

Diseño estadístico de cartas de control para datos autocorrelacionados

Statistical design of control charts
For autocorrelated data design
Of control charts

Rita Peñabaena Niebles*

Óscar Oviedo-Trespalacios**

Juan Guillermo Vásquez Cabeza ***

Laura Milena Fernández Cantillo ****

Universidad del Norte (Colombia)

* Grupo de Investigación de Productividad y Competitividad. Docente e investigador del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte (Colombia). rpena@uninorte.edu.co

**Grupo de Investigación de Productividad y Competitividad. Docente e investigador del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte (Colombia). ooviedo@uninorte.edu.co

*** Grupo de Investigación de Productividad y Competitividad. Universidad del Norte (Colombia). cabezaj@uninorte.edu.co

**** Grupo de Investigación de Productividad y Competitividad. Universidad del Norte (Colombia). mlfernandez@uninorte.edu.co

Correspondencia: Rita Peñabaena, Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad del Norte. Km 5 Vía antigua a Puerto Colombia, Barranquilla. Tel: 5-3509269.

Origen subvenciones: Este artículo fue financiado gracias al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación colombiano, Colciencias, con el proyecto No. 121552128846, contrato 651-2011.

Resumen

Este documento revisa la literatura relacionada con el diseño estadístico de cartas de control para datos autocorrelacionados y presenta los enfoques realizados por diversos autores en los últimos veinte años según tres categorías. La primera de ellas se refiere a las cartas de control basadas en residuales, la segunda corresponde a las modificaciones de las cartas de control y modelos que utilizan observaciones originales para disminuir la complejidad de aplicación que tienen las cartas de residuales, y una última categoría reseña brevemente algunos métodos de minería de datos aplicados al control estadístico de procesos correlacionados. Además, se identifican futuras áreas de trabajo como apoyo a los investigadores interesados en continuar con esta línea del conocimiento.

Palabras clave: Cartas de control con residuales, Cartas de control modificadas, Control de calidad, Minería de datos, Procesos autocorrelacionados.

Abstract

This paper reviews the literature on the statistical design of control charts for autocorrelated data and presents approaches proposed by several authors over the last 20 years, according to three categories. The first one relates to residuals-based control charts, the second corresponds to modified control charts and models based on original observations that aim at reducing the complexity of residuals-based control charts. The last category briefly reviews data mining techniques applied to correlated statistical processes. In addition, future research areas are identified to support researchers interested in this line of knowledge.

Keywords: Correlated process data, Data Mining, Modified Control Charts, Residuals-based control charts, Statistical quality monitoring.

Fecha de recepción: 14 de marzo de 2013
Fecha de aceptación: 20 de mayo de 2013

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, un proceso bajo control estadístico es aquel que genera datos independientes e idénticamente distribuidos [1]. En este caso, los procedimientos convencionales de control estadístico de procesos como las cartas Shewhart, cartas de media móvil exponencialmente ponderada (por sus siglas en inglés EWMA) y de sumas acumuladas (CUSUM por sus siglas en inglés) pueden ser aplicados con buenos niveles de desempeño. Sin embargo, con el aumento de la automatización, la información acerca del estado de los procesos se obtiene a tasas mayores, esto significa intervalos más cortos de medición que son más propensos a la presencia de autocorrelación en las observaciones [2].

Psarakis y Papaleonida [3] afirman que la autocorrelación está presente en los datos generados por procesos continuos y de producción por lotes, donde el valor particular del parámetro u observación en el tiempo depende de los valores previos. También aseguran que pequeños niveles de autocorrelación entre observaciones sucesivas pueden tener efectos negativos en las propiedades estadísticas de las cartas de control tradicionales propuestas por Shewhart en 1931. Por ello, varios investigadores [1], [4], [5], [6] han desarrollado métodos alternativos que presenten mejor desempeño que los métodos tradicionales para manejar los efectos de la autocorrelación. Uno de los métodos más comunes es el uso de modelos de series de tiempo, que ajusta los datos a un modelo adecuado y aplica cartas de control a los residuales. Este enfoque fue propuesto originalmente por autores como Alwan y Robert [1], y Wardell et ál. [7]. En la práctica la aplicación de modelos de series de tiempo para los residuales es compleja, por ello autores como Reynolds y Lu [8], y Atienza et ál. [9] diseñaron procedimientos que buscan simplificar su implementación a través del monitoreo directo de las observaciones originales.

Recientemente se ha afirmado en la literatura [10] que las cartas de control basadas en algoritmos de minería de datos como vector de soporte regresivo, redes neuronales o *multivariate adaptive regression splines* presentan un mejor desempeño comparado con las herramientas basadas en series de tiempo.

Este artículo recopila los avances más significativos de la literatura en el diseño estadístico de cartas de control para datos autocorrelacionados. Se

presentan, en orden temporal, los enfoques más significativos propuestos en los últimos veinte años, divididos en tres enfoques: cartas de control basadas en residuales, cartas de control convencionales modificadas y cartas de control con aplicaciones de minería de datos. Por último, se presentan las conclusiones y futuras líneas de investigación.

2. TRATAMIENTO DE DATOS AUTOCORRELACIONADOS EN CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

El principal efecto de utilizar datos autocorrelacionados para realizar control estadístico de un proceso es que genera límites de control estrechos, lo que provoca un incremento en la tasa de falsas alarmas y una disminución en la capacidad de detección de la carta. En consecuencia, la longitud promedio de corrida (ARL por sus siglas en inglés), la métrica de desempeño más popular, no se calcula correctamente. Una idea sencilla para evitar la autocorrelación consiste en el aumento del intervalo de muestreo; sin embargo, el uso ineficiente de los datos disponibles puede causar una disminución en la potencia de los gráficos de control [3]. Muchos autores [1], [8], [5], [6] han concentrado sus esfuerzos en desarrollar métodos que permitan el control estadístico eficiente de procesos autocorrelacionados.

Cartas de control basadas en residuales

Alwan y Roberts [1] resaltan que encontrar un proceso bajo control estadístico según lo planteado idealmente por Shewhart no es común, pues aparecen con frecuencia correlaciones y otros efectos sistemáticos de series de tiempos entre las variables. Esto conduce a serios errores en la aplicación de las cartas de control, por ello se desarrolló un método que ajusta los datos observados a través de un modelo de series de tiempo, que permite la aplicación de procedimientos estándares a los residuales de los valores ajustados. Como resultado de esta propuesta surgen dos cartas: la primera, en la que se grafican los valores ajustados, denominada carta de las causas comunes (CCC por sus siglas en inglés), y la segunda, la carta de las causas especiales (SCC por sus siglas en inglés), que grafica residuales luego de modelar la serie de datos mediante un proceso autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA por sus siglas en inglés). El problema en la aplicación de lo propuesto por Alwan y Roberts [1] es que la implementación resulta más compleja, dado que requiere de mayor habilidad en el análisis

de series de tiempo, así como conocimiento estadístico en relación con los procedimientos sugeridos por Shewhart originalmente.

