

Diseño de un modelo de seguimiento y anticipación para el control de calidad para el análisis operacional en la refinería Barrancabermeja Ecopetrol s.a. usando los softwares PI

Datalink y PI Vision

Mateo Ortega Aponte

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Modalidad Práctica empresarial

Director

Ronald Alfonso Mercado

Doctor en Ingeniería Química

Codirectora

Rosangela Pacheco Acosta

Magister en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo y el empeño puesto en él a mi nona Rosalbina, me disculpo por la demora, en dónde esté sé que siempre estará conmigo.

A mi mamá que me dio todo en la vida y ha sido una mentora ejemplar desde que nací.

A Jean que con su colita le ha dado combustible a mi corazón desde que apareció en mi vida.

Agradecimientos

A mi mamá Claudia y a mi nona Rosalbina por su apoyo incondicional, no pude haber crecido con una mejor familia. Agradezco también a mis tías Stella y Olga por haber estado allí cuando acudí a ellas.

Agradezco a mi director de proyecto Ronald por su acompañamiento y su paciencia a lo largo del desarrollo de mi proyecto. También a todos los profesores que tuve a lo largo de mi carrera por sus enseñanzas para ser un buen ingeniero y una buena persona.

Agradezco a la ingeniera Rosangela por orientarme durante mi pasantía y enseñarme tanto en tan poco tiempo.

Agradezco a mis amigos que me acompañaron durante estos años de formación académica y que cada cuanto me motivaban a terminar la carrera.

Agradezco a Jean, por haber sido y seguir siendo la mejor compañera, y haber llegado cuando más la necesitaba.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	18
Resumen.....	19
1. Objetivos	21
1.1. Objetivo general.....	21
1.2. Objetivos específicos	21
2. Marco conceptual.....	22
3. Metodología.....	28
4. Resultados	30
5. Conclusiones	48
6. Recomendaciones	49
Bibliografía	50
Apéndices.....	52

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1- Índices de capacidad según las condiciones de especificación	26
Tabla 2- Parámetros de calidad críticos en la línea de producción de Diesel B2E.....	32
Tabla 3- Parámetros de calidad críticos en la línea de producción de Gasolina.....	33
Tabla 4- Parámetros de calidad críticos en la línea de producción de Jet A1.....	33
Tabla 5- Parámetros de calidad críticos en la preparación de Asfalto 60/70.....	34
Tabla 6- Error porcentual de modelos de pronóstico y estadísticos de los parámetros de calidad del Diesel B2E	36
Tabla 7- Error porcentual del pronóstico de la capacidad de proceso Cpk de los parámetros de calidad del Diesel B2E.....	37
Tabla 8- Error porcentual de modelos de pronóstico y estadísticos de los parámetros de calidad de la Gasolina motor regular.....	38
Tabla 9- Error porcentual del pronóstico de la capacidad de proceso Cpk de los parámetros de calidad de la Gasolina motor regular	39
Tabla 10- Error porcentual de modelos de pronóstico y estadísticos de los parámetros de calidad del Jet A1	40
Tabla 11- Error porcentual del pronóstico de la capacidad de proceso Cpk de los parámetros de calidad del Jet A1	41
Tabla 12- Error porcentual de modelos de pronóstico y estadísticos de los parámetros de calidad del Asfalto 60/70.....	41
Tabla 13- Error porcentual del pronóstico de la capacidad de proceso Cpk de los parámetros de calidad del Asfalto 60/70	42

Tabla 14- Resumen general de los resultados de los modelos de predicción para todos los parámetros de calidad evaluados 44

Tabla 15- Comparación del porcentaje de error de pronósticos de modelos AR y ARIMA 45

Tabla 16- Comparación del porcentaje de error de pronósticos de modelos MA y ARIMA 45

Tabla 17- Comparación del porcentaje de error de pronósticos de modelos MA y ARIMA 46

Tabla 18- Información promedio de cada producto con su correspondiente error utilizando el modelo ARIMA 46

Tabla 19- Resultados de prueba Dickey-Fuller Aumentada a los datos de Número de Cetano del Diesel B2E 53

Tabla 20- Resultados de prueba Dickey-Fuller Aumentada a los datos en primera diferencia de Número de Cetano del Diesel B2E 54

Tabla 21- Criterios de la ecuación AR(1) del Número de Cetano en Diesel B2E..... 55

Tabla 22- Criterios de la ecuación MA(1) del Número de Cetano en Diesel B2E..... 55

Tabla 23- Criterios de la ecuación AR(1,7) del Número de Cetano en Diesel B2E..... 56

Tabla 24 - Criterios de la ecuación MA(1,7) del Número de Cetano en Diesel B2E..... 57

Tabla 25 - Criterios de la ecuación ARIMA (7,1,7) del Número de Cetano en Diesel B2E 58

Tabla 26- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Número de Cetano en el Diesel B2E 60

Tabla 27- Valores de pronóstico y error porcentual la Capacidad de Proceso Cpk para el Número de Cetano en el Diesel B2E 61

Tabla 28- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en el Diesel B2E..... 66

Tabla 29- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en el Diesel B2E 67

Tabla 30- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el número de Cetano en el Diesel B2E 68

Tabla 31- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Viscosidad en el Diesel B2E..... 68

Tabla 32- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Temperatura de 95 % vol. recobrado en el Diesel B2E..... 69

Tabla 33- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Poliaromáticos en el Diesel B2E..... 70

Tabla 34- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Aromáticos en el Diesel B2E 71

Tabla 35- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el número de Cetano en el Diesel B2E 72

Tabla 36- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Viscosidad en el Diesel B2E..... 73

Tabla 37- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para contenido de Poliaromáticos en el Diesel B2E..... 74

Tabla 38- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Azufre en el Diesel B2E..... 74

Tabla 39- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Temperatura de 95 % vol. recobrado en el Diesel B2E..... 75

Tabla 40- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en la Gasolina motor regular..... 79

Tabla 41- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en la Gasolina motor regular 80

Tabla 42- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Benceno en la Gasolina motor regular 81

Tabla 43- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Índice antidetonante en la Gasolina motor regular 82

Tabla 44- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Punto final de ebullición en la Gasolina motor regular 83

Tabla 45- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Presión de vapor Reid en la Gasolina motor regular 84

Tabla 46- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Aromáticos en la Gasolina motor regular..... 85

Tabla 47- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Azufre en la Gasolina motor regular 86

Tabla 48- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Benceno en la Gasolina motor regular 87

Tabla 49- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el Índice antidetonante en la Gasolina motor regular 88

Tabla 50- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el Punto final de ebullición en la Gasolina motor regular..... 89

Tabla 51- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Presión de vapor Reid en la Gasolina motor regular 90

Tabla 52- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Acidez en el Jet A1 95

Tabla 53- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en el Jet A1 95

Tabla 54- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en el Jet A1 96

Tabla 55- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Naftalenos en el Jet A1 96

Tabla 56- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Punto de inflamación en el Jet A1 97

Tabla 57- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Acidez en el Jet A1..... 98

Tabla 58- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Aromáticos en el Jet A1 98

Tabla 59- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Azufre en el Jet A1 99

Tabla 60- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Naftalenos en el Jet A1 99

Tabla 61- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el Punto de inflamación en el Jet A1 100

Tabla 62- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Ductilidad en el Asfalto 60/70 105

Tabla 63- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Penetración en el Asfalto 60/70 105

Tabla 64- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Pérdida de masa en el Asfalto 60/70..... 106

Tabla 65- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Punto de ablandamiento en el Asfalto 60/70 108

Tabla 66- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Punto de inflamación en el Asfalto 60/70..... 109

Tabla 67- Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Solubilidad en tricloroetileno en el Asfalto 60/70 110

Tabla 68- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Ductilidad en el Asfalto 60/70 111

Tabla 69- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Penetración en el Asfalto 60/70 112

Tabla 70- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Pérdida de masa en el Asfalto 60/70 113

Tabla 71- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el Punto de ablandamiento en el Asfalto 60/70..... 114

Tabla 72- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Ductilidad en el Asfalto 60/70 115

Tabla 73- Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Solubilidad en tricloroetileno en el Asfalto 60/70 116

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1- Captura de pantalla de PI Datalink en Excel.....	23
Figura 2- Captura de pantalla de la plataforma PI Vision	24
Figura 3- Comportamiento en el tiempo de un proceso estable e inestable.....	25
Figura 4- Rango considerado en la Capacidad teniendo para datos con distribución normal	26
Figura 5- Índice de capacidad de proceso para diferentes conjuntos de datos	26
Figura 6- Diagrama de flujo de la metodología desarrollada	29
Figura 7- Diagrama de línea de producción de Asfalto 60/70 en la GRB	31
Figura 8- Diagrama de línea de producción de Crudo reconstituido en la GRB	31
Figura A1- Gráfica de datos de Número de Cetano para el Diesel B2E.....	52
Figura A2- Gráfica de la primera diferencia de los datos de Número de Cetano para el Diesel B2E	53
Figura A3- Correlogramas de la función en primera diferencia del Número de Cetano del Diesel B2E	54
Figura A4- Correlogramas de los residuales de las funciones AR y MA respectivamente	56
Figura A5- Correlogramas de los residuales de las funciones AR y MA ajustadas respectivamente	57
Figura A6- Correlogramas de los residuales del modelo ARIMA	58
Figura A7- Gráfica de los datos originales, función AR, función MA y modelo ARIMA	59

Figura A8- Gráficas de los parámetros de calidad del Diesel B2E..... 62

Figura A9- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en el Diesel B2E..... 63

Figura A10- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el número de Cetano en el Diesel B2E..... 63

Figura A11- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Viscosidad en el Diesel B2E 64

Figura A12- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en el Diesel B2E 64

FiguraA13- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Poliaromáticos en el Diesel B2E..... 65

Figura A14- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Temperatura de 95 % vol. recobrado en el Diesel B2E 65

Figura A15- Gráficas de los parámetros de calidad de la Gasolina Motor Regular 76

Figura A16- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en la Gasolina Motor Regular 76

Figura A17- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en la Gasolina Motor Regular..... 77

Figura A18- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Benceno en la Gasolina Motor Regular 77

Figura A19- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el índice antidetonante en la Gasolina Motor Regular 78

Figura A20- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el Punto final de ebullición en la Gasolina Motor Regular 78

Figura A21- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Presión de Vapor Reid en la Gasolina Motor Regular 79

Figura A22- Gráficas de los parámetros de calidad del Jet A1..... 91

Figura A23- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Acidez en el Jet A1..... 92

Figura A24- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en el Jet A1 92

Figura A25- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en el Jet A1 92

Figura A26- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Naftalenos en el Jet A1 93

Figura A27- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el Punto de inflamación en el Jet A1 93

Figura A28- Gráficas de los parámetros de calidad del Asfalto 60/70 101

Figura A29- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Ductilidad en el Asfalto 60/70..... 102

Figura A30- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Penetración en el Asfalto 60/70..... 102

Figura A31- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Pérdida de masa en el Asfalto 60/70 102

Figura A32- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el Punto de ablandamiento en el Asfalto 60/70 103

Figura A33- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el Punto de inflamación en el Asfalto 60/70..... 103

Figura A34- Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Solubilidad del tricloroetileno en el Asfalto 60/70 104

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Metodología de Box-Jenkins aplicada para la capacidad de proceso del número de Cetano en el Diesel B2E	52
Apéndice B. Gráficas de los parámetros de calidad del Diesel B2E	62
Apéndice C. Gráficas de estimación de modelos AR, MA y ARIMA para los parámetros de calidad del Diesel B2E.	63
Apéndice D. Error de los modelos AR, MA y ARIMA para el Diesel B2E	65
Apéndice E. Error de capacidad de proceso del Diesel B2E	71
Apéndice F. Gráficas de los parámetros de calidad de la Gasolina motor regular (GMR)	75
Apéndice G. Gráficas de estimación de modelos AR, MA y ARIMA para los parámetros de calidad de la Gasolina motor regular (GMR)	76
Apéndice H. Error de los modelos AR, MA y ARIMA para la Gasolina motor regular (GMR).	79
Apéndice I. Error de capacidad de proceso de la Gasolina motor regular (GMR)	85
Apéndice J. Gráficas de los parámetros de calidad del Jet A1	91
Apéndice K. Gráficas de estimación de modelos AR, MA y ARIMA para los parámetros de calidad del Jet A1	92
Apéndice L. Error de los modelos AR, MA y ARIMA para el Jet A1	94
Apéndice M. Error de capacidad de proceso del Jet A1	98
Apéndice N. Gráficas de los parámetros de calidad del Asfalto 60/70	101

Apéndice O. Gráficas de estimación de modelos AR, MA y ARIMA para los parámetros de calidad del Asfalto 60/70..... 102

Apéndice P. Error de los modelos AR, MA y ARIMA para el Asfalto 60/70..... 104

Apéndice Q. Error de capacidad de proceso del Asfalto 111

Introducción

Ecopetrol es la empresa más grande de Colombia y principal compañía petrolera en el país, contando con dos refinerías ubicadas en Barrancabermeja y Cartagena, es una sociedad de economía mixta de carácter comercial integrada del sector de petróleo y gas, que tiene participación en todas las etapas que hacen parte de la cadena de hidrocarburos: exploración, producción, transporte, refinación y comercialización. En este contexto, la refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol S.A. se enfrenta al desafío de mejorar su control de calidad y análisis operacional para asegurar una operación óptima.

Entendiendo que un proceso se considera como “capaz” al tener estos parámetros de calidad en especificación, se propone realizar contribuciones al análisis operacional mediante el diseño de un modelo de seguimiento y anticipación de los parámetros de calidad de productos clave, para mantener sus propiedades en especificación.

El objetivo general de esta investigación es diseñar e implementar un modelo de seguimiento y anticipación para el control de calidad y herramienta de análisis operacional en la refinería Barrancabermeja. También, se realizará una revisión de los diagramas correspondientes al Crudo reconstituido y Asfalto 60/70 para visualizarlos en tiempo real mediante las herramientas PI Vision y PI Datalink.

