (T $\pm$ 0,01) °C	Humedad del Nepe seco óptima (H $\pm$ 0,1) %
1	2,6	1300,00	77,68	6,5
2	3,5	200,00	75,42	6,5
3	3,0	200,00	75,38	6,5

Las velocidades de alimentación del Nepe húmedo son superiores a las condiciones de operación que se tenían en la planta al inicio de la investigación, ver Tabla 2; esto repercute en un incremento de humedad a la salida. Al incrementarse la velocidad el producto, ocasiona que el nepe tenga menos tiempo de exposición con el calor que suministra el vapor, por lo tanto, se evapora menor cantidad de agua y se incrementa el porcentaje de humedad del Nepe a la salida, como se ve reflejado en la Tabla 5. Cabe destacar que el software también reporta diagramas de pareto para cada secadora (Figura 3).

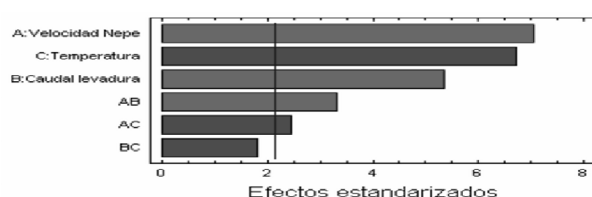


Figura 3: Diagrama de pareto estandarizado para la humedad del Nepe a la descarga de una secadora

Analizando la Figura 3, se encontró que las variables que tienen mayor influencia en la variable respuesta son: la velocidad de alimentación del Nepe (A), la temperatura de secado (B) y el caudal de levadura (C), así como, las variaciones de A inciden sobre B y en menor proporción afectan a C, que repercuten sobre la humedad del Nepe seco. Cabe destacar, que la influencia entre BC, no presentan mayor incidencia sobre la

humedad del producto final, ya que están por debajo de la línea que representa el nivel mínimo de influencia sobre la variable respuesta y la que presenta mayor influencia es la variable A, ya que es la barra que la representa es la de mayor tamaño.

3.5. Comparación de las condiciones de salida del nepe antes y después de manipular las variables más influyentes

Para verificar, si las condiciones encontradas en la Tabla 5, logran el porcentaje de humedad deseado, se realizaron los ajustes necesarios en el proceso y los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Comparación de la humedad y del flujo másico de Nepe seco antes y después de manipular las variables más influyentes en el proceso de secado

Secadora	Velocidad de alimentación del Nepe húmedo (Vn $\pm$ 0,1) rpm	Caudal de alimentación de levadura (C $\pm$ 0,1) L/h	Temperatura de operación (T $\pm$ 0,1) °C	Humedad del Nepe seco óptima (H $\pm$ 0,01) %
1	2,6	1300,00	77,0	4,32
2	3,5	200,00	75,0	6,21
3	3,0	200,00	75,0	6,27

Para las secadoras 2 y 3, los valores son muy cercanos a los obtenidos por el software; y entran dentro de los parámetros de calidad. Sin embargo, la secadora 1 presentó fallas mecánicas, que limitaron la recolección de las muestras durante estas pruebas, incluso ocasionó la salida de operación del equipo. Al instalar las condiciones óptimas de operación en el proceso, se procedió a caracterizar nuevamente los lodos que descarga el Scrubber a la PTAR, los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Características de los lodos descargados por el scrubber del proceso de secado del Nepe después de manipular las variables más influyentes

Día	Demanda Química de Oxígeno (DQO $\pm$ 0,1) mg/L	Fósforo (P $\pm$ 0,01) mg/L	Sólidos suspendidos totales (SST $\pm$ 0,1) mg/L
1	8000,00	48,97	39475,00
2	9200,00	50,74	28620,00

La variable de la caracterización de los lodos más importante para el proceso de secado del Nepe a evaluar son los sólidos suspendidos totales (SST), ya que ésta representa de cierta forma la cantidad de Nepe que se puede estar perdiendo por el Scrubber, al comparar este

parámetro con el determinado al inicio de la investigación (Tabla 3), se observa que los SST disminuyeron al implementar los puntos óptimos en las secadoras, esto representa que el proceso está retirando mayor cantidad de agua, es decir, que la operación de secado es más eficiente, disminuyendo las pérdidas de Nepe por el equipo.