Harris y Ross [11] estudiaron el efecto de la correlación en el desempeño de las cartas de media móvil exponencialmente ponderada (EWMA por sus siglas en inglés) y de sumas acumuladas (CUSUM por sus siglas en inglés). Concluyeron que la presencia de correlación entre observaciones genera una señal errónea del estado del proceso. Para solucionar esta situación propusieron modelar el proceso autocorrelacionado mediante modelos de series de tiempo y monitorear los residuales, obteniendo mejores resultados en contraste con el uso directo de los esquemas CUSUM, EWMA y Shewhart.

Wardell et ál. [12] comparan el rendimiento de las cartas tradicionales de Shewhart y las cartas EWMA en presencia de datos correlacionados, en contraste con las cartas diseñadas por Alwan y Roberts [1]. De igual forma, exploran la posibilidad de poner límites en la carta CCC para predecir anomalías de calidad. Los resultados de esta investigación muestran que la carta EWMA es eficiente para detectar cambios en la media de procesos cuando existe correlación en los datos, mientras que la carta de Shewhart rara vez detecta dichos cambios más rápidamente que las otras. También concluyen que las cartas SCC y CCC son preferibles en los casos en que los cambios en la media del proceso superan dos desviaciones estándares.

Estos mismo autores [7] determinaron el ARL de las cartas de causas especiales propuestas por Alwan y Roberts [1] para datos correlacionados, con esto concluyeron que las cartas de causas especiales tienen valores de ARL pequeños cuando la correlación es negativa y las cartas basadas en residuales no tienen buen desempeño ante la existencia de mucha correlación en el primer rezago. Así mismo, la carta EWMA resultó ser muy buena para detectar cambios pequeños, adicionalmente, resulta útil en la detección de cambios grandes cuando los parámetros autorregresivos son negativos y el parámetro del promedio móvil positivo.

Reynolds y Lu [13] evaluaron y compararon varios tipos de cartas EWMA basadas en observaciones originales y residuales de los datos ajustados a partir de series de tiempo. Su conclusión fue que niveles moderados de autocorrelación pueden conllevar efectos adversos en el desempeño de las cartas. Harris [11] y Reynolds [13] afirman que las cartas tradicionales de

Shewhart no deben ser aplicadas sin modificación cuando se estudia un proceso afectado por correlación en los datos. También concluyen que el uso de residuales generados por el ajuste de un modelo de series de tiempos no es necesariamente mejor que la implementación de cartas basadas en el uso de las observaciones originales con ajustes en los límites de control, a menos que el nivel de correlación sea elevado. Kramer y Schmid [14] estudian, con resultados similares, la aplicación de las cartas Shewhart a los residuos de un proceso representado a través de series de tiempo autorregresivas de primer orden denotado $AR(1)$, en la que la variable de salida depende linealmente de sus propios valores anteriores.

Zhang [15] midió la capacidad de detención de cambios en las cartas basadas en residuales para procesos estacionarios y estableció la relación entre capacidad de detección y la longitud promedio de corrida. Tras el análisis de un proceso autoregresivo, el autor concluye que cuando ocurre un cambio en la media del proceso, los residuos no tienen siempre la misma media, aunque se haya modelado perfectamente el proceso. Asimismo, la investigación dio como resultado que la capacidad de detección de las cartas basadas en residuales es menor para cambios pequeños en la media comparada con las cartas tradicionales como EWMA y CUSUM para observaciones modeladas con una serie de tiempo autorregresiva de segundo orden $AR(2)$.

Yang y Makis [16] estudiaron el desempeño de las cartas de control Shewhart, CUSUM y EWMA aplicadas a los residuales de un proceso $AR(1)$ comparando su ARL. Para esto derivaron las ecuaciones integrales necesarias para su cálculo. Los resultados de la investigación indicaron que la carta Shewhart es la de peor desempeño, excepto frente a grandes cambios, y que la carta CUSUM tiene mejor desempeño que la carta EWMA solo cuando el cambio registrado es pequeño.

Reynolds y Lu [17] consideraron el problema de monitorear un proceso cuya media se ajusta a una serie de tiempo $AR(1)$ más un error aleatorio. Para el control estadístico se utilizó una carta EWMA para los residuales, y el pronóstico se realizó utilizando el método de la ecuación integral. La carta propuesta fue comparada con la carta EWMA para observaciones originales, concluyendo que cuando el nivel de autocorrelación es alto y los cambios largos, la carta EWMA para residuales es más rápida que aquella basada en las observaciones originales.

Luceño y Box [18] mostraron cómo el ARL para una carta *one-sided* CUSUM varía en función de la longitud de los intervalos de muestreo entre observaciones consecutivas, el límite de decisión de la carta y la autocorrelación entre muestras sucesivas. Este estudio evidenció que la tasa de falsas alarmas puede reducirse considerablemente si se disminuye el intervalo de muestreo y si se aumenta apropiadamente el intervalo de decisión.

La carta EWMA basada en los residuales fue desarrollada por MacCarthy y Wasusri [19] para monitorear el desempeño programado de operaciones tanto de manufactura como de servicios, debido a su efectividad al evitar falsas alarmas en cambios en la media de un proceso cuyos datos están correlacionados. Rao et ál. [20] establecieron que circunstancialmente el ARL es la única solución a la ecuación integral y probaron los algoritmos numéricos basados en cuadraturas Gauss-Legendre y Simpson para estimarlo.

Peñabaena y Sanjuan [21] usaron cartas de control EWMA para la detección temprana de cambios en el proceso modelando series de tiempo para predecir tres pasos hacia adelante fuera de control y encontraron razonables costos pero alta complejidad de aplicación.

Kacker y Zhang [22] propusieron un protocolo para el control en tiempo real utilizando el modelo de promedio móvil y la carta Shewhart con residuales. Este modelo se ajusta a procesos de fabricación ligera o moderadamente estacionarios. El protocolo que resulta es similar al utilizado para la carta Shewhart para monitoreo de la media. Luego de manufacturar N productos, el $N+1$ es muestreado, el error asociado a esta muestra es verificado con relación al valor objetivo y, posteriormente, registrado en una tabla de datos. En cada muestra se compara el valor del error contra el límite de control denotado; en caso de presentarse un error excesivo, el sistema se detiene para establecer la causa del problema y aplicar los correctivos necesarios.

Snoussi et ál. [23] proponen una alternativa para abordar el problema de insuficiencia de observaciones para el diseño de la carta, y poder así cumplir los supuestos necesarios para la implementación. En su artículo muestran que el uso del estadístico Queensberry (Q), que permite transformar distribuciones binarias en normales estándar, en conjunción con las cartas de control basadas en residuales es una herramienta apropiada de control estadístico para datos correlacionados en corridas cortas de producción.