Se utilizarán las herramientas PI Vision y Pi Datalink junto a documentos informativos de la refinería y herramientas de análisis de series de tiempo, se plantea la pregunta, ¿de qué manera se puede aportar al análisis operacional y el control de la calidad de los procesos en la refinería?

Resumen

Título: Diseño e implementación de un modelo de seguimiento y anticipación para el control de calidad para el análisis operacional en la refinería Barrancabermeja Ecopetrol s.a. usando los softwares PI Datalink y PI Vision.

Autor: Mateo Ortega Aponte

Palabras clave: Análisis operacional, Hidrocarburos, Capacidad de proceso, Modelo predictivo.

Descripción: En este trabajo se pretende aportar al análisis operacional de la Refinería Barrancabermeja ECOPETROL S.A. mediante el completamiento de diagramas de flujo para supervisión de datos en tiempo real del Crudo reconstituido y el Asfalto 60/70, la recopilación de datos de los parámetros de calidad además de productos clave de la refinería como Diesel B2E, Gasolina motor regular, Jet A1 y Asfalto 60/70, además de, diseñar un modelo matemático que permita la predicción de dichos datos.

Los diagramas de flujo fueron construidos con el acompañamiento conjunto del equipo de ingeniería de proceso y el laboratorio de calidad, de manera que se identificaron las variables cruciales de operación y se pudieron confirmar los resultados de cada una. El modelo matemático para predicción se desarrolló utilizando la metodología de Box-Jenkins, dando como resultado un total de 23 modelos ARIMA, uno asignado por cada parámetro de calidad, esto con el fin de poder calcular si los procesos de producción son capaces, con base en el indicador de Capacidad de Proceso Cpk.

Los modelos obtenidos permiten pronosticar los valores de estos parámetros hasta 15 días en el futuro con errores promedio que van desde %4.51 hasta %18.27 para los 4 productos considerados en este trabajo.

Abstract

Title: Design and implementation of a monitoring and anticipation model for quality control for operational analysis at the Barrancabermeja Ecopetrol S.A. refinery using PI Datalink and PI Vision software.

Author: Mateo Ortega Aponte

Keywords: Operational analysis, Hydrocarbons, Process capacity, Predictive model.

Description: This paper aims to contribute to the operational analysis of the Barrancabermeja ECOPETROL S.A. Refinery. by completing flowcharts for real-time data monitoring of Reconstituted Crude and Asphalt 60/70, data collection of quality parameters as well as key refinery products such as B2E Diesel, Regular Motor Gasoline, A1 Jet and Asphalt 60/70, in addition to designing a mathematical model that allows the prediction of said data.

The flow charts were built with the joint monitoring of the process engineering team and the quality laboratory, so that the crucial operating variables were identified and the results of each one could be confirmed. The mathematical model for prediction was developed using the Box-Jenkins methodology, resulting in a total of 23 ARIMA models, one assigned for each quality parameter, this to be able to calculate if the production processes are capable, based on in the Cpk Process Capability indicator.

The models obtained allow forecasting the values of these parameters up to 15 days in the future with average errors ranging from %4.51 to %18.27 for the 4 products considered in this work.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general:

Diseñar un modelo de seguimiento y anticipación para el control de calidad para el análisis operacional en la refinería Barrancabermeja Ecopetrol S.A. usando los softwares PI Datalink y PI Vision.

1.2. Objetivos específicos:

- Identificar las variables principales en el seguimiento a los procesos químicos de las líneas de producción de la refinería de Barrancabermeja para la construcción de diagramas con información en tiempo real de estas.
- Reconocer los parámetros que determinan la calidad de los productos de la refinería de Barrancabermeja para establecer la capacidad de proceso de las líneas de producción.
- Definir un método numérico que permita estimar datos a futuro mediante la extrapolación de datos históricos para implementar un modelo predictivo que contribuya al análisis operacional.

2. Marco conceptual

El presente trabajo se desarrolló considerando tres tópicos principales: el manejo de las herramientas PI Vision y PI Datalink, los conceptos relacionados a la Capacidad de Proceso, y los métodos numéricos que permiten aproximar los datos a valores futuros de manera que se logren predecir con la exactitud requerida.

PI Vision y PI Datalink

El sistema PI consiste en un paquete de software que mediante diferentes instrumentos de medición y/o mecanismos de recopilación de datos permite almacenar, procesar, relacionar y visualizar la información en tiempo real, para esto utiliza los Puntos PI, que son el flujo de datos que provienen de un instrumento, dispositivo o sensor que alimentan al sistema.

Los Tag PI tienen Atributos, los cuales son los diferentes tipos de información que cada punto contiene, dentro de los que se encuentran: valor de la medición, unidades de la medición, fecha y hora de la medición, descripción de la medición, fuente de datos de la medición, entre otros.

Asimismo, los Tag PI se agrupan en Elementos PI, dentro de una interfaz llamada PI System Explorer, la cual permite navegar en la jerarquía Asset Framework (AF), donde se encuentra la información organizada por equipos y sistemas.

Para la búsqueda de los Tag PI, se utiliza el software **PI Datalink**, que consiste en una extensión para Microsoft Excel que permite la búsqueda de los Tags, accediendo a la información correspondiente a sus atributos, lo que facilita organizarlos en tablas para que posteriormente se ubiquen según corresponda en el AF.

En la *Figura 1*, se muestra la pestaña de PI Datalink en Excel y una tabla de Tags PI organizados para ser agregados a la jerarquía del Asset Framework:

Figura 1

Captura de pantalla de PI Datalink en Excel

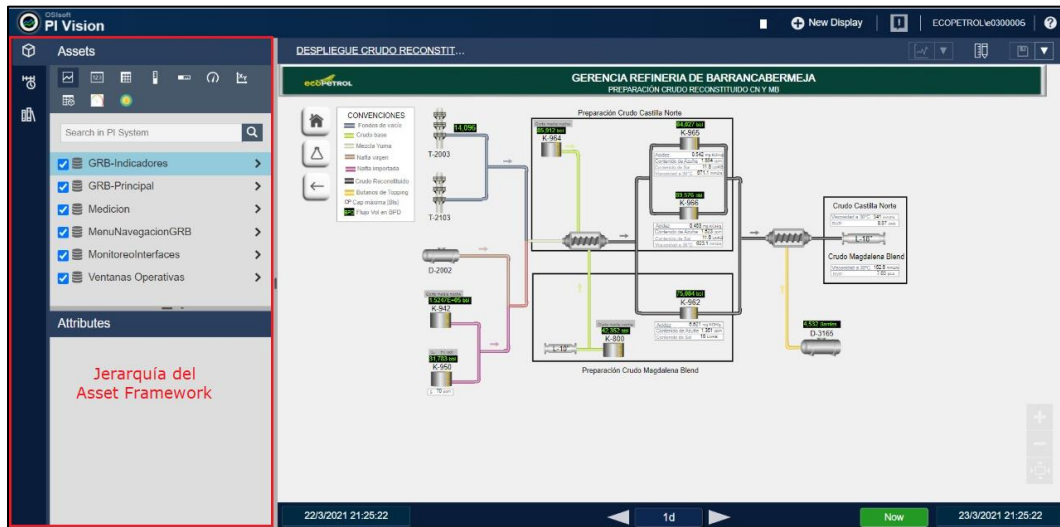
Proceso	Material	Propiedad	Descripción	Alias	Tag
ASFALTO					
FONDOS DAB	Asfalto	Penetración a 25°C	Penetración Fondos DAP	/ALIAS="PENETRACION A 25°C (77°F) mm/10 T-1004 B FONDOS DAP"	CB1-LAB-FONDODAP-PENETRACION
CASETA VIPEX	Asfalto	Penetración a 25°C	Penetración asfalto	/ALIAS="PENETRACION A 25°C (77°F) mm/10 ASFALTO DE LINEA U-150 SEGUN	U150-LAB-LINEASEGUNDA-PENETRACION
Refinación/Producción	Asfalto	Viscosidad a 212 F	Viscosidad asfalto	/ALIAS="VISCOSIDAD A 212 F (cP) ASFALTO DE LINEA U-150 SEGUNDA HORA"	U150-LAB-LINEASEGUNDA-VISCOSIDAD
Refinación/Producción	Asfalto	Carga a tanques	Flujo asfalto		\\PIGRB\U150-FIT15041
Refinación/Producción	Asfalto	Temperatura	Temperatura asfalto		\\PIGRB\U150-T101561
HORNOS					
Refinación/Producción	Asfalto	Temperatura	Temperatura asfalto		\\PIGRB\U200-TT206
Refinación/Producción	Asfalto	Temperatura	Temperatura asfalto		\\PIGRB\U200-T102004
Refinación/Producción	Asfalto	Temperatura	Temperatura asfalto		\\PIGRB\U200-T120002
TORRES DE VACÍO					
Refinación/Producción	Asfalto	Penetración			\\PIGRB\U200-VRI_T205_PENETRACION
Refinación/Producción	Asfalto	Penetración			\\PIGRB\U200-FOND_PEN_25
Refinación/Producción	Asfalto	Penetración			\\PIGRB\U2100-T2103_PENETRACION
ALMACENAMIENTO					
Materias Primas/C	Asfalto	Viscosidad a 212 F	Viscosidad asfalto	/ALIAS="VISCOSIDAD A 212 F (cP) K0200 ASFALTO 60/70"	CB1-LAB-K0200VB-VISCOSIDAD
Materias Primas/C	Asfalto	Penetración a 25°C	Penetración asfalto	/ALIAS="PENETRACION A 25°C (77°F) mm/10 K0200 ASFALTO 60/70"	CB1-LAB-K0200VB-PENETRACION
Materias Primas/C	Asfalto	Pérdida de masa	Pérdida de masa asfalto	/ALIAS="PERDIDA DE MASA (RTFO7) (g/100g) K0200 ASFALTO 60/70"	CB1-K0200_60/70_PERMASA
Materias Primas/C	Asfalto	Viscosidad a 212 F	Viscosidad asfalto	/ALIAS="VISCOSIDAD A 212 F (cP) K0205 ASFALTO 60/70"	CB5-K205_VISCOS
Materias Primas/C	Asfalto	Penetración a 25°C	Penetración asfalto	/ALIAS="PENETRACION A 25°C (77°F) mm/10 K0205 ASFALTO 60/70"	CB1-LAB-K0205VB-PENETRACION
Materias Primas/C	Asfalto	Pérdida de masa	Pérdida de masa asfalto	/ALIAS="PERDIDA DE MASA (RTFO7) (g/100g) K0205 ASFALTO 60/70"	CB1-K0205_60/70_PERMASA
Materias Primas/C	Asfalto	Viscosidad a 212 F	Viscosidad asfalto	/ALIAS="VISCOSIDAD A 212 F (cP) K0206 ASFALTO 60/70"	CB1-LAB-K0206VB-VISCOSIDAD
Materias Primas/C	Asfalto	Penetración a 25°C	Penetración asfalto	/ALIAS="PENETRACION A 25°C (77°F) mm/10 K0206 ASFALTO 60/70"	CB1-LAB-K0206VB-PENETRACION
Materias Primas/C	Asfalto	Pérdida de masa	Pérdida de masa asfalto	/ALIAS="PERDIDA DE MASA (RTFO7) (g/100g) K0206 ASFALTO 60/70"	CB1-LAB-K0206VB-PERDIDAMASA

Por otro lado, la plataforma PI Vision permite la representación de tablas, gráficos y diagramas de los diferentes procesos de la refinería utilizando los datos de los Tags PI que fueron añadidos a la jerarquía del Asset Framework, facilitando así mediante Pantallas la visualización de información crucial en la operación de la refinería y por consiguiente, el análisis de la misma.

En la *Figura 2* se muestra la Pantalla de la preparación de Crudo reconstituido en PI Vision y se señala la jerarquía del Asset Framework:

Figura 2

Captura de pantalla de la plataforma PI Vision



PI Vision cuenta con la ventaja de ser accesible desde cualquier navegador web y cumple la función de tener herramientas visuales que utilizando los Tag PI organizados permita una rápida interpretación del flujo de información en tiempo real y, por consiguiente, facilite la toma de decisiones.

Capacidad de proceso

Según la Norma ISO 9000, un proceso se define como “un conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados”, en los diferentes procesos que se llevan a cabo en la refinería se presentan variaciones, las cuales tienen causas aleatorias (no asignables a un único fenómeno específico) o causas especiales (atribuidas a un motivo determinado).

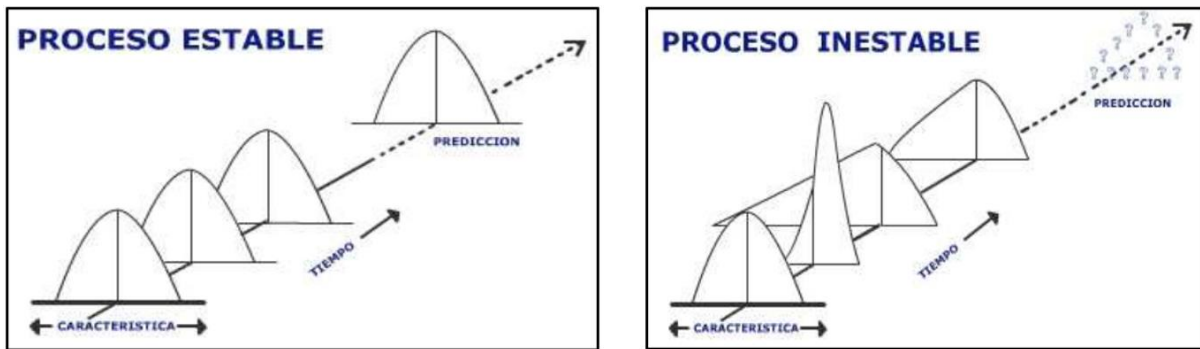
Se dice que un proceso está bajo control cuando en él sólo intervienen causas aleatorias, sin embargo, esta situación no conlleva a que las características de los resultados

del proceso se encuentren en el rango deseado. Se define que un proceso es capaz cuando pese a que la totalidad de sus variaciones sean aleatorias, los resultados obtenidos se encuentran en un rango considerado como Especificación.

