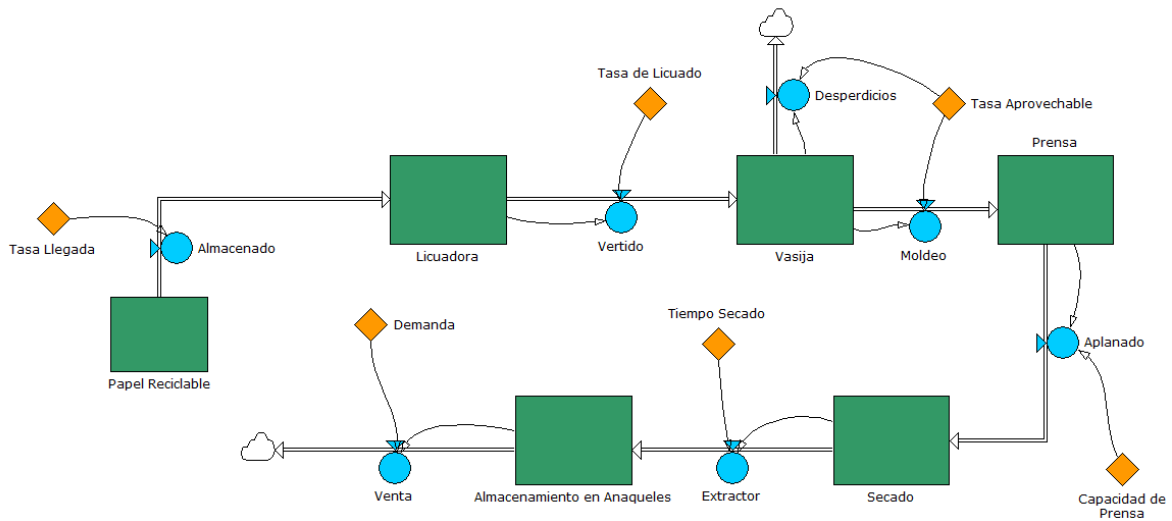


Caso de Estudio

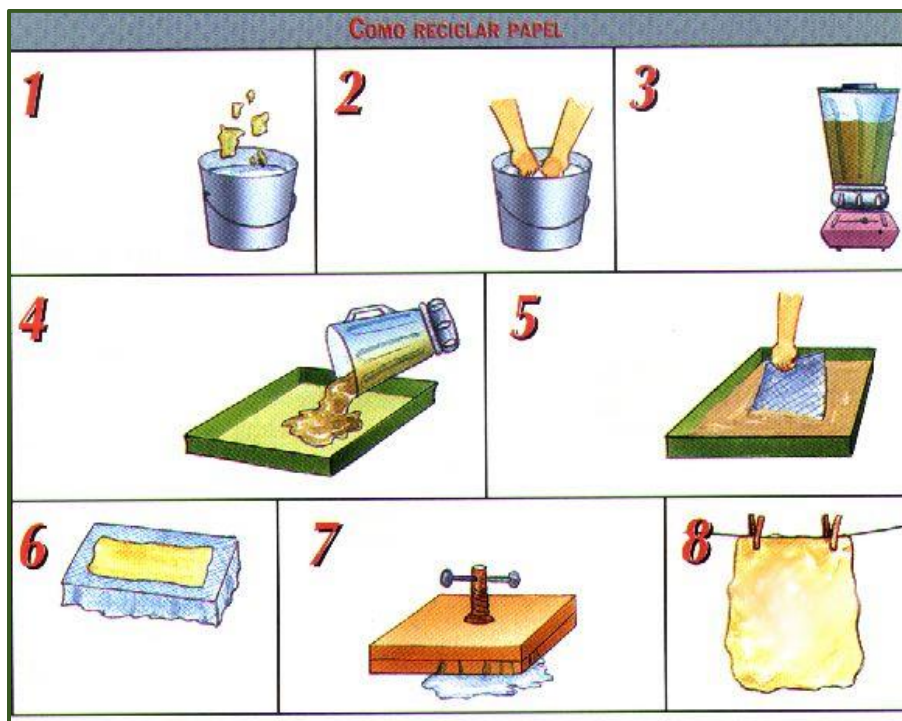
La empresa familiar Papelex tiene instaurado proceso artesanales para:

- Transformar materiales para la industria de marquillas, etiquetas, empaques, tarjetería, manualidades e impresiones.
- Fusionado de materiales para la elaboración de papel.