Noorossana y Vaghef [24] investigaron el rendimiento de las cartas de sumas acumulativas multivariadas (MCUSUM) en presencia de autocorrelación utilizando las observaciones generadas por un proceso multivariado AR(1). De este estudio se concluye que la autocorrelación deteriora el desempeño de este tipo de cartas y que si se utilizan los residuales del modelo de serie de tiempo en lugar de las observaciones originales, se puede mejorar el desempeño de las cartas MCUSUM.

Kim et ál. [25] presentaron una carta CUSUM para monitorear cambios en la media de datos autocorrelacionados, la propuesta es un modelo libre que provee una manera simple de determinar los límites de control a través de un cálculo analítico cuando la varianza es conocida, y además permite el uso de pequeños lotes o incluso de pocas observaciones, a diferencia de otros procedimientos que requieren conocimiento previo del modelo o de la estructura de correlación del proceso subyacente. Los autores compararon el procedimiento propuesto con otros modelos libres, utilizando ejemplos basados en datos independientes y normalmente distribuidos y que sigan un proceso AR(1).

Triantafyllopoulos [26] desarrolló una carta de control multivariada para procesos serialmente correlacionados mediante un modelo bayesiano multivariado de nivel local. El modelo desarrollado por el autor es una generalización del modelo Shewhart para datos autocorrelacionados, que pretende establecer el error de predicción del proceso para luego aplicar una carta EWMA al algoritmo de factores Bayesianos. En este estudio se aprecia que la carta EWMA es capaz de tratar la no normalidad y la autocorrelación de los factores bayesianos. Yang y Yang [27] propusieron un enfoque para el monitoreo efectivo de las etapas dependientes de un proceso que presenta autocorrelación. Estos autores consideraron el problema de monitorear la media de una característica de calidad (X) en la primera etapa del proceso y la media de una característica de calidad (Y) en la segunda etapa del proceso. Las observaciones de la característica X se modelaron como una serie AR(1) y las observaciones de la característica Y se trabajaron como una función de transferencia de X , siempre y cuando el estado del segundo proceso sea independiente del estado del primero. Según el análisis numérico desarrollado por Yang y Yang [27], la carta propuesta tiene mejor desempeño que la carta multivariada Hotelling T^2 y que cartas individuales Shewhart para el desempeño de las variables X y Y .

Ghourabi y Liman [28] estudiaron el comportamiento de los residuales de varios procesos estacionarios en presencia de patrones de cambio y plantearon un nuevo método para trabajar con los residuos, denominado la carta de patrones, que tiene en cuenta tres tipos de patrones: valores atípicos aditivos, valores atípicos innovados y niveles de cambios. Al comparar la longitud promedio de corrida de esta nueva carta con la carta de causas especiales SCC se observa que la carta propuesta tiene mejor desempeño que la carta SCC.

Costa y Claro [29] consideraron el muestreo doble para monitorear procesos que puedan ser modelados a partir de una serie de tiempo autorregresiva y de media móvil de primer orden ARMA (1,1), esta propuesta fue comparada con la carta de control de Shewhart y una carta adaptativa con tamaño de muestra variable (VSS), concluyendo que la carta desarrollada por Costa y Claro es efectiva para detectar cambios en la media cuando la correlación es moderada.

Sheu y Lu [30] examinaron una carta de control de promedio móvil general ponderado (GWMA) de tiempo variable para el seguimiento de la media de un proceso AR(1) con el error aleatorio. Mediante simulación se evaluó el ARL de la carta EWMA y GWMA, los resultados indicaron que la carta GWMA requiere menor tiempo para detectar cambios cuando los niveles de correlación son bajos. Knoth et ál. [31] cuantificaron el impacto de la autocorrelación en la probabilidad de la ocurrencia de falsas alarmas en cartas tradicionales de Shewhart y EWMA basadas en residuales para el monitoreo de la media y la varianza de un proceso AR(1).

Weiss y Testik [32] investigaron la carta *one-sided* CUSUM para el monitoreo de los residuales de un proceso de autocorrelación discreto utilizando un modelo de Poisson autorregresivo de primer orden de valores enteros (Poisson INAR (1)). La investigación llevó a concluir que al ser utilizada la carta con las observaciones originales, se observa un mejor desempeño en la detección de un fuera de control.

En general, se puede decir que la carta EWMA es el esquema de monitoreo basado en residuales que ha mostrado mejores resultados por su aproximación a las series de tiempo.

Cartas de control modificadas

Montgomery y Mastrangelo [4] proponen una modificación de la carta EWMA para el monitoreo de procesos autocorrelacionados aprovechando que esta carta permite realizar una aproximación al procedimiento de modelado de series de tiempo. De esta forma es posible combinar información sobre el estado estadístico del proceso y las dinámicas del mismo en una carta de control denominada EWMA de línea central (MCEWMA). En dicha carta, la línea central no es constante y depende de la secuencia de los valores ajustados.

Las cartas tradicionales basadas en residuales, como las Shewhart, CUSUM o EWMA, no utilizan la información contenida en la dinámica de las falsas alarmas. A partir de esto Box y Ramírez [33] desarrollaron la carta de control CUSCORE a partir de la carta CUSUM y EWMA, que a través de la aplicación de la función de verosimilitud en la modelación de la serie temporal permite incorporar información del proceso que se traduce en un desempeño estadístico significativamente mejor a las cartas en su estado original en el monitoreo de procesos autocorrelacionados. Entre las dificultades de implementación se menciona que su complejidad hace que su aplicación sea poco difundida.

Vander Wiel [34] estudió y comparó cuatro esquemas de monitoreo de procesos con datos correlacionados: las cartas CUSUM, EWMA, Shewhart y un esquema basado en la razón de verosimilitud para incluir un modelo de media móvil. Como resultado se concluyó que al ser implementados, los gráficos CUSUM pueden rendir tan bien como los otros esquemas, y que las cartas individuales de Shewhart suelen tener el peor rendimiento, en especial cuando se habla de pequeños corrimientos de media.

Zhang [35] presenta un nuevo enfoque para manejar la correlación entre observaciones y propone una carta de control estadística para datos provenientes de un proceso estacionario. Afirma que este esquema es más fácil de implementar y requiere menor esfuerzo, lo que soluciona la limitación de lo propuesto por Alwan y Roberts [1]. Zhang diseña una adaptación de la carta EWMA variando sus límites cuando los datos son autocorrelacionados, es denominada carta EWMAS para procesos estacionarios. Los resultados de su investigación indican que cuando la correlación en el proceso no es

fuerte y los cambios presentados en la media no son largos, la carta EWMAST tiene mejor desempeño en la detección de corrimientos de media que aquella que trabaja con residuales.