Un proceso estable se caracteriza por tener una distribución normal en los datos, formando la conocida campana de Gauss al representar Valores vs Frecuencia, sin embargo, los procesos inestables presentan modificaciones en esta distribución, lo que dificulta su predictibilidad. Este comportamiento se muestra en la Figura 3 :

Figura 3

Comportamiento en el tiempo de un proceso estable e inestable



Nota. Adaptado de Seis Sigma y la capacidad del proceso en proyectos, Rubén Cariño, 2002.

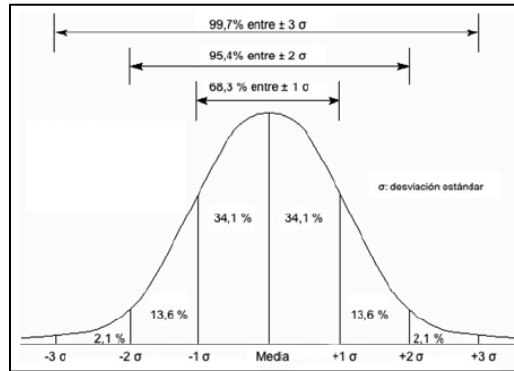
Considerando que los procesos para tener en cuenta son estables, bajo control y sus datos presentan la distribución normal característica, se entiende que la Capacidad es una medida de dispersión que se relaciona con la desviación estándar de los datos, así:

$$\text{Capacidad} = 6 \cdot \sigma \tag{Ec.1}$$

Esta relación se establece al considerar que, en un conjunto de datos con distribución normal, un rango de tres veces la desviación estándar por encima y por debajo de la media (μ) contendría el 99.73% de los datos, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Rango considerado en la Capacidad teniendo para datos con distribución normal



Nota. Adaptado de Seis Sigma y la capacidad del proceso en proyectos, Rubén Cariño, 2002.

Como se mencionó anteriormente, existe un rango llamado Especificación, en el cual se tiene como objetivo contener a todos los datos, este está determinado por el Límite Superior de Especificación (LSE) y/o el Límite Inferior de Especificación (LIE). Para realizar la medición y poder determinar qué tan Capaz es un proceso, se utilizan los índices de capacidad, que se calculan como se muestra en la Tabla 1 :

Tabla 1

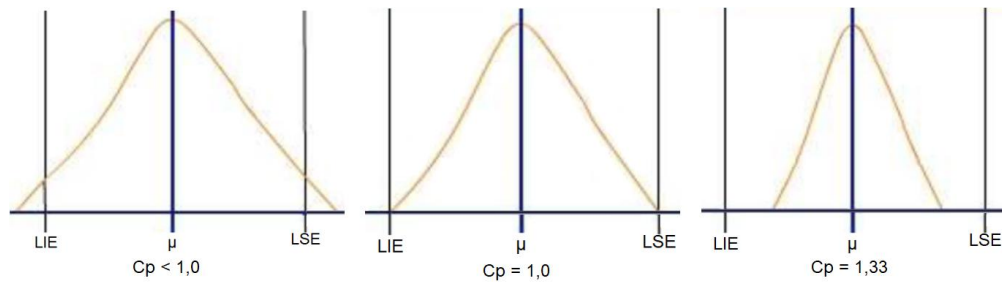
Índices de capacidad según las condiciones de especificación

Índice de capacidad	LIE	LSE	Fórmula
Cp	Sí	Sí	$\frac{LSE-LIE}{6\sigma}$ (Ec. 2)
Cpi	Sí	No	$\frac{LSE-\mu}{3\sigma}$ (Ec.3)
Cps	No	Sí	$\frac{\mu-LIE}{3\sigma}$ (Ec. 4)

El valor del índice de capacidad de proceso será un indicador de qué porcentaje de los datos para una distribución normal se encontrarán en el rango de Especificación, o, en otras palabras, qué tan Capaz es el proceso.

Figura 5

Índice de capacidad de proceso para diferentes conjuntos de datos



Nota. Adaptado de Seis Sigma y la capacidad del proceso en proyectos, Rubén Cariño, 2002.

Como se observa en la *Figura 5*, entre mayor sea el valor del Cp, más Capaz será el proceso, para lo cual se establece que el mínimo valor es 1,33, el valor deseable es 2 y el valor ideal será 5. Si bien, los índices de capacidad mencionados permiten determinar si los datos están en el rango de Especificación, no se han considerado los casos en los cuales el proceso no está centrado, es decir, el promedio de los datos se encuentra más cerca de uno de los límites de especificación, ya sea el LIE o el LSE. Para determinar si el proceso está centrado, se utiliza el denominado Índice de Capacidad Real Cpk que se calcula según:

$$Cpk = \text{Mín}\left\{\frac{LSE-\mu}{3\sigma}, \frac{\mu-LIE}{3\sigma}\right\} \tag{Ec. 5}$$

La interpretación del Cpk se realiza de la siguiente manera:

Comparación con Cp	Interpretación del valor
Si Cpk = Cp, entonces el proceso está centrado	Si Cpk > 1, el proceso cumple las especificaciones
Si Cpk < Cp, entonces el proceso no está centrado	Si Cpk < 1, el proceso obtiene valores fuera de especificación
	Si Cpk es igual o menor a cero, la media del proceso está fuera de especificación

De manera que el Cp representa la capacidad de proceso potencial y el Cpk representa la capacidad de proceso real.

3. Metodología

Fase I. Identificación de variables y construcción de diagramas

Este objetivo se desarrollará en dos actividades:

1. Mediante revisión de la información suministrada por la empresa y espacios sincrónicos con el personal de ingeniería se definirán las variables a considerar.

2. Utilizando los softwares PI Datalink y PI Vision, se realizará la construcción de diagramas que permitan visualizar líneas de producción con las variables previamente seleccionadas.

Fase II. Reconocimiento de los parámetros que determinan la capacidad de proceso

Este objetivo se desarrollará en dos actividades:

1. Mediante documentación otorgada por parte de la empresa, se reconocerán las variables que definen los parámetros de calidad de las líneas de producción y se calculará la capacidad de proceso con los datos reportados en estas.

2. Mediante el software PI Vision, se representará el valor calculado en tiempo real de la capacidad de proceso de las líneas de producción.

Fase III. Definición de un método numérico para implementar modelo predictivo

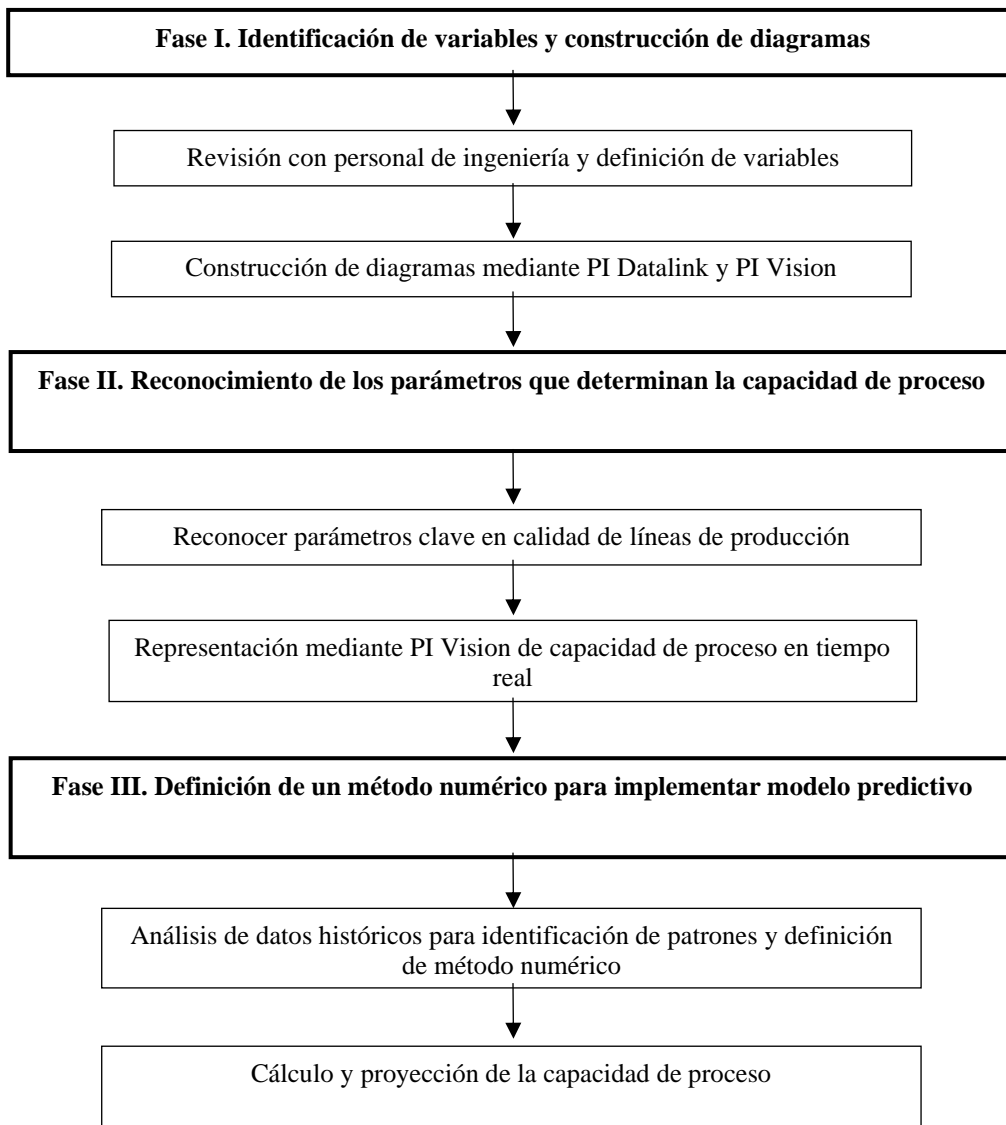
Este objetivo se desarrollará en dos actividades:

1. Se analizarán los datos históricos de los parámetros de calidad para definir según su comportamiento, qué método numérico se ajusta a los datos que permita hacer extrapolación respetando un rango específico de error.

2. Se utilizarán los valores estimados para proyectar la capacidad de proceso utilizando una cantidad fija de registros.

Figura 6

Diagrama de flujo de la metodología desarrollada



4. Resultados

Fase I. Identificación de variables y construcción de diagramas

Los diagramas asignados para trabajar corresponden a las líneas de producción de Asfalto y de Crudo reconstituido de la GRB. Esta primera parte se desarrolló como una aproximación y reconocimiento del entorno y funcionamiento del sistema PI para luego aplicarlo en las siguientes fases.

- Asfalto 60/70: La preparación de asfalto en la GRB se da por dos rutas, la primera mediante el fraccionamiento de las unidades de destilación y tratamiento con temperatura; la segunda ruta es como salida de fondos de la unidad de desasfaltado con propano (DAP).

Según indicaciones del equipo de ingeniería, actualmente la variable más importante en la producción de asfalto es la penetración a 25°C, la cual determina la deformación elástica que este tiene a temperatura ambiente, sus unidades son mm/10. Esta variable es influenciada por la temperatura de los hornos que calientan los fondos de vacío, por lo cual la temperatura de estos debe tener seguimiento. Como variables complementarias se consideró la viscosidad a 100°F enfocada en el transporte del producto, la pérdida de masa porcentual para conocer rendimiento de la preparación y la temperatura para tener los tanques de almacenamiento en control.

- Crudo reconstituido: La preparación de crudo reconstituido en la GRB se da como una alternativa para aprovechar subproductos y generar materia prima para otras refinerías generando así una contribución al margen. En la refinería se preparan 2 tipos de crudo reconstituido: Castilla Norte y Magdalena Blend, su principal diferencia radica en que utilizan el crudo Isla VI y Velásquez como crudo base, respectivamente.

Con base en la información compartida por el equipo de ingeniería de proceso, se determinó que las variables de control para el almacenamiento del crudo son el contenido de

azufre, contenido de sal y acidez. Para el producto final a despachar como entrega a CENIT, se controla la viscosidad a 30°C y la Presión de Vapor Reid.