Todo lo anterior, a partir de papel reciclado. Los procesos pueden ser resumidos en el siguiente gráfico:



El siguiente dibujo resume el procedimiento:

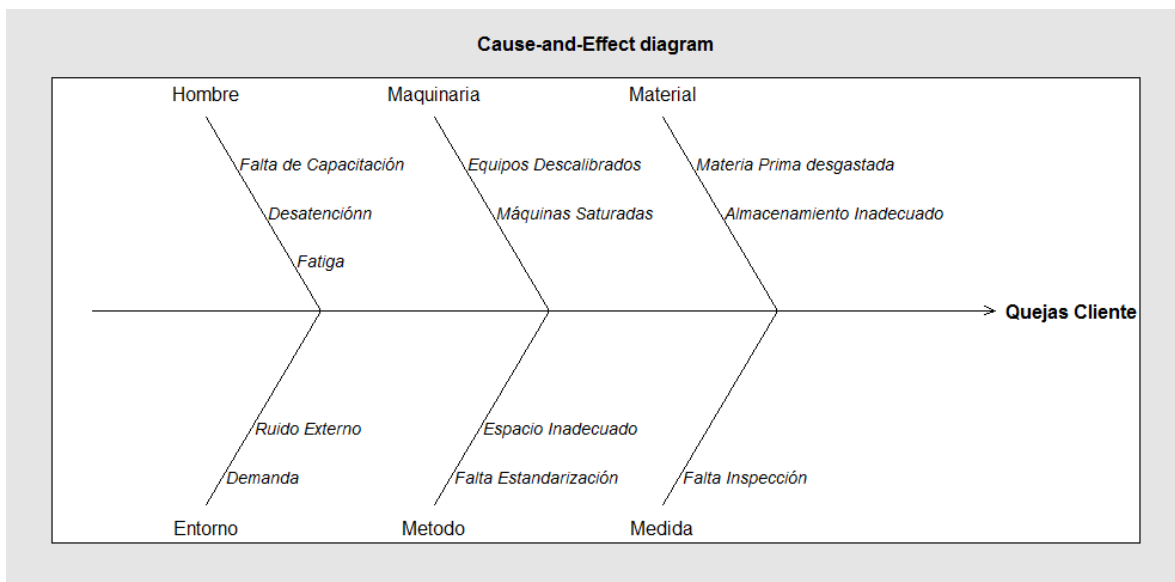


Recientemente, el dueño de la empresa Papelex ha expresado inconformidad con el proceso de producción de hojas de papel, dado que este se ve afectado, aparentemente, por la falta de capacidad de producción (limitación de procesar más materia prima) pues hay factores como el tiempo de elaboración de la pulpa y tiempos de secado. Adicionalmente, sus clientes (principalmente de la industria textil que compra cartones y papel para sus marquillas y etiquetas) se han quejado por la irregularidad y mala calidad de las hojas.

Ante ello, el dueño ha contactado a ingenieros de la UdeA para consultarles sobre la situación. Un estudiante le aconseja realizar un Control Estadístico de Procesos. Ante la falta de conocimientos del gerente, el estudiante lo guio a este logro, tal como se relata a continuación:

Primero era necesario asegurar algún tipo de cultura de la calidad en la empresa. Debido a los pocos empleados de esta (10 en total) y debido al hecho de que todos son familiares (o personas cercanas), todos se mostraron dispuestos en aceptar cambios en sus puestos de trabajo y permitir la medición del mismo. Luego, es necesario identificar las causas bajo las cuales el proceso está fallando.

Para ello, se recurre a la técnica del Análisis y Modo de Falla, en el que a partir de unos problemas potenciales del proceso se analizan cuáles son las causas, efectos y modos de detección temprana. Para facilitar la caracterización de los efectos se basó en las quejas que generalmente dan a conocer sus clientes y para las causas inicialmente se implanto el siguiente diagrama causa efecto:



Tras ello fue más fácil generar el siguiente AMEF:

Fecha de Realización: 05/03/2020			Elaborado Por: Jhon Esteban Arredondo Parra						
Producto o Proceso: Elaboración de Hojas de Papel Reciclado									
Función	Falla	Efecto de Falla Potencial	Severidad	Causas de la Falla Potencial	Ocurrencia (Frecuencia)	Controles Actuales: Prevención y detección	Detección	MPR	Acciones Recomendadas
Transformar Materia Prima reutilizable (Hojas de Papel) para su reutilización en productos rutinarios	Peso y/o grosor de hoja inadecuado	Dificultad de Almacenamiento	3	Mal Escurrido por parte del operario y/o prensa descalibrada	2	Ninguna	5	30	Manejar diferentes moldes
		Queja Cliente							Crear sistema de medición
	Textura no uniforme (rugosidades)	Venta como producto Defectuoso	4	Prensa Descalibrada	5	Mantenimiento	5	100	Crear sistema de verificación final
		Devolución Producto		Materia Prima con Impurezas		Ninguna			Crear Plan de Muestreo para la recepción de MP
	Longitudes fuera de especificación	Venta como producto Defectuoso o Desechado	4	Instrumentos inadecuados	3	Medición por Comparación final	4	48	Manejar moldes de Dimensiones (Poka Yoke)
		Dificultad de Embalaje		Descuido del operario		Llamados de Atención			Inspección durante el proceso
		Reprocesos							Disminuir fuentes Externas que irrumpen durante el proceso (ruido, conversaciones, etc.)

Es de destacar que se identifican principalmente 3 problemas o fallas del producto, cada uno de ellos con causas diversas. Además, la mayoría tiene en común que no existe un control actual ni ningún tipo de inspección o medición al final del proceso. Sin embargo, de los 3 modos de falla, 1 pareciera no ser muy destacable o riesgoso (Peso) por lo que en éste se hará menor énfasis y, tal como se evidenciará más tarde, solo se tendrá en cuenta para situaciones particulares

Por lo anterior, se decide iniciar con inspecciones de los productos (Hojas de Papel) al final del proceso (tras el secado). De este secado, se puede sacar un lote de hojas de papel cada 3 horas, sabiendo que la empresa labora 12 horas diarias 5 días de la semana, es decir, se obtienen en 4 lotes diarios. Existen pedidos especiales (de los que se hablará más adelante) que son realizados los sábados. Para ello se implementarán diversas cartas de control, cada una representará el comportamiento de una variable diferente y de interés para Papelex:

- **Carta $\bar{X} - R - S$:** Es de interés la longitud de las hojas de papel. Las dimensiones que se manejan en el mercado son 594 x 420 mm (A2). Se sabe, por la forma del molde improvisado por los operarios que el ancho de hoja no varía significativamente, por lo que se enfatiza en el largo, sobre el cual la mayoría de los clientes de Papelex (tras haberlos contactado) concuerdan en que debe estar entre 592.5 y 595.5 mm. Se pretende por medio de la Carta \bar{X} evaluar la diferencia media entre subgrupos de muestra elegidos, y con las $R - S$ evaluar la diferencia de longitudes entre hojas de un mismo subgrupo. Note que será importante definir una cantidad de subgrupos (puntos) de la carta de control y el tamaño de estos. Para el primero se toma una premuestra de 11 hojas a las que se le mide la longitud, luego la cantidad m de subgrupos esta dado por:

$$m = \frac{4s^2}{E^2} = 72$$

De donde $s^2 = 0.63$ es la varianza de la premuestra y $E^2 = 0.15$ un error máximo definido a partir de lo que se cree puede tolerar los clientes en cuanto a errores de medida

Además, n se calcula a partir de la tolerancia, que, para el caso, se tomará como la variación de la especificación (± 1.5 mm) multiplicada por el error de medición que de la cinta métrica (en este caso de ± 1 mm). De allí que al usar la ecuación:

$$1 - \beta = 1 - |\Phi[3 - \tau \cdot \sqrt{n}] - \Phi[-3 - \tau \cdot \sqrt{n}]| = 0.83, \text{ alcanzado con un } n=7$$

Debido a que $n < 10$, se decide usar solo la carta **R** dado que esta es más práctica para muestras pequeñas que la **S**. Es importante resaltar que la interpretación de ambas es exactamente igual.

- **Carta NP y P:** Se sabe que muchas hojas de papel tienen que venderse a menor precio a otros clientes minoritarios porque estas hojas presentan condiciones inadecuadas para procesos industriales. El proceso de inspección que se hará al final del proceso permitirá conocer la cantidad de hojas de un lote que son defectuosas. En concreto, la carta NP muestra el total de papeles defectuosos obtenidos de una muestra fija y la carta P se interpreta como la proporción de defectuosos de una muestra que puede ser o no fija.