Willemain y Runger [36] desarrollan una forma novedosa y efectiva para controlar la calidad utilizando datos positivamente autocorrelacionados que se originan a raíz de una alta frecuencia de muestreo. Estos autores consideraron el proceso como una secuencia de corridas por encima y por debajo de la media; las sumas de las observaciones de estas corridas se comportan como variables aleatorias independientes que pueden ser graficadas en cartas de control superando el problema de autocorrelación. Utilizando datos simulados, Willemain y Runger probaron que la velocidad del modelo de cartas propuesto, basado en una suma de las observaciones por debajo y por encima de la media, es mejor que las cartas de control basadas en residuales para detectar cambios en la media del proceso.

En la investigación realizada por Lu y Reynolds [37] fue evaluado el desempeño en la detección de cambios en la media y la varianza de varios esquemas de cartas de control y combinaciones de cartas para procesos en los cuales las observaciones se presentan como un proceso AR(1). La conclusión de este estudio muestra que no hay una combinación de cartas cuyo desempeño fuera óptimo en todos los casos, sin embargo, la carta EWMA de las observaciones, usada en combinación con una carta de Shewhart para los residuos, puede ser recomendada para aplicaciones prácticas.

Jiang et ál. [38] propusieron una nueva carta de control denominada autorregresiva de promedio móvil (ARMA), que es basada en el monitoreo de un proceso ARMA de las observaciones originales. Estos autores desarrollaron un procedimiento informal para determinar los valores apropiados de los parámetros de la carta propuesta. Asimismo, este estudio permite afirmar que la carta de causas especiales SCC, propuesta por Alwan y Roberts [1], y la carta EWMAST, desarrollada por Zhang [35], son casos especiales de carta ARMA. Un año después, Jiang [39] amplió su investigación sobre la carta ARMA al desarrollar un modelo de cadenas de Markov que le permitiera evaluar la longitud promedio de corrida de esta carta.

Reynolds et ál. [8] investigaron las cartas de control CUSUM como alternativa para monitorear la media de procesos donde las observaciones podrían ser

modeladas con una serie de tiempo AR(1) más un error aleatorio. Luego de su investigación, concluyeron que las cartas CUSUM basadas en las observaciones originales rinden bien al usarse con los residuales, excepto en aquellos casos en los que los niveles de autocorrelación son muy altos y los cambios en la media del proceso son grandes. Asimismo, los resultados de este estudio permitieron afirmar que las cartas CUSUM y EWMA tienen un rendimiento similar en términos de la habilidad para detectar cambios en la media del proceso. Chou et ál. [40] desarrollaron posteriormente el diseño económico de cartas para datos correlacionados en una muestra. En los resultados se observa que si los datos están positivamente correlacionados, el diseño conduce a un tamaño de muestra menor, con un intervalo frecuente de muestreo y límites de control más cercanos. Sin embargo, si están negativamente correlacionados, a grandes niveles se obtiene un tamaño de muestra menor con límites más cercanos.

Chou et ál. [41] robustecen su diseño económico con la implementación de la función de pérdida de Taguchi, considerando el escenario de datos correlacionados y no normalidad. Este estudio permite concluir que al diseñar económicamente la carta de control en presencia de autocorrelación en las observaciones del proceso, se presentan tamaños de muestra menores con límites más estrechos.

Mastrangelo y Forrest [42] presentaron un programa para generar datos multivariados autorregresivos con cambios en el vector medio de las series estacionarias; estos datos pueden ser usados para comparar las propiedades de detección de cambios de métodos de cartas de control multivariadas.

Shu et ál. [43] propusieron una nueva carta denominada *CUSUM-triggered* que reduce el número de falsa alarma, su validación se hizo utilizando un proceso ARMA(1,1). Este estudio probó que la carta propuesta tiene mejor desempeño que la CUSCORE estándar y que la carta CUSUM basada en los residuales.

Apley y Tsung [5] analizaron la carta de control T^2 autorregresiva para el control estadístico de procesos autocorrelacionados para el caso de cambios en la media del proceso. Esta considera diferentes niveles de ajuste para la modelación del proceso que la hacen una alternativa apropiada para el monitoreo de residuales.

Una nueva comparación del desempeño de las cartas basadas en los residuales de un modelo autoregresivo frente a aquellas basadas en las observaciones originales fue desarrollada por Loredó et ál. [44] utilizando simulación de Monte Carlo. Este estudio permite concluir que las cartas basadas en las observaciones originales tienen un desempeño pobre cuando los datos del proceso están correlacionados en el tiempo y afirma que en el modelo de series de tiempo las cartas de residuales tienen mejor desempeño. Jiang [45] examinó las propiedades globales del test T^2 cuando hay incertidumbre acerca de la magnitud sobre el cambio del proceso.

Winkel y Zhang [46] estudian la presencia de falsas alarmas debido a diferentes niveles de autocorrelación, para ello evaluaron la carta EWMA cuando existe autocorrelación en las observaciones del proceso, obteniendo un número considerable de falsas alarmas. En contraste, la aplicación de la carta EWMAST no registra ninguna observación por fuera de los límites de control. Esta situación se debe al hecho de que los límites de la carta EWMAST se acomodan según la correlación del proceso. Es importante mencionar que la presencia de autocorrelación positiva en el proceso es preferible para la aplicación de la carta EWMAST.

Chen y Chiou [47] desarrollaron un diseño económico de una carta de control con intervalo de muestreo variable (VSI) con datos correlacionados, donde la muestra siguiente es seleccionada más rápidamente de lo usual si hay indicios de que el proceso está fuera de control. Los resultados indicaron que las cartas VSI superan a las cartas tradicionales cuando se dan cambios mayores de la media y existe correlación en los datos.

Brence y Mastrangelo [48] evaluaron las sumas acumuladas de la señal de rastreo, señal de rastreo del error suavizado y la carta EWMA en la detección de los cambios del proceso, para esto utilizaron como indicadores el ARL y la proporción de falsas alarmas. En el análisis realizado para procesos AR(1) y ARMA(1,1), la señal de rastreo de la ventana de la serie de tiempo para el error presentó mejor desempeño que las sumas acumuladas de la señal de rastreo.

Jarrett y Pan [49] describen cómo combinar enfoques de control estadístico de procesos tradicionales para monitorear cambios en la variabilidad del proceso en un entorno de observaciones autocorrelacionadas. De igual

forma, Kim et ál. [25] desarrollan y evalúan el desempeño de una carta de distribución tabular libre CUSUM (DTFC) para datos correlacionados, y concluyen que esta carta reacciona más rápido a los cambios significativos que otras de distribución libre CUSUM. Sin embargo, la principal limitación de este artículo es que el análisis se fundamenta en la afirmación que la varianza marginal y la varianza de los parámetros son cantidades conocidas.

Chen et ál. [50] combinan el diseño económico propuesto por Chou (2001) [40] con un modelo de distribución normal multivariada para el análisis del efecto de la correlación en los parámetros de la carta. El resultado de la investigación es que la magnitud del cambio en la media tiene un efecto significativo en los valores óptimos de los intervalos de muestreos (cortos y largos), los coeficientes de alerta y de control, conduciendo al diseño económico de una carta VSSI para monitorear la media de un proceso bajo correlación. Se concluyó también que el coeficiente de correlación en la muestra es otro factor importante en el desempeño económico.