La preparación del crudo reconstituido se realiza mediante procesos de mezclado, en los cuales se añaden fondos de las torres de vacío, naftas, butanos y un crudo base proveniente de campos. A continuación, en las Figuras 7 y 8 se presentan los diagramas previamente mencionados:

Figura 7

Diagrama de línea de producción de Asfalto 60/70 en la GRB

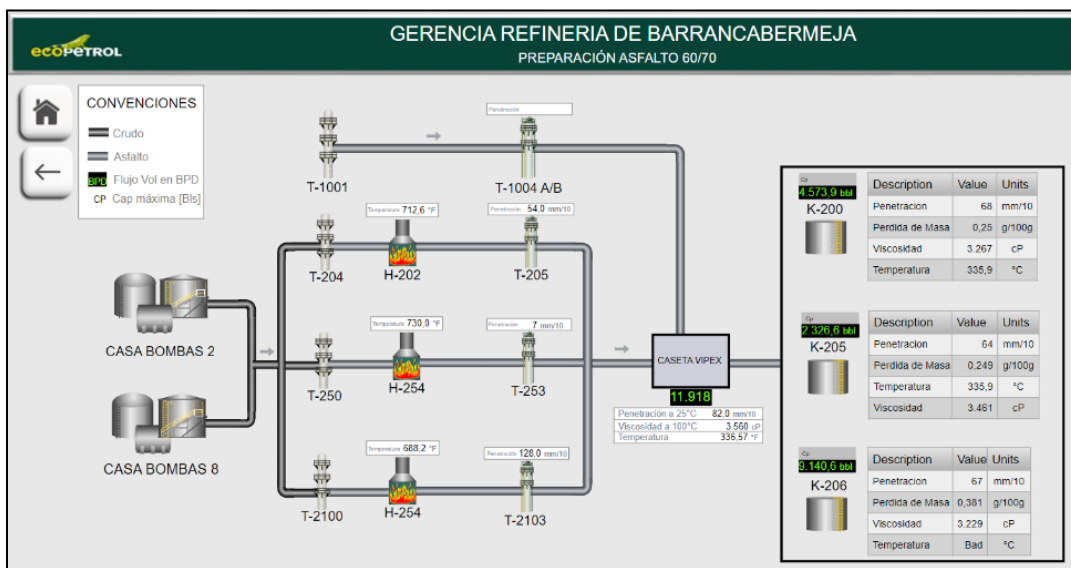
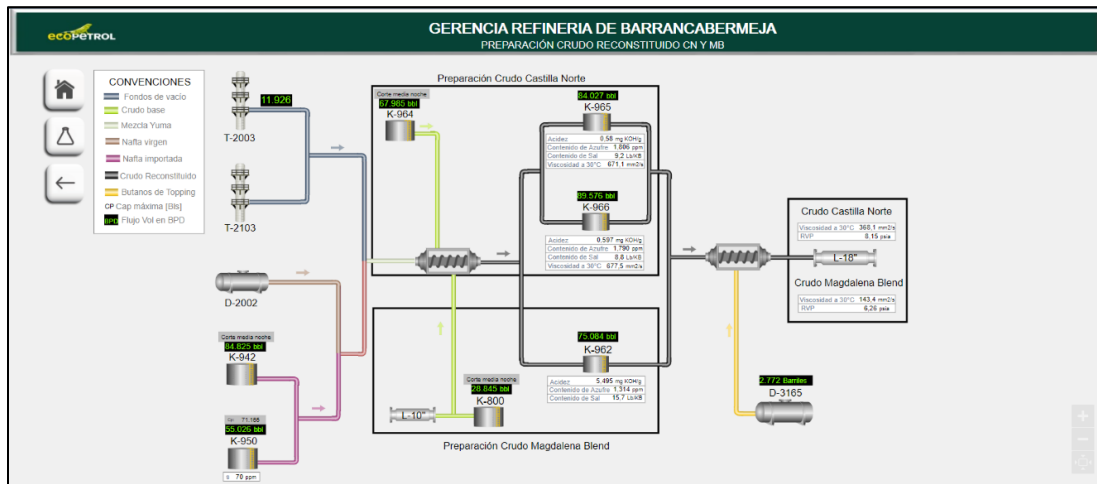


Figura 8

Diagrama de línea de producción de Crudo reconstituido en la GRB



Fase II. Reconocimiento de los parámetros que determinan la capacidad de proceso

Diesel B2E: Este producto combustible de la GRB cuenta con 21 parámetros de calidad que se controlan y reportan en cada tanque preparado, sin embargo, son 6 los parámetros que se consideran críticos para controlar en esta línea producción.

En la Tabla 2 se presentarán los parámetros de calidad críticos:

Tabla 2

Parámetros de calidad críticos en la línea de producción de Diesel B2E

Parámetro de calidad	Unidades	Límites de especificación	
		Inferior	Superior
Azufre	mg/kg	-	15,0
Aromáticos	% vol.	-	28,5
Número de Cetano	Número de Cetano	45	-
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	1,9	4,5
Temperatura de 95 % vol. recobrado	°C	282	370
Contenido Poliaromáticos	% en masa	-	11

Gasolina Motor Regular y Extra: En la refinería se producen 2 tipos de gasolinas, la Gasolina Motor Regular (GMR) y la Gasolina Motor Extra (GME), las cuales se someten al análisis de 16 parámetros de calidad, donde se determinaron 6 como los que requieren mayor seguimiento.

En la Tabla 3 se presentan los parámetros de calidad de mayor seguimiento en la producción de gasolina en la GRB.

Tabla 3

Parámetros de calidad críticos en la línea de producción de Gasolina

Parámetro de calidad	Unidades	Límites de especificación	
		Inferior	Superior
Azufre	mg/kg	-	130,0
Aromáticos totales	% vol.	-	28,0
Benceno	% vol.	-	1,0
Índice antidetonante	Octanos	81,2	-
Punto Final de Ebullición	°C	-	210
Presión de vapor Reid, RVP	psia	-	8,0

Jet A1: El combustible Jet A1 es el combustible utilizado en los aviones, por lo cual es el que mayor atención y control recibe en sus parámetros de calidad, en total se reportan 30 medidas, de las cuales se realiza especial seguimiento a 5, para determinar si el proceso de producción de Jet A1 es capaz.

En la Tabla 4 se presentan los parámetros de calidad que determinan la capacidad de proceso de la línea de producción de Jet A1.

Tabla 4

Parámetros de calidad críticos en la línea de producción de Jet A1

Parámetro de calidad	Unidades	Límites de especificación	
		Inferior	Superior
Acidez	mgKOH/g	-	0,1
Aromáticos	% vol.	-	25,0
Azufre	% en masa	-	0,3
Naftalenos	% vol.	-	3,0
Punto de Inflamación	°C	38,0	-

Asfalto 60/70: Uno de los productos no combustibles de la GRB es el Asfalto 60/70, que como cuyo nombre indica, posee valores entre 60 y 70 mm/10 de penetración, que junto a otros 5 parámetros de calidad más son los que tienen especial seguimiento para su producción.

En la Tabla 5 se presentan los parámetros de calidad claves en la preparación de Asfalto 60/70 en la GRB.

Tabla 5

Parámetros de calidad críticos en la preparación de Asfalto 60/70

Parámetro de calidad	Unidades	Límites de especificación	
		Inferior	Superior
Ductilidad	cm	100	-
Penetración	mm/10	60	70
Pérdida de masa	% en masa	-	1
Punto de ablandamiento	°C	45	55
Punto de inflamación	°C	232	-
Solubilidad en Tricloroetileno	% en masa	99	-

Fase III. Definición de un método numérico para implementar modelo predictivo

Para realizar un pronóstico de los valores, se identificaron los grupos de datos como “Series de tiempo”, las cuales se definen como una colección de observaciones realizadas de forma secuenciada a través del tiempo, por lo cual metodologías como la proyección lineal o polinómica no serían las más adecuadas y se requiere de un modelo que tenga en cuenta los cambios en los valores cercanos en tiempo a las estimaciones que se quieren realizar.

Por ello, se decidió implementar el modelo ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Abaraje), el cual permite proyectar datos teniendo en cuenta los datos históricos de la serie y garantizando que los residuales del modelo sean ruido blanco, es decir, que estos no tengan autocorrelación para asegurar que todas las relaciones entre datos estén incluidas en el modelo.

Para aplicar este modelo a las series de datos, se consideró utilizar los valores de las diferentes variables de parámetros de calidad antes de calcular la Capacidad de Proceso, dado que las mediciones son valores de fuente primaria que describen de forma más directa los resultados del proceso de producción en cuestión.

Para este trabajo se utilizará la metodología de Box-Jenkins, la cual consiste en 4 pasos:

1. Identificación del modelo ARIMA: Prueba de estacionariedad y modelo provisional
2. Estimación: Identificación de parámetros verificación de estacionariedad.
3. Diagnóstico: Análisis del comportamiento de los residuales.
4. Predicción: Aplicación del modelo para proyectar valores futuros.

En el Apéndice A se explica la metodología paso a paso aplicada a la capacidad de proceso del número de Cetano del Diesel B2E para la obtención de un modelo ARIMA para estimar valores en el periodo comprendido entre el 01/09/2020 14/09/2020.

Dado que no todas las medidas de las variables fueron tomadas los mismos días, solo se consideraron los días en los cuales se tiene registro de medición todas las variables de un mismo producto, las mediciones tomadas en un mismo día de una misma variable se promediaron para considerar un único valor de esta por cada día.

Diesel B2E

En los anexos se encuentra la información correspondiente a la representación de los datos, los modelos de estimación y los porcentajes de error para los parámetros de calidad del Diesel B2E (Apéndice B, Apéndice C, Apéndice D).

A continuación, en la Tabla 6, se muestran los resultados compilados de los errores de los modelos de pronóstico utilizados junto a estadísticos de los datos de origen y los límites de especificación correspondientes.

Tabla 6

Error porcentual de modelos de pronóstico y estadísticos de los parámetros de calidad del Diesel B2E

Parámetro	LIE	LSE	Media	Coef. de Variación	Curtosis	% Error AR	% Error MA	% Error ARIMA
Azufre	-	15,0	8.4307	36.5845	3.1975	10.4606	19.5841	11.2902
Aromáticos	-	28,5	24.3037	8.5947	-0.4102	9.8590	10.2967	9.7876
Número de Cetano	45	-	46.9480	3.2422	-0.4472	1.0011	1.9332	0.9886
Viscosidad	1,9	4,5	3.7207	9.9538	-0.6146	0.6149	0.5264	0.7883
Temperatura de 95 % vol. Recobrado	282	370	364.3277	1.3122	-0.9782	0.3840	0.3689	0.3765
Poliaromáticos	-	11	4.5165	28.5037	-0.8599	21.3908	19.5355	17.4674

Se deduce que el modelo AR tuvo la mejor aproximación para el contenido de Azufre, posiblemente relacionado a una curtosis alta que describe una distribución angosta de los datos, aumentando el impacto de los factores autorregresivos en el comportamiento de los datos.

En los parámetros: contenido de Poliaromáticos y T95, los cuales son aquellos con curtosis más negativa, se aprecia que una distribución de datos aplanada causa que el modelo AR tenga el mayor error de los tres modelos evaluados.

Para la mitad de los parámetros de calidad se obtuvo el modelo ARIMA como el de menor error porcentual, en los otros parámetros el mejor modelo tuvo un porcentaje de error con diferencia menor al 2% del obtenido para su modelo ARIMA correspondiente, es decir, aunque el modelo ARIMA no funcione como mejor aproximación para todos los casos, no dista de serlo al considerar factores autorregresivos y de medias móviles.

En el Apéndice E. Error de capacidad de proceso del Diesel B2E se incluyen las proyecciones de la capacidad de proceso Cpk utilizando los datos pronosticados por el modelo con menor error de cada parámetro y su error porcentual, se destaca que los modelos AR, MA y ARIMA lograron estimaciones entre el 0.01% y el 2.47% de error, como se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7

Error porcentual del pronóstico de la capacidad de proceso Cpk de los parámetros de calidad del Diesel B2E

Parámetro	Modelo	%Error Cpk
Azufre	AR	0.4625
Aromáticos	ARIMA	2.4669
Número de Cetano	ARIMA	1.4333
Viscosidad a 40°C	MA	0.0168
Temperatura de 95% vol. recobrado	MA	0.6694
Poliaromáticos	ARIMA	1.4835

Gasolina Motor Regular (GMR)

Para el pronóstico de la Gasolina motor regular (GMR), se adjuntan en los anexos la información correspondiente a la representación de los datos, los modelos de estimación y los porcentajes de error para los parámetros de calidad (Apéndice F, Apéndice G, Apéndice H).

A continuación, en la Tabla 8 se muestran los resultados compilados de los errores de los modelos de pronóstico utilizados.

Tabla 8

Error porcentual de modelos de pronóstico y estadísticos de los parámetros de calidad de la Gasolina motor regular

Parámetro	Unidades	LIE	LSE	Media	Coef. de Variación	Curtosis	% Error AR	% Error MA	% Error ARIMA
Azufre	mg/kg	-	130.0	90.3027	37.8703	1.8187	10.3184	10.7193	10.5336
Aromáticos totales	%vol.	-	28.0	17.1559	10.3524	0.6414	6.4023	7.1620	6.2610
Benceno	%vol.	-	1.0	0.6881	13.0761	0.9705	6.1367	11.0436	6.2409
Índice antidetonante	Octanos	81.2	-	82.7487	1.2510	0.4577	0.4875	0.4698	0.5513
Punto Final de Ebullición	°C	-	21.0	195.1382	2.1077	2.0644	1.0589	1.0370	1.1009
Presión de vapor Reid	psia	-	8.0	7.7221	4.8029	15.2604	2.2618	2.2128	2.3773

Se identifica que aquellas variables con menor coeficiente de variación lograron una mejor aproximación en las predicciones mediante modelos de medias móviles, independiente de la concentración de los datos, como se observa en los diferentes valores de curtosis registrados.

Para todos los parámetros de calidad de la GMR se obtuvo una distribución de datos leptocúrtica, que indica que los datos están concentrados, haciendo que, si la media de los datos se

encuentra a 3 desviaciones estándar de los límites de especificación, la capacidad de proceso obtenida para dicho parámetro cumplirá con las expectativas del control del proceso.

En el Apéndice I se incluyen las proyecciones de la capacidad de proceso Cpk utilizando los datos pronosticados por el modelo con menor error de cada parámetro de calidad y su error porcentual, se destaca que los modelos AR, MA y ARIMA lograron estimaciones entre el 0.32% y el 2.9% de error, como se muestra en la Tabla 9:

Tabla 9

Error porcentual del pronóstico de la capacidad de proceso Cpk de los parámetros de calidad de la Gasolina motor regular

Parámetro	Modelo	%Error Cpk
Aromáticos	ARIMA	0.3751
Azufre	AR	0.3663
Benceno	AR	1.1157
IAD	MA	0.4954
PFE	MA	0.3273
RVP	MA	2.3889

Jet A1

Con relación al combustible Jet A1, se presenta en los anexos la representación de los datos, los valores obtenidos mediante modelos de estimación de series de tiempo y los porcentajes de error de los mismos, correspondientes a los parámetros de calidad (Apéndice J, Apéndice K, Apéndice L). Los estadísticos de los datos originales, resultados de los modelos de pronóstico y sus correspondientes errores porcentuales se presentan a continuación en la Tabla 10.