Al comparar las condiciones de salida del Nepe seco y del subproducto del proceso se verifican las mejoras ocurridas en la calidad del producto y en la operación del sistema al establecer una combinación de las variables que llevasen a cabo la optimización.

4. Conclusiones

- La humedad en el Nepe seco no cumplía con las especificaciones de calidad de la empresa.
- Los parámetros de control de los lodos producidos por el Scrubber se encuentran por encima de lo exigido por la norma de la empresa para la unidad de cedazo de acuerdo a la inspección realizada en el área.
- Las variables más influyentes en el proceso de secado del Nepe son la velocidad de alimentación de Nepe húmedo, el caudal de alimentación de levadura y la temperatura de operación de las secadoras involucradas en el sistema.
- Los puntos óptimos de operación determinados por el programa Statgraphics para obtener un Nepe seco de 6,5 % de humedad fueron: Secadora 1: Velocidad de alimentación de Nepe húmedo 2,6 rpm, caudal de alimentación de levadura 1300,0 L/h y temperatura de operación 77,68°C, Secadora 2: Velocidad de alimentación de Nepe húmedo 3,5 rpm, caudal de alimentación de levadura 200,0 y temperatura de operación 75,42°C, Secadora 3: Velocidad de alimentación de Nepe húmedo 3,0 rpm, caudal de alimentación de levadura 200,0 L/h y temperatura de operación 75,38°C.
- La humedad del Nepe seco producido por las secadoras número uno, dos y tres al operar a las condiciones óptimas resultaron 4,32 %, 6,21 %, y 6,27 % respectivamente.
- La cantidad de sólidos suspendidos en los lodos producidos en el Scrubber disminuyeron al instalar los puntos óptimos de operación en el sistema.

Referencias

- [1] Manual de empresa cervecera. (2005). «Proceso de elaboración de Cerveza». Venezuela.
- [2] Manual de Normas de especificaciones de calidad de la empresa cervecera. (2007). Venezuela.
- [3] Instructivo de inspección, medición y/o ensayo de la empresa cervecera. (2005). Venezuela.
- [4] Glaria, J., PAVEZ M. y PAVEZ, J. (2000). «Medición de humedad en sólidos». Chile. [Documento en línea]. Disponible en: <http://profesores.elo.utfsm.cl/~jgb/PAVEZc.pdf>. [Consulta en Septiembre, 2007].
- [5] Himmelblau, D. (2002). «Principios básicos y cálculos en ingeniería química». 6ta. edición. Pearson Educación. México.
- [6] Perry, Robert. (2001). «Manual del ingeniero químico». Editorial McGraw-Hill. 7ma. edición. México.
- [7] Geankoplis, Christie. (1998). «Procesos de transporte y operaciones unitarias». Editorial Continental. 3ra. edición. México.
- [8] McCabe, W. y Smith, J. y Harriott, P. (2001). «Operaciones Unitarias en Ingeniería Química». Editorial McGraw-Hill. 6ta. edición. España.
- [9] Manual Técnico del Agua. (1973). Editorial Grafo. Sociedad de Degremont. Francia.
- [10] Manual Tratamiento Químico del Agua. (1998). Editorial Impregraf. Venezuela.
- [11] Hambleton, L. (2007). «Treasure Chest of six sigma. Growth methods, tools and best practices». Editorial Prentice Hall. USA.
- [12] Gutierrez, H. y De la Vara, R. (2004). «Análisis y diseño de experimentos». Editorial McGraw-Hill. México.
- [13] Melo, O. y López A. (2007). «Diseño de experimentos. Métodos y aplicaciones», Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
- [14] García, R. (2004). «Inferencia estadística y diseño de experimentos». Editorial Eudeba. Argentina.