Cheng y Chou [51] utilizaron la carta de control ARMA en un sistema de inventarios; utilizaron esta carta para monitorear la demanda del mercado, la cual presentaba autocorrelación, y utilizaron cartas individuales para analizar los niveles de inventarios. Koksál et ál. [52] investigaron el efecto del tamaño de muestra en el desempeño de la longitud promedio de corrida de las cartas basadas en residuales, cartas Shewhart modificadas, EWMAST y ARMA, ofreciendo una guía y recomendaciones para la elección del tamaño de muestra en las cartas seleccionadas.

Vermaat et ál. [53] diseñaron estadísticamente cartas EWMA para procesos AR(1) y AR(2) con el objetivo de facilitar la aplicación frente a las cartas basadas en residuales usadas tradicionalmente para afrontar la correlación. Esta nueva carta tiene como ventaja que los datos son graficados en su escala original, haciendo más clara la interpretación.

Changpetch y Nembhard [54] desarrollaron dos enfoques para la aplicación de cartas CUSCORE cuando no se conoce el tiempo en que ocurrió la señal. El primer enfoque propone reiniciar la estadística CUSCORE con un ciclo determinado y el segundo consiste en considerar únicamente los períodos de tiempo más recientes para calcular la estadística CUSCORE. El resultado de esta investigación permitió concluir que en el desempeño de

estos dos enfoques, la carta de control CUSCORE periódica es mejor que la carta CUSUM en términos de la longitud promedio de corrida.

Ta Zou et ál. [55] consideraron un proceso AR(1) más un error aleatorio y estudiaron el método que denominaron muestreo variable a intervalos fijos, el cual combina el método frecuencia variable de muestreo a tiempos fijos (VSRFT) y el de intervalos de muestreo variables a tiempos fijo (VSIFT). También utilizaron modelos de cadenas de Markov y ecuaciones integrales para desarrollar el método propuesto, el cual según los estudios realizados por estos autores, en promedio, detecta más rápidamente cambios en el proceso que las cartas de tamaño de muestra fijo y que su capacidad de detección es comparable con la cartas cuyos intervalos de muestreo son variables.

Wang [56] desarrolló un método para monitorear pequeños cambios en un proceso estacionario afectado por correlación en los datos, haciendo uso de un modelo autorregresivo de media móvil de primer orden MA(1). Al comparar su propuesta con otros métodos obtuvo como resultado que esta ofrece mayor eficiencia en procesos estacionarios. Chen y Cheng [57] propusieron dos métodos para determinar el tamaño de muestra y el factor k (número de desviaciones estándares desde la línea central) del límite de control para minimizar la duración promedio de corrida fuera de control, mientras se mantiene el ARL en valores específicos de control cuando no se conoce la distribución marginal y existe autocorrelación en los datos.

Con un proceso AR(1), Branco y Guerreiro [58] desarrollan un enfoque basado en cadenas de Markov y métodos de ecuaciones integrales para evaluar las propiedades de la carta \bar{X} -barra. Yu y Lu [59] propusieron un modelo de regresión logístico (LR- por su nombre en inglés) para el monitoreo de procesos. Este método proporciona la evaluación cuantitativa del estado actual del proceso mediante el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de evento de la regresión. De esta investigación surge una carta basada en esta probabilidad del modelo logístico, denominada carta LR- Prob.

Un procedimiento CUSCORE multivariado (MCUSCORE), basado en la prueba de verosimilitud secuencial y en el análisis de la señal de falla, fue desarrollado por Chen y Nembhard [60] para monitorear la media de un proceso multivariado correlacionado. Su resultado es similar a los anterior-

res, muestra la superioridad de los esquemas CUSCORE para el monitoreo de datos originales del proceso en presencia de datos autocorrelacionados.

Cartas de control con aplicaciones de minería de datos

La minería de datos es una disciplina encargada del descubrimiento automático de patrones o modelos intrínsecos en bases de datos [61]. Las herramientas de minería de datos pueden ayudar a predecir futuras tendencias y comportamientos, permitiendo tomar decisiones proactivas y conductivas por un conocimiento a partir de la información. Asimismo, dichas herramientas exploran las bases de datos en busca de patrones ocultos, descubriendo información predecible que un experto no puede llegar a hallar porque se encuentra fuera de sus expectativas [62]. Estas herramientas han comenzado a utilizarse para el control estadístico de procesos donde existe autocorrelación, y según recientes investigaciones [10] son muy eficientes detectando pequeñas variaciones en los procesos.

Friedman [63] presentó un nuevo método, denominado *Multivariate Adaptive Regression Splines* (MARS), para el modelado regresivo flexible de datos de alta dimensión, que permite estimar relaciones desconocidas entre una variable respuesta (medida de desempeño) y muchas variables predictoras.

Smola y Scholkopf [64] afirman que los métodos basados en el algoritmo *Support Vector Machine* (SVM) son útiles debido a que pueden utilizarse para la identificación de patrones en series de datos con un buen rendimiento.

Chinnam [65] demuestra que los métodos SVM son efectivos minimizando la probabilidad de que erróneamente se declare el proceso fuera de control o que se genere una falsa alarma (error tipo I) y la probabilidad de que el método sea incapaz de detectar un verdadero cambio o tendencia presente en el proceso (error tipo II); dicho resultado concluye que estos métodos tienen un rendimiento igual o superior al de las cartas tradicionales de Shewhart.

Issam y Liman [66] aplican el SVM para la construcción de una carta MCUSUM basada en residuos con el objetivo de monitorear cambios en el proceso de una media, y como resultados comprueban que la metodología propuesta es más efectiva en la detención de pequeños cambios en la media en contraste con aquellas basadas en series de tiempo. Otra ventaja importante de

esta carta es que puede manejar una relación no lineal entre las variables de control.

Una nueva alternativa para el tratamiento de datos autocorrelacionados, que evita la construcción de un modelo de series de tiempo, es la propuesta por Pacella y Semeraro [67], que sugiere el uso de un procedimiento basado en redes neuronales. La metodología propuesta, en contraste con las cartas de control tradicionales, presentó un mejor desempeño estadístico al detectar grandes y pequeños cambios en la media del proceso.

West et ál. [68] investigaron la habilidad de la función de base radial de una red neuronal para monitorear y controlar un proceso de manufactura en presencia de observaciones correlacionadas. Este estudio demostró que la función de base radial de red es más eficiente que las cartas multivariadas de Shewhart, la versión multivareada de la EWMA y Back Propagation Neural Network (BPN). Dos años más tarde, Chiu et ál. [69] utilizaron el método BPN para identificar cambios en los parámetros de un proceso AR(1).