Tabla 10

Error porcentual de modelos de pronóstico y estadísticos de los parámetros de calidad del Jet A1

Parámetro	Unidades	LIE	LSE	Media	Coef. de Variación	Curtosis	% Error AR	% Error MA	% Error ARIMA
Acidez	mgKOH/g	-	0.1	0.0462	49.1955	-1.3203	69.3929	61.7767	46.4557
Aromáticos	% vol.	-	25.0	17.555	7.0503	-0.3205	6.0394	3.6243	3.9398
Azufre	% en masa	-	0.3	0.0669	31.8184	-0.7438	45.1085	37.7262	20.6830
Naftalenos	% vol.	-	3.0	1.9307	17.2943	14.2412	15.8129	16.5586	14.1572
Punto de inflamación	°C	38.0	-	45.724	7.8645	0.6923	8.3396	9.5276	6.0987

El modelo ARIMA mostró mejor aproximación para 4 de los 5 parámetros de calidad, se refuerza la tendencia a que este modelo sea el de menor error cuando los coeficientes de variación son altos, para coeficientes de variación bajos, los modelos de Medias móviles tienden a tener una mejor aproximación.

La estimación de valores del Jet A1 pudo ser influenciada por la ausencia de datos, contando con entre 57 y 60 datos por cada parámetro para el mismo periodo comprendido entre febrero 1 de 2020 y septiembre 14 de 2020, lo cual causaría una pérdida significativa de exactitud y precisión en los pronósticos de los datos. El parámetro de contenido de Aromáticos consiguió el menor error (3,94%) debido a que su coeficiente de variación también fue el menor (7,05%).

En la Tabla 11 se indica cual fue el modelo que generó los datos con mejor aproximación para cada uno de los parámetros de calidad del Jet A1, junto al valor de su error porcentual en la proyección de la capacidad de proceso Cpk, dicha proyección se encuentra en el Apéndice M.

El modelo autorregresivo AR no presentó la mejor aproximación en ninguna variable, y el error del Cpk calculado con datos estimados por los modelos AR y ARIMA oscila entre 0.57% y 3.88%.

Tabla 11

Error porcentual del pronóstico de la capacidad de proceso Cpk de los parámetros de calidad del Jet A1

Parámetro	Modelo	%Error Cpk
Acidez	ARIMA	0.5719
Aromáticos	MA	2.3654
Azufre	ARIMA	1.1647
Naftalenos	ARIMA	2.0300
Punto de inflamación	ARIMA	3.8797

Asfalto 60/70

En el apartado de anexos se encuentran los resultados de las predicciones obtenidas a partir de modelos AR, MA y ARIMA para cada uno de los parámetros de calidad del Asfalto 60/70 junto a sus correspondientes representaciones gráficas y error porcentual (Apéndice N, Apéndice O, Apéndice P). Los datos previamente mencionados junto a los estadísticos de las series de datos originales se muestran a continuación en la

Tabla 12.

Tabla 12

Error porcentual de modelos de pronóstico y estadísticos de los parámetros de calidad del Asfalto 60/70

Parámetro	Unidades	LIE	LSE	Media	Coef. de Variación	Curtosis	% Error AR	% Error MA	% Error ARIMA
Ductilidad	cm	100	-	140.6791	1.0730	3.0785	0.9116	0.8942	0.8410
Penetración	mm/10	60	70	68.6285	16.4163	2.1683	13.4974	13.4191	13.0727
Pérdida de masa	% en masa	-	1	0.2955	56.6809	0.7132	26.6607	25.3536	25.7866
Punto de ablandamiento	°C	45	55	47.9128	1.9917	2.4326	1.3639	1.3328	1.1480
Punto de inflamación	°C	232	-	286.1574	3.7730	2.0438	1.9433	2.3452	1.9324
Solubilidad en Tricloroetileno	% en masa	99	-	99.8461	0.1479	0.4611	0.1754	0.1718	0.1700

La Solubilidad en Tricloroetileno fue el parámetro con coeficiente de variación menor y por tanto mostró el menor error en su proyección, sin embargo, el cálculo de la capacidad de proceso Cpk con el valor proyectado no da como resultado el menor error entre los parámetros.

El parámetro de pérdida de masa presentó el mayor coeficiente de variación, lo que incidió en la predicción menos acertada tanto para el valor del parámetro (%25,3536) como para la Capacidad de proceso Cpk estimada (%20,1869). Por otro lado, el modelo ARIMA mostró el menor error para 5 de los 6 parámetros de calidad del Asfalto 60/70.

Al analizar el coeficiente de variación y la curtosis de los datos, se aprecia que entre mayor sea su producto, mayor es el error en la predicción, obteniendo de mayor a menor error Solubilidad en Tricloroetileno, Ductilidad, Punto de ablandamiento, Punto de inflamación, Penetración y Pérdida de masa. Sin embargo, el error en la estimación de la capacidad de proceso no sigue este patrón, como se aprecia en la Tabla 13.

Tabla 13

Error porcentual del pronóstico de la capacidad de proceso Cpk de los parámetros de calidad del Asfalto 60/70

Parámetro	Modelo	%Error Cpk
Ductilidad	ARIMA	4.0029
Penetración	ARIMA	24.7112
Pérdida de masa	MA	20.1869
Punto de ablandamiento	ARIMA	3.8490
Punto de inflamación	ARIMA	1.0634
Solubilidad en Tricloroetileno	ARIMA	5.8293

Los cálculos fuente de los valores de la anterior tabla se encuentran en el Apéndice Q.

A manera de análisis global, se revisó la efectividad de los modelos ARIMA para realizar predicciones de los parámetros de calidad de los productos Diesel E2B, Gasolina motor regular, Jet A1 y Asfalto 60/70. Se aprecia que, de los 22 parámetros de calidad, 3 (13,04%) tuvieron mejor aproximación con el modelo Autorregresivo AR, 7 (30,43%) con el modelo de Medias Móviles MA y 13 (56,52%) con el modelo ARIMA.

Dado que no se realizaron la misma cantidad de mediciones para todos los parámetros en el periodo del 1 de enero al 15 de septiembre de 2020, no todos los modelos tuvieron la misma cantidad de información de entrada lo que afectó en la precisión de las proyecciones.

Lo anterior se aprecia en el Jet A1 que tuvo un promedio de 58,2 datos por variable, teniendo el mayor porcentaje de error en sus predicciones y la Gasolina Motor Regular, que tuvo 208,3 datos por variable, tuvo los menores porcentajes de error de entre los 4 productos de estudio, como se aprecia en la Tabla 14.

Tabla 14

Resumen general de los resultados de los modelos de predicción para todos los parámetros de calidad evaluados

Producto	Parámetro	Número de datos	% Error AR	% Error MA	% Error ARIMA	Mejor modelo
DIESEL B2E	Azufre	173	10.4606	19.5841	11.2902	AR
	Aromáticos	173	9.8590	10.2967	9.7876	ARIMA
	Número de Cetano	173	1.0011	1.9332	0.9886	ARIMA
	Viscosidad	173	0.6149	0.5264	0.7883	MA
	Temperatura de 95 % vol. Recobrado	173	0.3840	0.3689	0.3765	MA
	Poliaromáticos	173	21.3908	19.5355	17.4674	ARIMA
GASOLINA MOTOR REGULAR	Azufre	210	10.3184	10.7193	10.5336	AR
	Aromáticos totales	208	6.4023	7.1620	6.2610	ARIMA
	Benceno	208	6.1367	11.0436	6.2409	AR
	Índice antidetonante	208	0.4875	0.4698	0.5513	MA
	Punto Final de Ebullición	209	1.0589	1.0370	1.1009	MA
	Presión de vapor Reid	207	2.2618	2.2128	2.3773	MA
JET A1	Acidez	58	69.3929	61.7767	46.4557	ARIMA
	Aromáticos	56	6.0394	3.6243	3.9398	MA
	Azufre	57	45.1085	37.7262	20.6830	ARIMA
	Naftalenos	58	15.8129	16.5586	14.1572	ARIMA
	Punto de inflamación	62	8.3396	9.5276	6.0987	ARIMA
	Ductilidad	187	0.9116	0.8942	0.8410	ARIMA
ASFALTO 60/70	Penetración	188	13.4974	13.4191	13.0727	ARIMA
	Pérdida de masa	185	26.6607	25.3536	25.7866	MA
	Punto de ablandamiento	189	1.3639	1.3328	1.1480	ARIMA
	Punto de inflamación	188	1.9433	2.3452	1.9324	ARIMA
	Solubilidad en Tricloroetileno	187	0.1754	0.1718	0.1700	ARIMA

Los parámetros cuya estimación tuvo mejor resultado utilizando el modelo AR, tuvieron un porcentaje de error menor al obtenido para el modelo ARIMA con diferencia de entre 0,1041% y el 0,8286%, esto se aprecia en la Tabla 15.

Tabla 15

Comparación del porcentaje de error de pronósticos de modelos AR y ARIMA

Producto	Parámetro	% Error AR	% Error MA	% Error ARIMA	Mejor modelo	Diferencia AR y ARIMA
DIESEL B2E	Azufre	10.4606	19.5841	11.2902	AR	0.8296
GASOLINA MOTOR REGULAR	Azufre	10.3184	10.7193	10.5336	AR	0.2152
	Benceno	6.1367	11.0436	6.2409	AR	0.1041

Asimismo, aquellos parámetros que tuvieron mejor proyección con el modelo MA, mostraron un porcentaje de error menor al obtenido para el modelo ARIMA con diferencia de entre 0,0077% y 0,4330%, esto se muestra en la Tabla 16 .

Tabla 16

Comparación del porcentaje de error de pronósticos de modelos MA y ARIMA

Producto	Parámetro	% Error AR	% Error MA	% Error ARIMA	Mejor modelo	Diferencia MA y ARIMA
DIESEL B2E	Viscosidad	0.6149	0.5264	0.7883	MA	0.2619
	Temperatura de 95 % vol. Recobrado	0.3840	0.3689	0.3765	MA	0.0077
GASOLINA MOTOR REGULAR	Índice antidetonante	0.4875	0.4698	0.5513	MA	0.0815
	Punto Final de Ebullición	1.0589	1.0370	1.1009	MA	0.0638
	Presión de vapor Reid	2.2618	2.2128	2.3773	MA	0.1645
JET A1	Aromáticos	6.0394	3.6243	3.9398	MA	0.3155
ASFALTO 60/70	Pérdida de masa	26.6607	25.3536	25.7866	MA	0.4330

Para los parámetros de calidad cuyo mejor modelo de estimación fue el ARIMA, su resultado tuvo una diferencia con los modelos AR y MA, de hasta 24,4255%, lo que muestra que, aunque el modelo ARIMA no haya mostrado ser el más acertado para proyectar los datos en todas

las variables, si lo fue para la más de la mitad y en las ocasiones que no lo fue, su diferencia en el porcentaje de error era menor al 0,9%. Esto se puede apreciar en la Tabla 17.

Tabla 17

Comparación del porcentaje de error de pronósticos de modelos AR, MA y ARIMA

Producto	Parámetro	% Error AR	% Error MA	% Error ARIMA	Mejor modelo	Máxima diferencia ARIMA y AR, MA
DIESEL B2E	Aromáticos	9.8590	10.2967	9.7876	ARIMA	0.51
	Número de Cetano	1.0011	1.9332	0.9886	ARIMA	0.94
	Poliaromáticos	21.3908	19.5355	17.4674	ARIMA	3.92
GASOLINA MOTOR REGULAR	Aromáticos totales	6.4023	7.1620	6.2610	ARIMA	0.90
JET A1	Acidez	69.3929	61.7767	46.4557	ARIMA	22.94
	Azufre	45.1085	37.7262	20.6830	ARIMA	24.43
	Naftalenos	15.8129	16.5586	14.1572	ARIMA	2.40
	Punto de inflamación	8.3396	9.5276	6.0987	ARIMA	3.43
ASFALTO 60/70	Ductilidad	0.9116	0.8942	0.8410	ARIMA	0.07
	Penetración	13.4974	13.4191	13.0727	ARIMA	0.42
	Punto de ablandamiento	1.3639	1.3328	1.1480	ARIMA	0.22
	Punto de inflamación	1.9433	2.3452	1.9324	ARIMA	0.41
	Solubilidad en Tricloroetileno	0.1754	0.1718	0.1700	ARIMA	0.01

La implementación del modelo ARIMA siguiendo la metodología de Box-Jenkins aplicada a series de tiempo para predecir los valores de los parámetros de calidad de los productos Diesel B2E, Gasolina motor regular, Jet A1 y Asfalto 60/70, mostró resultados variables según su coeficiente de variación, curtosis y cantidad de datos, con errores de entre 0,1700% y 46,4557%. Esto se puede apreciar en la Tabla 18.

Tabla 18

Información promedio de cada producto con su correspondiente error utilizando el modelo ARIMA

Producto	Número de datos promedio	Coef. de Variación	% Error ARIMA Promedio
DIESEL B2E	173	14.6985	6.7831
GASOLINA MOTOR REGULAR	208.3	11.5767	4.5108
JET A1	58.2	22.6446	18.2669
ASFALTO 60/70	187.3	13.3471	7.1585

5. Conclusiones

- La construcción de los Diagramas en PI Vision para el Asfalto y el Crudo reconstituido mostrando las principales variables en tiempo real aportan una contribución a la supervisión y control de la operación en sus líneas de producción.
- Se logró los parámetros clave para determinar la calidad de los productos Diesel B2E, Gasolina Motor Regular/Extra, Jet A1 y Asfalto 60/70, de manera que se contribuya a la información necesaria para mantener el control de dichos procesos a través del monitoreo de su respectiva capacidad de proceso.
- Se definió el modelo ARIMA como apropiado para la extrapolación de los datos en el tiempo, permitiendo realizar predicciones del comportamiento de los datos y la capacidad de proceso Cpk de los productos Diesel B2E, Gasolina Motor Regular/Extra, Jet A1 y Asfalto 60/70 contribuyan al análisis operacional.
- La implementación de modelos ARIMA basados en la metodología de Box-Jenkins demostró ser una herramienta efectiva para predecir los valores de los parámetros de calidad. Estos modelos ofrecen la capacidad de anticipar posibles desviaciones en los niveles de calidad, lo que permite tomar medidas preventivas y correctivas de manera temprana, contribuyendo a la optimización del control de calidad y a la mejora del rendimiento operativo en la refinería.