Es importante resaltar que, para las cartas por atributos, no se revisa la misma cantidad n de hojas (se revisará una cantidad correspondiente al 15% del lote), sin embargo, se mantiene la cantidad de subgrupos $m=72$.

Debido a la variabilidad del proceso productivo en la que no siempre es posible tomar la misma cantidad de hojas para analizarlas, se decide usar solo la carta P que a diferencia de la carta NP, tiene la característica de variar la cantidad n de productos revisados y los límites variables. Los clientes esperan que aproximadamente el 5% de los papeles sean defectuosos.

- **Carta C y U:** La falla que más preocupa a la empresa, según el análisis AMEF, debe ser la cantidad de rugosidades que están teniendo sus hojas. En particular estas pueden ser debidas tanto por la materia prima como por el proceso mismo. Por ello, un primer paso para controlar esta variable de defectos es por medio de las cartas C (que mide el total de desperfectos de una muestra) y la U (que mide el promedio de rugosidades por hoja de una muestra). Dada la situación planteada anteriormente de que no es posible revisar todas las hojas de un lote de producción y que el tamaño de este es variable, se decide optar solo por la U
- **Carta Individual:** Finalmente, se debe plantear un caso particular que tiene la empresa. Uno de sus clientes más fieles realiza pedidos especiales de manera eventual. Estos pedidos tienen además la particularidad de ser un poco más grandes que los normales y que para el cliente no le interesa el tamaño de hoja ni la textura de la misma, solo interesa el peso. Por ello, el cliente pesa cada lote cuando lo recibe, el dato de esta medida es notificado a Papelex y con base en eso se puede generar una carta Individual. La decisión de esta carta para este caso particular dentro de la empresa se debe a la eventualidad de las mediciones y a que no es posible crear grupos de varios lotes. En promedio, este peso debe ser de 35kg. *Esta carta, se construye con datos históricos, debido a la su irregularidad.*

Las cartas serán construidas con una significancia del 0.0027, y la potencia de prueba con $n=7$ se estimó como 0.833. Según esta información podemos calcular los siguientes índices:

$ARL_0 = \frac{1}{\alpha} = 370$, es decir, cada 370 subgrupos se esperaría una falsa alarma (señal de que el proceso está fuera de control, cuando está controlado). Es decir, cada $ATS = ARL * Tiempo = 370 * 4h = 1480h = 61,67 \text{ días}$ se espera un punto que indique una situación anormal, suponiendo que el proceso está bajo control.

Además,

$ARL_1 = \frac{1}{1-\beta} = 1.2$, es decir, los efectos de una causa asignable se percibirán en el comportamiento de la carta cada 1.2 subgrupos, un resultado que permite asegurar que los comportamientos que se vean en la carta tienen causas asignables en los tiempos en que fueron producidos esas mismas hojas.

Tras el pasar los días, se logra obtener las siguientes cartas:

Pongo las cartas...

- **Carta \bar{X} – R:** La carta X presenta un desplazamiento superior, en donde la media de longitud de algunos lotes de papel aumentó a un nuevo nivel y permanecieron hasta allí por aproximadamente 2 días hasta que se dio el llamado de atención al operario de escurrido y armado. Estos 2 días coinciden con la época en que había eliminatorias de los equipos de la Conmebol al Mundial 2022. Justo tras ese llamado de atención, se presenta un comportamiento de variabilidad alta en la carta R, debida a un intento infructuoso del operario de sobre medir (corregir) sus errores pasados. Finalmente, las cartas se estabilizan.
- **Carta Individual:** Se presentan ciclos, esto presuntamente debido a los pedidos sistemáticos del cliente. Se recomienda hacer contratos de producción con el mismo para asegurar este proceso.
- **Carta P:** Hay variabilidad baja por la incapacidad del operario de inspección de diferenciar entre hojas buenas y defectuosas. Es decir, problemas con la sensibilidad del instrumento. **Para arreglar un poco esto, se hace R&R**
- **Carta U:** Hay tendencias crecientes y decrecientes. Esto puede ser bien debido a la heterogeneidad de algunos lotes recibidos de materia prima (**luego de definir que para esto se hace muestreo a los proveedores**), o bien por la acumulación de grumos y desperfectos en la vasija y des calibración gradual de la prensa.

Los siguientes son los histogramas de los 4 tipos de datos, donde se evidencia que las 4 variables críticas siguen, en apariencia, una distribución normal.

Histogramas (2,2) Constató que las cartas tienen a una normal.