Jitpitaklert [70] integró el estado del arte de los algoritmos de minería con las herramientas para el monitoreo estadístico de procesos para alcanzar eficiencia en el monitoreo de procesos multivariados y correlacionados. Hwang y Wang [71] proponen un identificador basado en una red neural (NNI) para procesos multivariados correlacionados. Luego de sus estudios, concluyeron que el método es más efectivo detectando pequeños cambios y que provee mayor estabilidad en el índice ARL. Lee [72] desarrolló un diseño económico de cartas de control CUSUM para monitorear procesos con muestras correlacionadas. Fue aplicado un algoritmo genético para hallar los parámetros que minimizan el costo de la implementación.

Gani et ál. [73] utilizan cartas de control basadas en SVR para minimizar el error empírico, comparando después los resultados con los métodos *Ordinary Least Squares* (OLS) y *Partial Least Square* (PLS) en términos de la desviación estándar del error de predicción y el error estándar de rendimiento. Issam et ál. [74] extenderían la aplicación de este método para procesos multivariados no lineales con datos autocorrelacionados, y al comparar su propuesta con cartas de control basadas en redes neuronales encontraron que la carta basada en el método vector de soporte regresivo es más efectiva detectando señales que afectan la varianza del proceso.

Niaki y Nasaji [75] modelaron la estructura autocorrelacionada de los datos a través de un vector autorregresivo y desarrollaron una red neuronal de Elman modificada para generar datos simulados utilizando el algoritmo ARTA. Estos investigadores usaron una nueva metodología basada en la capacidad de la red modificada Elman para monitorear y detectar las causas del deterioro del proceso.

Huang et ál. [76] desarrollaron un modelo utilizando el algoritmo SVR para predecir cambios en la media del proceso monitoreado con una carta CUSUM. Para evaluar el desempeño del vector, se simula el error absoluto porcentual de la media (MAPE por sus siglas en inglés) y la raíz normalizada media de los errores cuadrados (NRMSE por sus siglas en inglés). Se compara el desempeño predictivo del método propuesto con el de redes neuronales, lo cual da como resultado que el vector de soporte regresivo planteado tiene mejor capacidad de estimación. Park et ál. [77] desarrollaron un nuevo método de detección de fallas utilizando *Spline Regression* y SVM para una señal de un proceso dada. El *Spline Regression* se aplica sobre puntos cambiantes o puntos de nudo y el SVM utiliza las características de la señal en el desarrollo del monitoreo.

3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Finalmente, vale la pena anotar que futuras líneas de investigación para el control estadístico de datos autocorrelacionados detectadas en la literatura están relacionadas, en principio, con la necesidad de caracterizar los tipos de fuera de control y su inclusión en las cartas de control para establecer políticas que garanticen la detección oportuna y la disminución de los costos de calidad. Esto incluye el diseño de un mecanismo para el análisis e interpretación de las señales que indican que el proceso está fuera de control, de manera que tomen las medidas correctivas en el momento oportuno.

Adicionalmente, el trabajo que se ha hecho sobre la carta CUSUM aún necesita estudiar el efecto de los parámetros de la carta para la predicción del rendimiento y la construcción del vector de entrada basado en las características extraídas de las observaciones originales. Se sugiere el diseño de una carta *two-sided* CUSUM, con cálculo exacto de ARL, para el monitoreo de un proceso de autocorrelación discreto utilizando un modelo de Pois-

son autorregresivo de primer orden de valores enteros [Poisson INAR(1)]. Asimismo, puede considerarse la optimización de los parámetros de la carta *one-sided* CUSUM.

Para finalizar, se puede trabajar en el seguimiento de la variabilidad del proceso a través de un cambio en la matriz de covarianza mediante la aplicación del método vector de soporte regresivo y la carta multivariada MEWMA.

En la literatura se encuentra que autores como Lu y Reynolds [37] evalúan esquemas híbridos utilizando un monitoreo directo y con residuales con cartas Shewhart y EWMA. La combinación de técnicas de minería de datos y otros esquemas de monitoreo no se encuentra documentados en la literatura científica y ello se convierte en un importante campo de investigación.

La cantidad de estudios dedicados a compensar el desempeño estadístico y económico en procesos autocorrelacionados ha sido baja, valdría la pena orientar esfuerzos a diseñar mejores cartas y a robustecer los modelos actuales para incluir variables propias del proceso que no han sido consideradas, como: el costo social, la confiabilidad de los instrumentos, etc.

Por último, aparece un gran campo de investigación en las cartas con esquemas variables, cuyas bases se convierten en una nueva alternativa de estudio para explorar en esquemas modificados y evaluar con técnicas de minería de datos.

4. CONCLUSIONES

Los métodos tradicionales de control estadístico de procesos pierden mucha efectividad cuando las observaciones son correlacionadas, situación usual en las industrias altamente automatizadas e integradas. Como se muestra en esta revisión literaria, existen múltiples alternativas y enfoques para afrontar este problema. Una de las alternativas propuesta por autores como Alwan y Robert [1] y Wardell et ál. [7] es el uso de modelos de series de tiempo, lo que implica ajustar los datos a un modelo adecuado y aplicar cartas de control a los residuales. Dada la complejidad de la aplicación de modelos de

series de tiempo para los residuales, algunos autores como Reynolds y Lu [8], Atienza et ál. [9] y Loredó et ál. [44] diseñaron procedimientos basados en las observaciones originales para monitorear procesos correlacionados.

Sin embargo, al evaluar los resultados obtenidos por las cartas de control basadas en series de tiempos, frente a la detención de cambio pequeño estas no poseen un muy buen rendimiento. Entonces, autores como Chinnam [69] y Kim et ál. [10] demostraron que las cartas de control basadas en SVM y los algoritmos de minería de datos presentan mejor desempeño en la detección de cambios pequeños en los procesos.

En general, se puede concluir que las cartas de control EWMA y CUSUM son más eficientes para detectar cambios en la media de procesos cuando existe correlación entre los datos, mientras que la carta Shewhart rara vez detecta dichos cambios en este tipo de procesos. Por otro lado, los esquemas de carta modificados, como las cartas EWMAST, CUSCORE y VSSI, demostraron tener mejor potencia estadística, pero mayor complejidad de aplicación. Por último, los métodos SVM, y BPN mostraron un mejor desempeño estadístico al detectar tanto pequeños como grandes cambios en la media de un proceso autocorrelacionado, en comparación con la carta Shewhart.