6. Recomendaciones

- Procurar que las mediciones de las propiedades de un mismo producto se realicen en de forma simultánea (o en el mismo momento del día) para obtener datos que correspondan a una misma muestra de dicho producto y permita analizar correlación entre variables.
- Revisar modelos que definan correlaciones entre variables clave de un mismo producto para recurrir a métodos multivariados de series de tiempo que permitan resultados más precisos en la estimación de valores futuros.
- Incrementar la frecuencia con la que se miden las variables del Jet A1 para considerar más información en la elaboración de su modelo ARIMA y poder utilizar datos más acertados en el cálculo la de capacidad de proceso Cpk estimada, que facilite el monitoreo del proceso y que los parámetros de calidad estén en especificación.
- Crear un Tag PI en la plataforma PI Vision que se vincule con el documento Excel que contenga los datos históricos de las variables clave mediante la extensión PI Datalink y que permita la visualización de la Capacidad de proceso Cpk en los despliegues de Diesel B2E, Gasolina motor regular, Jet A1 y Asfalto 60/70.
- Crear un Tag PI en la plataforma PI Vision que se vincule con el documento Excel que contenga los datos estimados de los parámetros de calidad mediante la extensión PI Datalink y que permita la visualización de los datos anticipados en los despliegues de Diesel B2E, Gasolina motor regular, Jet A1 y Asfalto 60/70 para mantenerlos en especificación.

Bibliografía

Asociación Colombiana del Petróleo. (2016). INFORME ECONÓMICO. *Informes Vicepresidencia de Asuntos Económicos*, Volumen (10), Páginas 1-3.

Barrera, C.H. (2017). Fundamentales del mercado petrolero y la economía colombiana. *Boletín Macrosectorial*, Volumen (7).

Benavides, G.K . (2014) “estandarización del modelo de análisis operacional de la gerencia refinería barrancabermeja ecopetrol s.a. usando los software pi datalink y pi processbook”.

Chatfield, C. (2001) “Time-Series Forecasting”. Estados Unidos: Chapman & Hakk/CRC.

Coordinación de ingeniería de proceso Ecopetrol S.A. (2020). Fundamentos de Proceso y Logística de la GRB.

Ecopetrol S A. (2020)“Capacidad de proceso de los parámetros de calidad Diesel B2E , Jet A1 y Gasolina Motor Regular (GRM) en la Refinería de Barrancabermeja (GRB). Índices de Capacidad Índice de Capacidad Cp Índice de Capacidad Cps Índice Cpk Índice de Capacidad Cpi.”

Ecopetrol. (2021). Acerca de Ecopetrol. *Portal web Ecopetrol*.
<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/NuestraEmpresa/QuienesSomos/acerc-a-de-ecopetrol>

Gujarati, D. (2010). *Econometría*. España: McGraw-Hill

Isaac, Rubén. (2002). Seis Sigma y la capacidad del proceso en proyectos. *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas*, Volumen(24), 164-173.

Mejía-Neira, A. (2019). Influencia de la Ingeniería de Software en los Procesos de Automatización Industrial. *Información tecnológica*, Volumen (30), 221-230.

<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000500221>

Salazar, B. (2019). Capacidad de procesos. *Ingeniería Industrial Online*.

<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/gesti%C3%B3n-y-control-de-calidad/capacidad-de-proceso/>.

U. Ecopetrol. (2018) “Guía para el Diseño Estándar de Herramientas de Entrenamiento para la Excelencia Operacional”.

Apéndices

Apéndice A. Metodología de Box-Jenkins aplicada para la capacidad de proceso del número de Cetano en el Diesel B2E

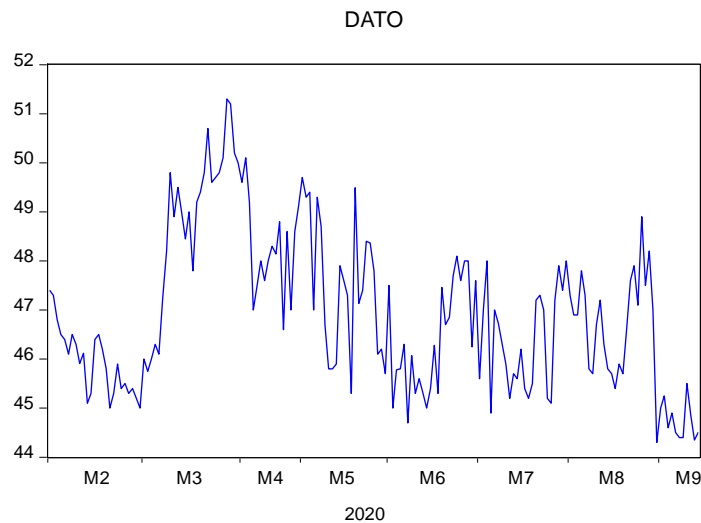
A continuación, se muestra la aplicación de la metodología de Box-Jenkins para proyectar los valores de la variable Número de Cetano en el Diesel B2E.

Como tratamiento de datos preliminar para todas las variables, se utilizaron diagramas de cajas y bigotes para excluir los datos atípicos de estas y mejorar la exactitud de las aproximaciones.

Paso 1: Generación de la gráfica para identificar la tendencia de los datos, esto para ejecutar de forma adecuada la prueba de estacionariedad Dickey-Fuller Aumentada.

Figura A1

Gráfica de datos de Número de Cetano para el Diesel B2E



Se identifica una tendencia decreciente de los datos en el tiempo, así mismo, que tiene un intercepto diferente de 0,0.

Paso 2: Comprobar el impacto de la tendencia con la prueba ADF (Augmented Dickey-Fuller) para definir si la serie es estacionaria (media constante en el tiempo) o no, y definir si requiere una transformación.

Tabla 19

Resultados de prueba Dickey-Fuller Aumentada a los datos de Número de Cetano del Diesel B2E

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-3.169857	0.0941
Test critical values:		
1% level	-4.012618	
5% level	-3.436318	
10% level	-3.142266	

Para esta prueba la hipótesis nula H_0 es que la serie de datos son estacionarios, por lo que si el valor $p > 0.05$, no se rechaza H_0 y la serie sería no estacionaria. Ante esta situación se procede a transformar la serie a su primera diferencia, generando una nueva serie de datos a analizar.

Paso 3: Se realiza la transformación de la serie para volver a analizar la gráfica y la prueba ADF de la nueva serie.

Figura A2

Gráfica de la primera diferencia de los datos de Número de Cetano para el Diesel B2E

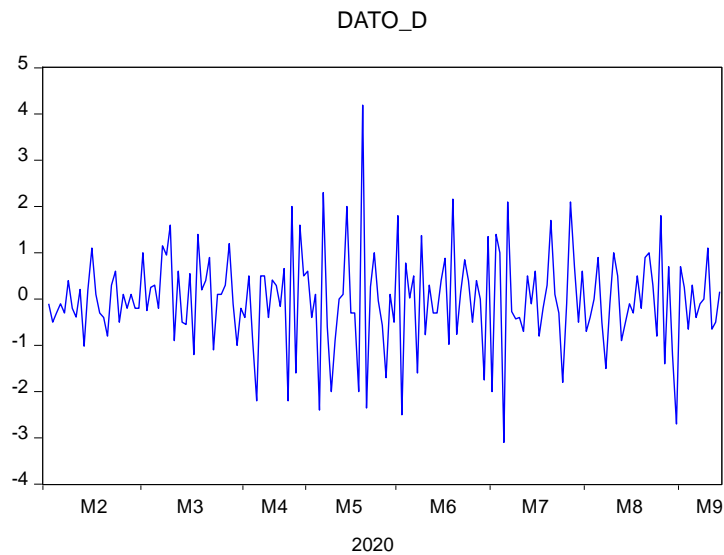


Tabla 20

Resultados de prueba Dickey-Fuller Aumentada a los datos en primera diferencia de Número de Cetano del Diesel B2E

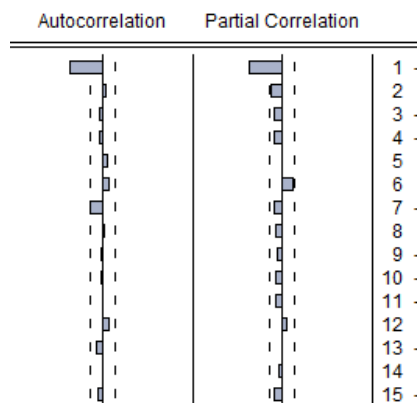
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-19.24261	0.0000
Test critical values:		
1% level	-4.012618	
5% level	-3.436318	
10% level	-3.142266	

Dado que el valor $p < 0.05$, se rechaza H_0 y se confirma que la serie es estacionaria.

Paso 4: Se generan y analizan los correlogramas de la serie para obtener los parámetros de las ecuaciones AR y MA, a partir de los retardos significativos en el PACF (Función de Autocorrelación Parcial) y ACF (Función de Autocorrelación).

Figura A3

Correlogramas de la función en primera diferencia del Número de Cetano del Diesel B2E



Los parámetros para la ecuación AR están en función de los retardos significativos observados en PACF, en este caso sería el retardo 1. Para la ecuación MA, se consideran los retardos significativos en ACF, también es el retardo 1.

Tabla 21

Criterios de la ecuación AR(1) del Número de Cetano en Diesel B2E

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.016731	0.054089	-0.309316	0.7575
AR(1)	-0.375271	0.071307	-5.262783	0.0000
R-squared	0.140810	Mean dependent var		-0.016316
Adjusted R-squared	0.135726	S.D. dependent var		1.046338
S.E. of regression	0.972742	Akaike info criterion		2.794231
Sum squared resid	159.9123	Schwarz criterion		2.830975
Log likelihood	-236.9067	Hannan-Quinn criter.		2.809140
F-statistic	27.69688	Durbin-Watson stat		2.091236
Prob(F-statistic)	0.000000			

Tabla 22

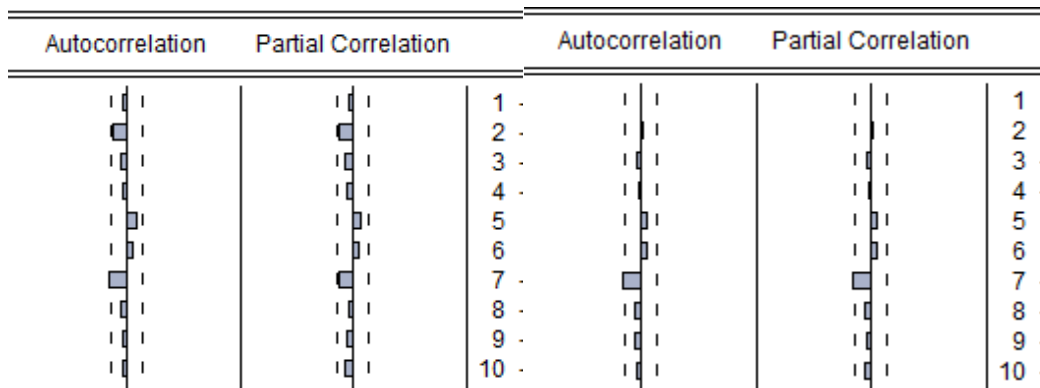
Criterios de la ecuación MA(1) del Número de Cetano en Diesel B2E

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.015440	0.040928	-0.377245	0.7065
MA(1)	-0.442408	0.068745	-6.435463	0.0000
R-squared	0.162370	Mean dependent var		-0.016802
Adjusted R-squared	0.157443	S.D. dependent var		1.043293
S.E. of regression	0.957648	Akaike info criterion		2.762888
Sum squared resid	155.9054	Schwarz criterion		2.799487
Log likelihood	-235.6083	Hannan-Quinn criter.		2.777737
F-statistic	32.95351	Durbin-Watson stat		1.995634
Prob(F-statistic)	0.000000			

Paso 5: Se analizan los correlogramas de los residuales cada una de las ecuaciones para asegurar que estos siguen un patrón de ruido blanco (sin retardos significativos).

Figura A4

Correlogramas de los residuales de las funciones AR y MA respectivamente



Se identifica que para ambas funciones, el retardo número 7 es significativo, por lo cual se debe incluir como término a tener en cuenta en la ecuación.

Paso 6: Se ajustan las funciones de AR y MA, ahora considerando los términos del retardo números 1 y 7. También se analizan los correlogramas de los residuales de ambas ecuaciones para garantizar un comportamiento de ruido blanco.