Como se evidencia, todas las cartas presentan comportamientos no aleatorios, por lo que el proceso no está bajo control estadístico. Por ello, se debe proceder a dar solución a algunas de las problemáticas que acabamos de evidenciar por medio de AMEF y que se reflejan en las cartas de control.

- **Cartas \bar{X} – R:** Para el problema de las longitudes se evidenció que la causa radica en la concentración y capacidad del operario. Se propone, primero, prohibir que los empleados realicen actividades extras durante los procesos (como conversaciones largas, escuchar medios audiovisuales, etc.) especialmente durante el escurrido y posicionamiento en la prensa. Estos son los subprocessos críticos en donde puede variar la longitud. Tras implementarlo se llega a las siguientes cartas donde ahora no se detectan comportamientos no aleatorios significativos.

Cartas normales...

- **Carta Individuales:** Como se mencionó anteriormente, se propone afianzar y sistematizar la producción de lotes especiales para el cliente de grandes pesos.
- **Carta P:** La carta de la fracción defectuosa se encontró que los operarios (3) que hacen las inspecciones finales no tenían claro los criterios bajo los cuales debían catalogar una hoja como defectuosa. En ese sentido, se debe capacitar los empleados en las razones bajo las que deben rechazar un papel: Longitud y textura. Durante la capacitación se mostraron claros con respecto al criterio de la textura (que esta no debe presentar ningún tipo de grumo o rugosidad sobresaliente en su superficie), sin embargo, se sintieron inseguros respecto a lo que debían realizar para medir la longitud de la hoja.

Para evaluar si los operarios (o el instrumento) están interfiriendo en las mediciones de las dimensiones, es decir, ellos provocan variabilidad en las medidas, se decide realizar un estudio R&R largo para evaluar la efectividad del sistema de medición actual.

Para ello, se aclaran los procedimientos de la medición a los operarios (como manejar la cinta métrica, donde apoyar la hoja, como posicionar la cinta, etc.). Luego, se eligen de manera aleatoria 10 hojas de papel, todas de un mismo lote de producción. Cada operario deberá medir cada hoja 2 veces, pero en un orden distinto. Por ejemplo, si el operario A en la primera ronda de mediciones inició con la hoja #3, para la siguiente ronda debe iniciar con una diferente.

Los resultados iniciales del estudio son mostrados en el siguiente formato:

Formato R&R largo a mano

De allí, se observa que el índice P/T sobrepasa por mucho al 30%, es decir, el método de medición es inadecuado. La causa de esto podría deberse a la repetibilidad puesto que es la presenta mayor variabilidad, es decir, los empleados tienen medidas similares entre ellos, pero al medir una hoja por segunda vez dan un resultado por mucho diferente al primero.

Para confirmar esto, podemos usar la librería SixSigma en R:

SixSigma

De allí se confirma que ni los operarios ni las piezas (diferencias naturales) son el problema. Por ello, se indica que el método de medición debe ser cambiado (también apoyado en el índice Nc que identifica solo un grupo estadísticamente diferente). Es decir, el instrumento actual es inaceptable en uso y resolución.

Por ello, se cambia la actual cinta métrica por otro flexómetro con un error marginal de 0.5 mm. Tras conseguirlo, se realiza un nuevo estudio R&R analizado a continuación en la librería SixSigma de R.

R&R 2

Gage R&R

	VarComp	%Contrib
Total Gage R&R	0.1314236	31.22
Repeatability	0.1314236	31.22
Reproducibility	0.0000000	0.00
Operator	0.0000000	0.00
Part-To-Part	0.2895158	68.78
Total Variation	0.4209394	100.00

	VarComp	StdDev	StudyVar	%StudyVar	%Tolerance
Total Gage R&R	0.1314236	0.3625239	2.175144	55.88	72.50
Repeatability	0.1314236	0.3625239	2.175144	55.88	72.50
Reproducibility	0.0000000	0.0000000	0.000000	0.00	0.00
Operator	0.0000000	0.0000000	0.000000	0.00	0.00
Part-To-Part	0.2895158	0.5380667	3.228400	82.93	107.61
Total Variation	0.4209394	0.6487985	3.892791	100.00	129.76

Number of Distinct Categories = 2

Ahora, los resultados indican que el sistema de medición no es afectado en lo absoluto por los operadores, es decir, el sistema es reproducible. Además, se disminuyó la variación intra sujeto, es decir, debida a las réplicas de cada inspector, por ende, podríamos concluir que ahora el método es repetible y que las variaciones surgidas en las mediciones son propias de la naturaleza de las hojas. Otro indicador importante es el número de distintas categorías, o N_c , que indica el número de grupos distintos que el sistema puede llegar a discernir. En este caso es capaz de diferenciar 2 tipos de grupos, por lo que el sistema de medición es aceptable en resolución.