REFERENCIAS

- [1] L. C. Alwan and H. V. Roberts, "Time-series modeling for statistical process control," *Journal of Business & Economic Statistics*, vol. 6, pp. 87-95, 1988.
- [2] D. W. Apley and J. Shi, "The GLRT for statistical process control of autocorrelated processes," *IIE Transactions*, vol. 31, pp. 1123-1134, 1999.
- [3] S. Psarakis and G. Papaleonida, "SPC procedures for monitoring autocorrelated processes," *Quality Technology and Quantitative Management*, vol. 4, pp. 501-540, 2007.
- [4] D. Montgomery, C. Mastrangelo, F. W. Faltin, W. H. Woodall, J. F. MacGregor, and T. P. Ryan, "Some statistical process control methods for autocorrelated data," *Journal of Quality Technology*, vol. 23, 1991.
- [5] D. W. Apley and F. Tsung, "The autoregressive T2 chart for monitoring univariate autocorrelated processes," *Journal of Quality Technology*, vol. 34, pp. 80-96, 2002.
- [6] S. B. Kim, W. Jitpitaklert, and T. Sukchotrat, "One-class classification-based control charts for monitoring autocorrelated multivariate processes," *Com-*

- munications in Statistics-Simulation and Computation*®, vol. 39, pp. 461-474, 2010.
- [7] D. G. Wardell, H. Moskowitz, and R. D. Plante, "Run-length distributions of special-cause control charts for correlated processes," *Technometrics*, vol. 36, pp. 3-17, 1994.
- [8] C.-W. Lu and M. R. Reynolds, "Cusum charts for monitoring an autocorrelated process," *Journal of Quality Technology*, vol. 33, pp. 316-334, 2001.
- [9] O. O. Atienza, L. Tang, and B. Ang, "A CUSUM scheme for autocorrelated observations," *Journal of Quality Technology*, vol. 34, pp. 187-199, 2002.
- [10] S. B. Kim, W. Jitpitaklert, S.-K. Park, and S.-J. Hwang, "Data mining model-based control charts for multivariate and autocorrelated processes," *Expert Systems With Applications*, vol. 39, pp. 2073-2081, 2012.
- [11] T. J. Harris and W. H. Ross, "Statistical process control procedures for correlated observations," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 69, pp. 48-57, 1991.
- [12] D. G. Wardell, H. Moskowitz, and R. D. Plante, "Control charts in the presence of data correlation," *Management Science*, vol. 38, pp. 1084-1105, 1992.
- [13] M. R. Reynolds Jr and C.-W. Lu, "Control charts for monitoring processes with autocorrelated data," in *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 1997, pp. 4059-4067.
- [14] H. Kramer and W. Schmid, "Control charts for time series," in *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 1997, pp. 4007-4016.
- [15] N. F. Zhang, "Detection capability of residual control chart for stationary process data," *Journal of Applied Statistics*, vol. 24, pp. 475-492, 1997.
- [16] J. Yang and V. Makis, "On the performance of classical control charts applied to process residuals," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 33, pp. 121-124, 1997.
- [17] C. W. Lu and M. R. Reynolds, "Control charts for monitoring the mean and variance of autocorrelated processes," *Journal of Quality Technology*, vol. 31, pp. 259-274, 1999.
- [18] A. L. George and E. Box, "Influence of the sampling interval, decision limit and autocorrelation on the average run length in Cusum charts," *Journal of Applied Statistics*, vol. 27, pp. 177-183, 2000.
- [19] B. MacCarthy and T. Wasusri, "Statistical process control for monitoring scheduling performance-addressing the problem of correlated data," *Journal of the Operational Research Society*, pp. 810-820, 2001.
- [20] B. V. Rao, R. L. Disney, and J. J. Pignatiello Jr., "Uniqueness and convergence of solutions to average run length integral equations for cumulative sum and other control charts," *IIE Transactions*, vol. 33, pp. 463-469, 2001.
- [21] R. P. Peña-Baena Niebles and M. E. Sanjuán Mejía, "Diseño de un experimento para evaluar el uso de la carta EWMA con predicción en el monitoreo

- de procesos correlacionados," *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, vol. 15, pp. 67-83, 2011.
- [22] R. Kacker and N. F. Zhang, "Online control using integrated moving average model for manufacturing errors," *International Journal of Production Research*, vol. 40, pp. 4131-4146, 2002.
- [23] A. Snoussi, M. E. Ghourabi, and M. Limam, "On SPC for short run autocorrelated data," *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, vol. 34, pp. 219-234, 2005.
- [24] R. Noorossana and S. Vaghefi, "Effect of autocorrelation on performance of the MCUSUM control chart," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 22, pp. 191-197, 2006.
- [25] S.-H. Kim, C. Alexopoulos, K.-L. Tsui, and J. R. Wilson, "A distribution-free tabular CUSUM chart for autocorrelated data," *IIE Transactions*, vol. 39, pp. 317-330, 2007.
- [26] K. Triantafyllopoulos, "Multivariate control charts based on Bayesian state space models," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 22, pp. 693-707, 2006.
- [27] S.-F. Yang and C.-M. Yang, "An approach to controlling two dependent process steps with autocorrelated observations," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 29, pp. 170-177, 2006.
- [28] M. El Ghourabi and M. Limam, "Residual responses to change patterns of autocorrelated processes," *Journal of Applied Statistics*, vol. 34, pp. 785-798, 2007.
- [29] A. F. Costa and F. A. Claro, "Double sampling\ \overline{X} control chart for a first-order autoregressive moving average process model," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, pp. 521-542, 2008.
- [30] S.-H. Sheu and S.-L. Lu, "Monitoring the mean of autocorrelated observations with one generally weighted moving average control chart," *Journal of Statistical Computation and Simulation*, vol. 79, pp. 1393-1406, 2009.
- [31] S. Knoth, M. C. Morais, A. Pacheco, and W. Schmid, "Misleading signals in simultaneous residual schemes for the mean and variance of a stationary process," *Communications in Statistics-Theory and Methods*, vol. 38, pp. 2923-2943, 2009.
- [32] C. H. Weiss and M. C. Testik, "CUSUM monitoring of first-order integer-valued autoregressive processes of Poisson counts," *Journal of Quality Technology*, vol. 41, pp. 389-400, 2009.
- [33] G. Box and J. Ramírez, «Cumulative score charts,» *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 8, pp. 17-27, 1992.
- [34] S. Vander Wiel, "Monitoring processes that wander using integrated moving average models," *Technometrics*, vol. 38, pp. 139-151, 1996.