Tabla 23

Criterios de la ecuación AR(1,7) del Número de Cetano en Diesel B2E

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.011738	0.051394	-0.228399	0.8196
AR(1)	-0.366915	0.072390	-5.068586	0.0000
AR(7)	-0.121815	0.072675	-1.676163	0.0956
R-squared	0.156485	Mean dependent var		-0.010848
Adjusted R-squared	0.146072	S.D. dependent var		1.063548
S.E. of regression	0.982806	Akaike info criterion		2.821204
Sum squared resid	156.4769	Schwarz criterion		2.877675
Log likelihood	-229.7493	Hannan-Quinn criter.		2.844127
F-statistic	15.02680	Durbin-Watson stat		2.108331
Prob(F-statistic)	0.000001			

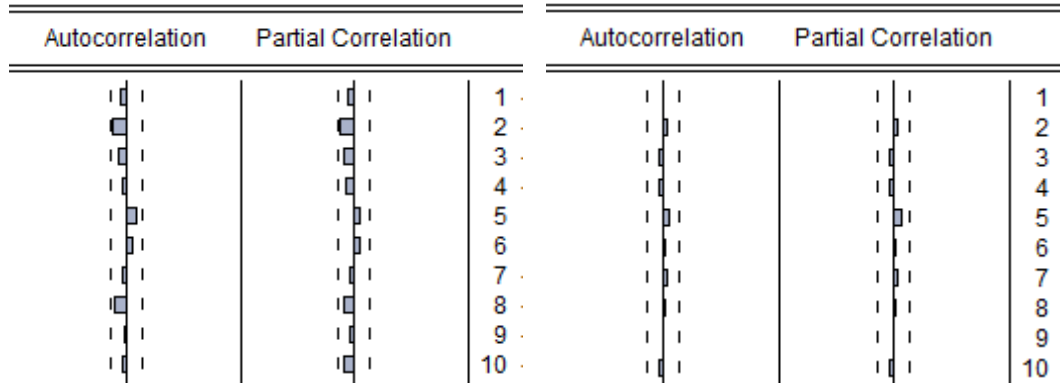
Tabla 24

Criterios de la ecuación MA(1,7) del Número de Cetano en Diesel B2E

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.009184	0.023627	-0.388737	0.6980
MA(1)	-0.461867	0.065410	-7.061113	0.0000
MA(7)	-0.222918	0.066248	-3.364898	0.0009
R-squared	0.198514	Mean dependent var	-0.016802	
Adjusted R-squared	0.189029	S.D. dependent var	1.043293	
S.E. of regression	0.939526	Akaike info criterion	2.730406	
Sum squared resid	149.1779	Schwarz criterion	2.785304	
Log likelihood	-231.8149	Hannan-Quinn criter.	2.752680	
F-statistic	20.92920	Durbin-Watson stat	1.995543	
Prob(F-statistic)	0.000000			

Figura A5

Correlogramas de los residuales de las funciones AR y MA ajustadas respectivamente



Como no hay ningún retardo que sea significativo, se considera que los residuales presentan comportamiento de ruido blanco.

Paso 7: Tras obtener las funciones AR y MA definidas, se integran en una función ARIMA que considerará los factores Autoregresivos y de Medias Móviles para lograr una mayor

aproximación a los valores futuros. El modelo ARIMA resultante también requiere que se compruebe que sus residuales tengan un comportamiento de ruido blanco.

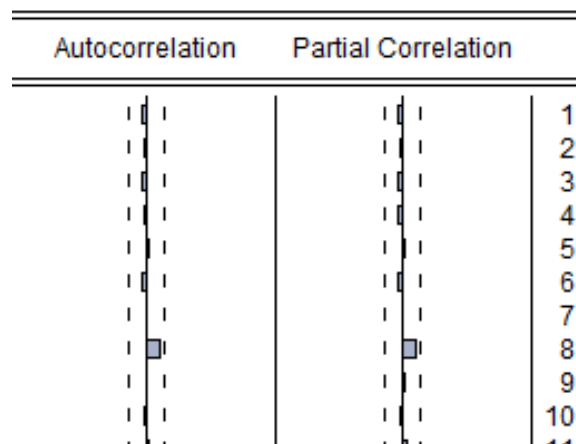
Tabla 25

Criterios de la ecuación ARIMA (7,1,7) del Número de Cetano en Diesel B2E

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.015662	0.011556	-1.355289	0.1772
AR(1)	-0.025044	0.116325	-0.215293	0.8298
AR(7)	0.295248	0.119127	2.478421	0.0142
MA(1)	-0.441544	0.090354	-4.886844	0.0000
MA(7)	-0.522252	0.088895	-5.874942	0.0000
R-squared	0.221453	Mean dependent var	-0.010848	
Adjusted R-squared	0.201989	S.D. dependent var	1.063548	
S.E. of regression	0.950083	Akaike info criterion	2.765299	
Sum squared resid	144.4251	Schwarz criterion	2.859418	
Log likelihood	-223.1372	Hannan-Quinn criter.	2.803505	
F-statistic	11.37773	Durbin-Watson stat	2.063993	
Prob(F-statistic)	0.000000			

Figura A6

Correlogramas de los residuales del modelo ARIMA



Paso 8: Representar gráficamente el comportamiento de los datos originales, la función AR, la función MA y el modelo ARIMA. También se analizará el error porcentual de cada modelo para comprobar que el modelo ARIMA es la mejor aproximación a los valores reales.

Figura A7

Gráfica de los datos originales, función AR, función MA y modelo ARIMA

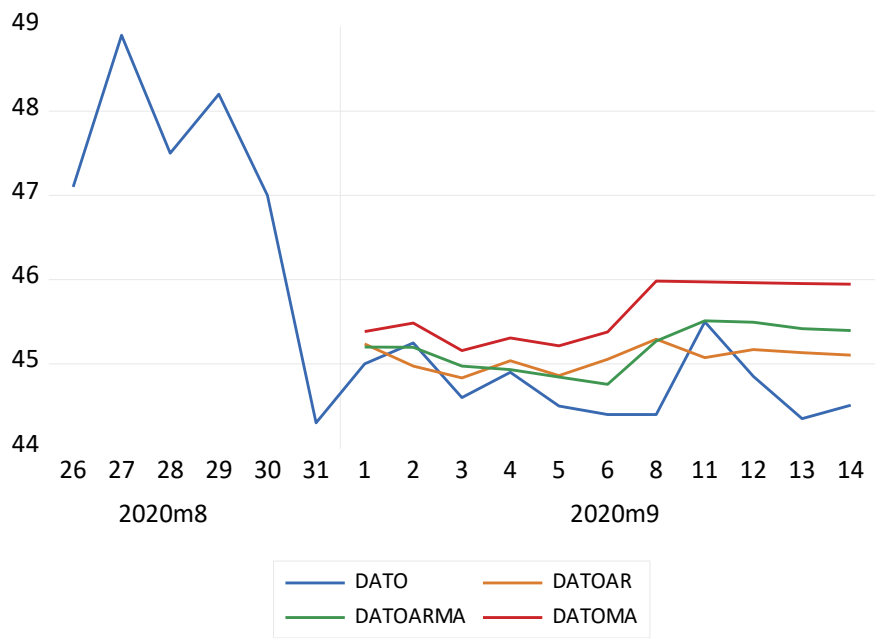


Tabla 26

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Número de Cetano en el Diesel B2E

FECHA	AR1,7	dato MA1	ARMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARMA
9/01/2020	45.24	45.38	45.20	45.00	0.5259	0.8532	0.4444
9/02/2020	44.97	45.48	45.20	45.25	0.6122	0.5182	0.1185
9/03/2020	44.83	45.16	44.97	44.60	0.5223	1.2514	0.8384
9/04/2020	45.04	45.31	44.93	44.90	0.3060	0.9096	0.0735
9/05/2020	44.86	45.21	44.84	44.50	0.8082	1.6045	0.7741
9/06/2020	45.05	45.38	44.76	44.40	1.4720	2.2026	0.8065
9/08/2020	45.29	45.98	45.27	44.40	2.0132	3.5627	1.9613
9/11/2020	45.07	45.97	45.51	45.50	0.9360	1.0388	0.0269
9/12/2020	45.17	45.96	45.49	44.85	0.7121	2.4827	1.4352
9/01/2021	45.13	45.95	45.42	44.35	1.7678	3.6174	2.4060
9/02/2021	45.10	45.95	45.40	44.51	1.3359	3.2242	1.9894

	error % AR	error % MA	error % ARMA
error mínimo	0.3060	0.5182	0.0269
error máximo	2.01	3.62	2.41
error medio	1.00	1.93	0.99

Se logró construir el modelo ARIMA para proyectar los datos registrados entre el 1 de septiembre y el 14 de septiembre de 2020, consiguiendo un error medio de 0.99%.

Paso 9: Calcular la Capacidad de Proceso (Cpk) estimada con los valores proyectados con el método ARIMA.

Para este cálculo se consideraron los datos de Número de Cetano acumulados desde el 01/02/2020 hasta el 14/09/2020, sin embargo, en el cálculo de la Cpk estimada, se tomarán los datos solo hasta el 31/08/2020 y los valores correspondientes al mes de septiembre obtenidos de la predicción del modelo ARIMA.

Tabla 27

Valores de pronóstico y error porcentual la Capacidad de Proceso Cpk para el Número de Cetano en el Diesel B2E

DIA	Cpk	Cpk predicción	%Error
9/01/2020	0.4524	0.4531	0.16
9/02/2020	0.4494	0.4499	0.12
9/03/2020	0.4440	0.4460	0.45
9/04/2020	0.4400	0.4420	0.47
9/05/2020	0.4345	0.4378	0.77
9/06/2020	0.4288	0.4334	1.08
9/08/2020	0.4233	0.4309	1.80
9/11/2020	0.4215	0.4291	1.79
9/12/2020	0.4178	0.4273	2.26
9/13/2020	0.4125	0.4253	3.10
9/14/2020	0.4079	0.4233	3.77

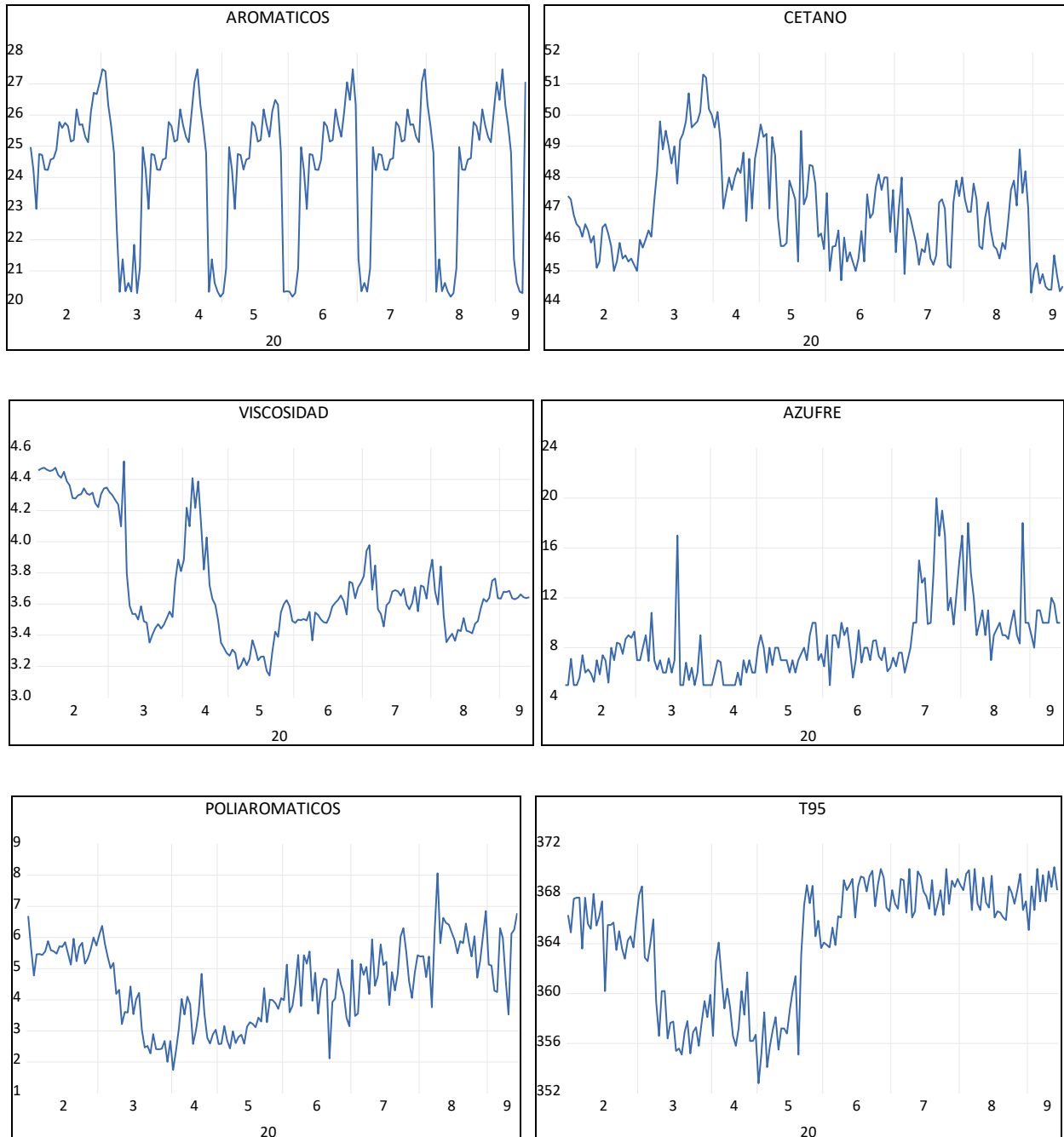
error mínimo	0.12
error máximo	3.77
error medio	1.43

Se logra un error promedio de 1.43% para la Capacidad de Proceso, por lo que se considera que el modelo ARIMA planteado permite una estimación confiable del cumplimiento del Número de Cetano como parámetro de calidad del Diesel E2B en el tiempo.

Apéndice B. Gráficas de los parámetros de calidad del Diesel B2E

Figura A8

Gráficas de los parámetros de calidad del Diesel B2E



Apéndice C. Gráficas de estimación de modelos AR, MA y ARIMA para los parámetros de calidad del Diesel B2E.