De ahora en adelante, las mediciones no deberían interferir en el proceso de decisión entre defectuosos por longitud y hojas aceptables.

- **Carta U:** El otro defecto muy reconocible en las hojas recicladas son las rugosidades, que como la experiencia indica, se deben primordialmente a grumos de papel que no fueron bien licuados o que se solidificaron en la vasija. Sin embargo, existe otra posibilidad y es que el papel que este entrando a la empresa no cumpla con los criterios para ser reciclado (por ejemplo, si fue plastificado, adherido a sustancias solidas como pegamento fuerte, aluminio, muy manchado o húmedo, etc.).

Para hacer control a estas dos posibles fuentes de variación (creación de grumos en la vasija y materia prima inadecuada) se realizaron las dos siguientes líneas de acción:

- Por experiencia, se sabe que la generación de grumos es posible cuando el material licuado se deja por mucho tiempo sobre un recipiente, bien sea una vasija o la prensa. La forma más efectiva de evitarlo será crear un procedimiento de limpieza de estos instrumentos, con el fin eliminar las impurezas que se adhieran a las superficies de los mismos. En la actualidad, solo se hacían estos procedimientos de limpieza cuando se hacían evidentes los grumos adheridos a la vasija.

Adicionalmente, como se había evidenciado anteriormente, las rugosidades aumentaban siempre al inicio de la semana (lunes) con un patrón de tendencia y tras algunos lotes, se presentaba un nuevo descenso de los mismos. Ante esta particularidad, se cree que la limpieza debería efectuar los sábados, tras el último lote de producción especial, para asegurarse de que al lunes no se encontraran impurezas en la vasija que provocara rugosidades.

- La otra línea de acción tiene que ver con los proveedores. Se requiere saber que las hojas traídas por ellos para ser recicladas sean verdaderamente adecuadas para lo mismo. El proveedor más significativo, por su volumen de material, y que a la vez es cliente de Papelex, es Gomezul, quienes crean una variedad de papeles decorativos (globo, regalo, celofán, etc.). Tras largas negociaciones con la empresa, se llega al acuerdo de que Papelex solo recibirá lotes de hojas desechadas por Gomezul si es posible determinar que el porcentaje de papeles inadecuados es menor al 7%. A cambio de eso, Gomezul espera que Papelex reduzca su porcentaje de defectuosos a el 6%. Se consideran inadecuados aquellos papeles con signos de humedad, antiguos y manchados. Si un papel cuenta con al menos uno de estos defectos, es considerado defectuoso. El plan de muestreo formulado por Papelex es:

Se estima que N varía entre 1500 y 3000 papeles. Cómo se está iniciando en la implementación de muestreo, se usa el nivel general II, por ello contamos con la letra K. Ante la inquietud de si usar muestre simple o doble, se decide por el segundo, por la confianza que históricamente se ha tenido del proveedor se espera que no sea necesario

(la mayoría de las veces) revisar más de 100 papeles. Luego, $n_1=80$, $n_2=80$, $c_1=7$, $c_2=18$. Para decidir la aceptación o rechazo de un lote, se seguirá el siguiente diagrama de flujo.

Tras 1 mes desde el inicio de esta última medida correctiva, se lograron las siguientes cartas:

Poner cartas sin comportamientos no aleatorios. Debido a la falta de tiempo para más datos del peso (aun no ocurren muchos envíos especiales), esta no se vuelve a construir.

Luego de esto, es posible calcular los índices de capacidad como siguen:

- **Variables:** Se evalúa el CP y CPk. A partir de funciones de R se encuentra que estas son aproximadamente 0.889 y 0.886, respectivamente. Dado que el $C_p < 1$ aún no se logra un ajuste deseado, es decir, el proceso aun es incapaz de discriminar las diferencias de longitud, y por ende se corre el riesgo de no cumplir a cabalidad las especificaciones.
- **Atributos:**

¡Finalmente podemos concluir que ahora la empresa presenta control estadístico de la calidad, pese a que aún son requeridas varias mejoras del proceso!