- [35] N. F. Zhang, "A statistical control chart for stationary process data," *Technometrics*, vol. 40, pp. 24-38, 1998.
- [36] T. R. Willemain and G. C. Runger, "Statistical process control using run sums," *Journal of Statistical Computation and Simulation*, vol. 61, pp. 361-378, 1998.
- [37] C.-W. Lu and M. R. Reynolds, "EWMA control charts for monitoring the mean of autocorrelated processes," *Journal of Quality Technology*, vol. 31, pp. 166-188, 1999.
- [38] W. Jiang, K.-L. Tsui, and W. H. Woodall, "A new SPC monitoring method: The ARMA chart," *Technometrics*, vol. 42, pp. 399-410, 2000.
- [39] W. Jiang, "Average run length computation of ARMA charts for stationary processes," *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, vol. 30, pp. 699-716, 2001.
- [40] C. Y. Chou, H. R. Liu, and C. H. Chen, "Economic design of averages control charts for monitoring a process with correlated samples," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 18, pp. 49-53, 2001.
- [41] H.-R. Liu, C.-Y. Chou, and C.-H. Chen, "Minimum-loss design of x-bar charts for correlated data," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 15, pp. 405-411, 2002.
- [42] C. M. Mastrangelo and D. R. Forrest, "Multivariate autocorrelated processes: Data and shift generation," *Journal of Quality Technology*, vol. 34, pp. 216-220, 2002.
- [43] L. Shu, D. W. Apley, and F. Tsung, "Autocorrelated process monitoring using triggered cuscore charts," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 18, pp. 411-421, 2002.
- [44] E. N. Loredó, D. Jearkpaorn, and C. M. Borrór, "Model-based control chart for autoregressive and correlated data," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 18, pp. 489-496, 2002.
- [45] W. Jiang, "Multivariate control charts for monitoring autocorrelated processes," *Journal of Quality Technology*, vol. 36, pp. 367-379, 2004.
- [46] P. Winkel and N.-F. Zhang, "Serial correlation of quality control data-on the use of proper control charts," *Scandinavian Journal of Clinical & Laboratory Investigation*, vol. 64, pp. 195-204, 2004.
- [47] Y. K. Chen and K. C. Chiou, "Optimal design of VSI-X control charts for monitoring correlated samples," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 21, pp. 757-768, 2005.
- [48] J. R. Brence and C. M. Mastrangelo, "Parameter selection for a robust tracking signal," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 22, pp. 493-502, 2006.

- [49] J. E. Jarrett and X. Pan, "Monitoring variability and analyzing multivariate autocorrelated processes," *Journal of Applied Statistics*, vol. 34, pp. 459-469, 2007.
- [50] Y.-K. Chen, K.-L. Hsieh, and C.-C. Chang, "Economic design of the VSSI control charts for correlated data," *International Journal of Production Economics*, vol. 107, pp. 528-539, 2012.
- [51] J.-C. Cheng and C.-Y. Chou, "A real-time inventory decision system using Western Electric run rules and ARMA control chart," *Expert Systems with Applications*, vol. 35, pp. 755-761, 2008.
- [52] G. Köksal, B. Kantar, T. Ali Ula, and M. Caner Testik, "The effect of phase I sample size on the run length performance of control charts for autocorrelated data," *Journal of Applied Statistics*, vol. 35, pp. 67-87, 2008.
- [53] M. Vermaat, R. Does, and S. Bisgaard, "EWMA control chart limits for first- and second-order autoregressive processes," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 24, pp. 573-584, 2008.
- [54] P. Changpetch and H. B. Nembhard, "Periodic Cuscore charts to detect step shifts in autocorrelated processes," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 24, pp. 911-926, 2008.
- [55] C. Zou, Z. Wang, and F. Tsung, "Monitoring autocorrelated processes using variable sampling schemes at fixed-times," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 24, pp. 55-69, 2008.
- [56] W. Hai-yu, "An EWMA for monitoring stationary autocorrelated process," in *Computational Intelligence and Software Engineering, 2009. CiSE 2009. International Conference on*, 2009, pp. 1-4.
- [57] H. Chen and Y. Cheng, "Designing charts for known autocorrelations and unknown marginal distribution," *European Journal of Operational Research*, vol. 198, pp. 520-529, 2009.
- [58] A. F. B. Costa and M. A. G. Machado, "Variable parameter and double sampling charts in the presence of correlation: The Markov chain approach," *International Journal of Production Economics*, vol. 130, pp. 224-229, 2011.
- [59] J. Yu and J. Liu, "LRProb control chart based on logistic regression for monitoring mean shifts of auto-correlated manufacturing processes," *International Journal of Production Research*, vol. 49, pp. 2301-2326, 2011.
- [60] S. Chen and H. B. Nembhard, "Multivariate cuscore control charts for monitoring the mean vector in autocorrelated processes," *IIE Transactions*, vol. 43, pp. 291-307, 2011.
- [61] J. M. B. Fernández, *Gestión Científica Empresarial: Temas de Investigación Actuales*: Netbiblo, 2003.
- [62] C. Presser Carne, *Data mining*. Argentina: El Cid Editor, 2009.
- [63] J. H. Friedman, "Multivariate adaptive regression splines," *The annals of statistics*, pp. 1-67, 1991.

- [64] A. J. Smola and B. Schölkopf, "On a kernel-based method for pattern recognition, regression, approximation, and operator inversion," *Algorithmica*, vol. 22, pp. 211-231, 1998.
- [65] R. B. Chinnam, "Support vector machines for recognizing shifts in correlated and other manufacturing processes," *International Journal of Production Research*, vol. 40, pp. 4449-4466, 2002.
- [66] B. K. Issam and L. Mohamed, "Support vector regression based residual MCUSUM control chart for autocorrelated process," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 201, pp. 565-574, 2008.
- [67] M. Pacella and Q. Semeraro, "Using recurrent neural networks to detect changes in autocorrelated processes for quality monitoring," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 52, pp. 502-520, 2007.
- [68] D. A. West, P. M. Mangiameli, and S. K. Chen, "Control of complex manufacturing processes: a comparison of SPC methods with a radial basis function neural network," *Omega*, vol. 27, pp. 349-362, 1999.
- [69] C. C. Chiu, M.-K. Chen, and K.-M. Lee, "Shifts recognition in correlated process data using a neural network," *International Journal of Systems Science*, vol. 32, pp. 137-143, 2001.
- [70] W. Jitpitaklert, "Integration Of Data Mining Algorithms And Control Charts For Multivariate And Autocorrelated Processes," 2010.
- [71] H. Brian Hwang and Y. Wang, "Shift detection and source identification in multivariate autocorrelated processes," *International Journal of Production Research*, vol. 48, pp. 835-859, 2010.
- [72] M. Lee, "Economic design of cumulative sum control charts for monitoring a process with correlated samples," *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, vol. 39, pp. 1909-1922, 2010.
- [73] W. Gani, H. Taleb, and M. Limam, "Support vector regression based residual control charts," *Journal of Applied Statistics*, vol. 37, pp. 309-324, 2010.
- [74] I. B. Khediri, C. Weihs, and M. Limam, "Support vector regression control charts for multivariate nonlinear autocorrelated processes," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 103, pp. 76-81, 2010.
- [75] S. T. A. Niaki and S. A. Nasaji, "A hybrid method of artificial neural networks and simulated annealing in monitoring auto-correlated multi-attribute processes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 56, pp. 777-788, 2011.
- [76] C.-S. Cheng, P.-W. Chen, and K.-K. Huang, "Estimating the shift size in the process mean with support vector regression and neural networks," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 10624-10630, 2011.
- [77] J. Park, I.-H. Kwon, S.-S. Kim, and J.-G. Baek, "Spline regression based feature extraction for semiconductor process fault detection using support vector machine," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 5711-5718, 2011.