Figura A9

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en el Diesel B2E

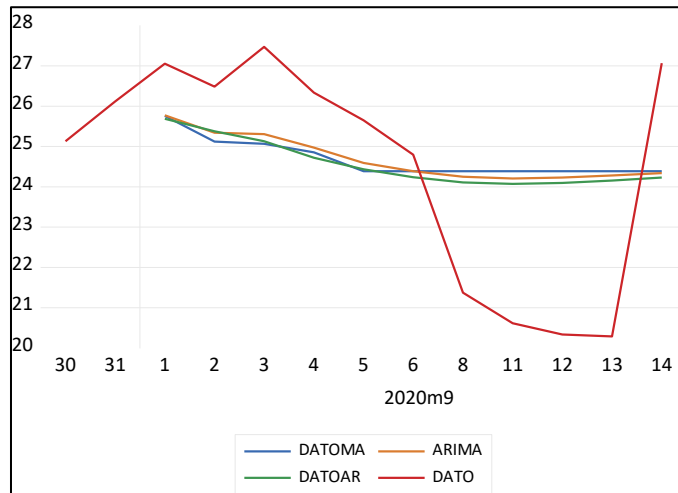


Figura A10

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el número de Cetano en el Diesel B2E

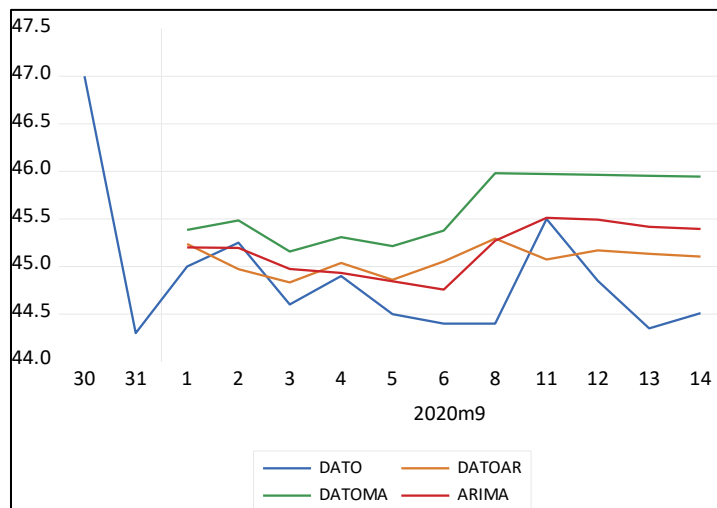


Figura A11

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Viscosidad en el Diesel B2E

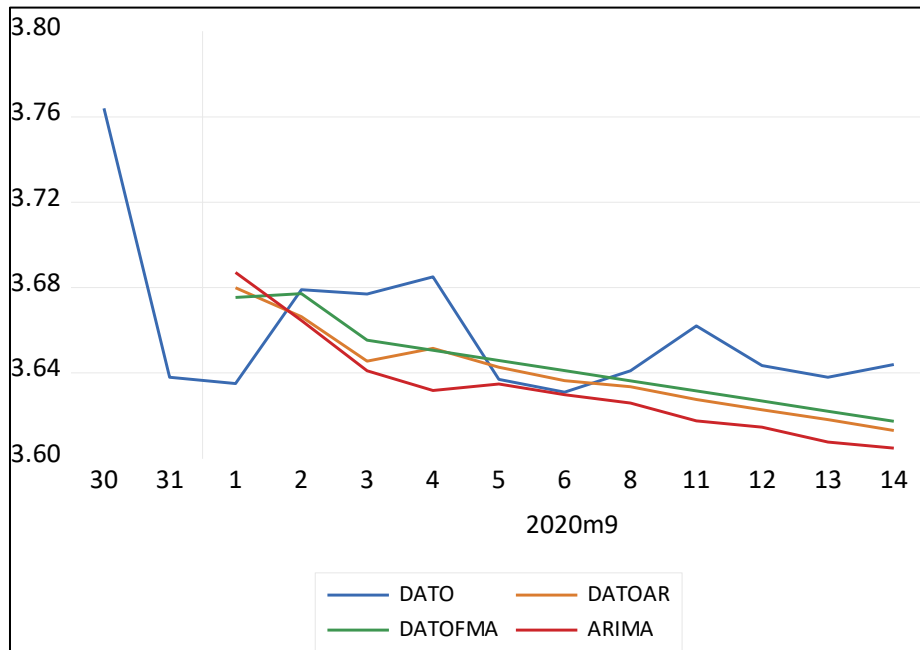
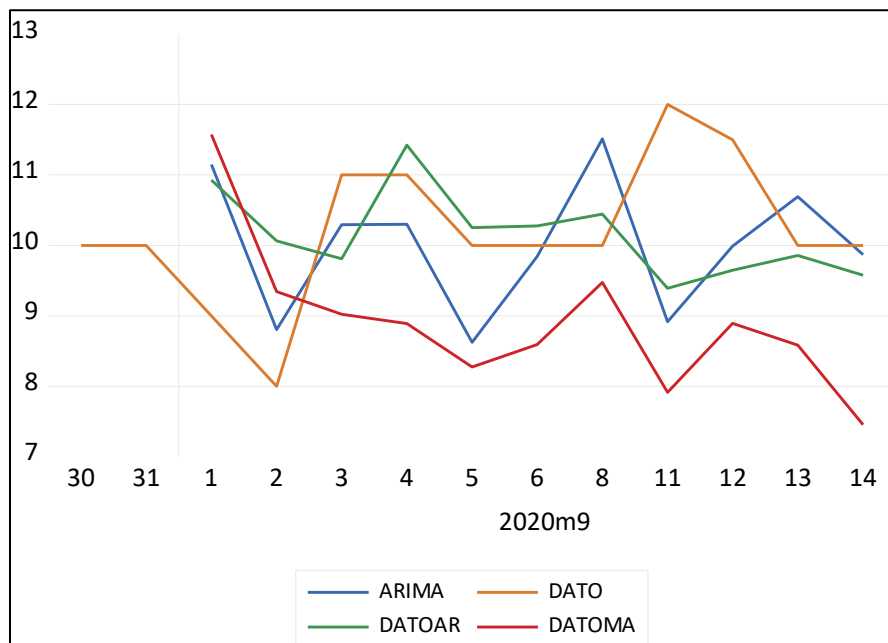


Figura A12

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en el Diesel B2E



FiguraA13

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Poliaromáticos en el Diesel B2E

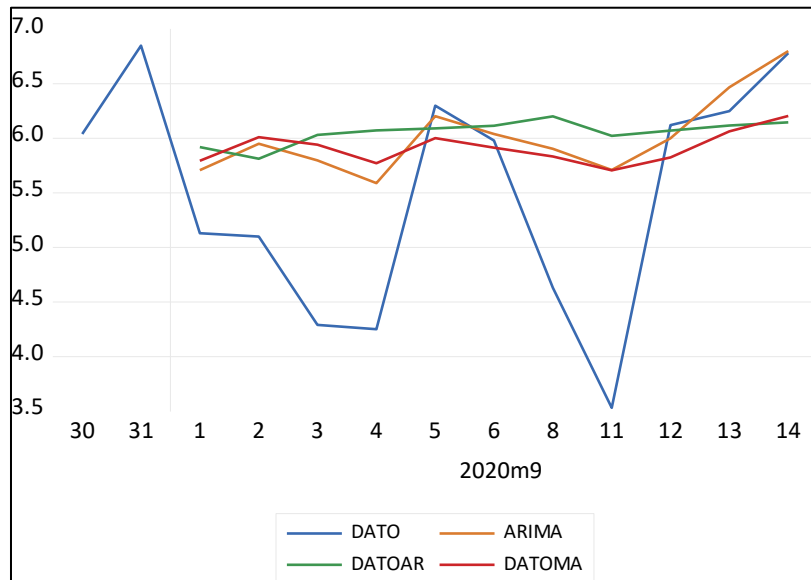
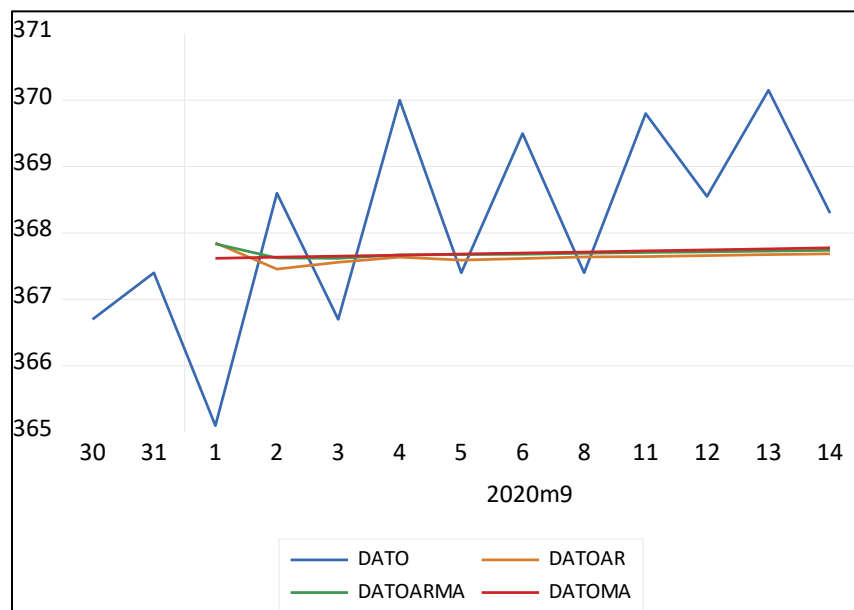


Figura A14

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Temperatura de 95 % vol. recobrado en el Diesel B2E



Apéndice D. Error de los modelos AR, MA y ARIMA para el Diesel B2E

Tabla 28

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en el Diesel B2E

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	10.93	11.57	11.15	9.00	21.4234	28.5915	23.8501
9/02/2020	10.06	9.34	8.80	8.00	25.7849	16.7885	10.0519
9/03/2020	9.81	9.02	10.29	11.00	10.8115	17.9624	6.4367
9/04/2020	11.42	8.89	10.30	11.00	3.8232	19.1753	6.3597
9/05/2020	10.25	8.27	8.63	10.00	2.5148	17.2691	13.7436
9/06/2020	10.28	8.59	9.84	10.00	2.7644	14.0664	1.5817
9/08/2020	10.44	9.47	11.51	10.00	4.4423	5.2548	15.1139
9/11/2020	9.39	7.91	8.92	12.00	21.7353	34.0482	25.6942
9/12/2020	9.65	8.89	9.99	11.50	16.1113	22.6572	13.1346
9/13/2020	9.86	8.58	10.69	10.00	1.4174	14.1689	6.9136
9/14/2020	9.58	7.46	9.87	10.00	4.2378	25.4434	1.3125

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	1.4174	5.2548	1.3125
error máximo	25.7849	34.0482	25.6942
error medio	10.46	19.58	11.29

Tabla 29

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en el Diesel B2E

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	25.69	25.76	25.77	27.06	5.0576	4.7897	4.7357
9/02/2020	25.38	25.12	25.34	26.49	4.1883	5.1467	4.3160
9/03/2020	25.13	25.07	25.31	27.47	8.5166	8.7505	7.8774
9/04/2020	24.72	24.86	24.97	26.34	6.1340	5.6173	5.1808
9/05/2020	24.43	24.39	24.59	25.65	4.7420	4.9301	4.1338
9/06/2020	24.24	24.39	24.39	24.80	2.2496	1.6519	1.6441
9/08/2020	24.11	24.39	24.25	21.38	12.7875	14.0838	13.4507
9/11/2020	24.07	24.39	24.20	20.62	16.7702	18.2897	17.4140
9/12/2020	24.10	24.39	24.23	20.34	18.4907	19.9185	19.1624
9/13/2020	24.15	24.39	24.28	20.29	19.0423	20.1844	19.6735
9/14/2020	24.23	24.39	24.34	27.07	10.4702	9.9005	10.0748

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	2.2496	1.6519	1.6441
error máximo	19.0423	20.1844	19.6735
error medio	9.86	10.30	9.79

Tabla 30

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el número de Cetano en el Diesel B2E

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	45.24	45.38	45.20	45.00	0.5259	0.8532	0.4444
9/02/2020	44.97	45.48	45.20	45.25	0.6122	0.5182	0.1185
9/03/2020	44.83	45.16	44.97	44.60	0.5223	1.2514	0.8384
9/04/2020	45.04	45.31	44.93	44.90	0.3060	0.9096	0.0735
9/05/2020	44.86	45.21	44.84	44.50	0.8082	1.6045	0.7741
9/06/2020	45.05	45.38	44.76	44.40	1.4720	2.2026	0.8065
9/08/2020	45.29	45.98	45.27	44.40	2.0132	3.5627	1.9613
9/11/2020	45.07	45.97	45.51	45.50	0.9360	1.0388	0.0269
9/12/2020	45.17	45.96	45.49	44.85	0.7121	2.4827	1.4352
9/13/2020	45.13	45.95	45.42	44.35	1.7678	3.6174	2.4060
9/14/2020	45.10	45.95	45.40	44.51	1.3359	3.2242	1.9894

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.3060	0.5182	0.0269
error máximo	2.0132	3.6174	2.4060
error medio	1.00	1.93	0.99

Tabla 31

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Viscosidad en el Diesel B2E

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	3.68	3.68	3.69	3.64	1.2365	1.1107	1.4333
9/02/2020	3.67	3.68	3.66	3.68	0.3428	0.0496	0.3919
9/03/2020	3.65	3.66	3.64	3.68	0.8549	0.5890	0.9775
9/04/2020	3.65	3.65	3.63	3.69	0.9072	0.9338	1.4434
9/05/2020	3.64	3.65	3.63	3.64	0.1572	0.2430	0.0601
9/06/2020	3.64	3.64	3.63	3.63	0.1494	0.2777	0.0316
9/08/2020	3.63	3.64	3.63	3.64	0.2059	0.1283	0.4146
9/11/2020	3.63	3.63	3.62	3.66	0.9410	0.8308	1.2144
9/12/2020	3.62	3.63	3.61	3.64	0.5707	0.4577	0.7938
9/13/2020	3.62	3.62	3.61	3.64	0.5470	0.4379	0.8342
9/14/2020	3.61	3.62	3.60	3.64	0.8512	0.7323	1.0767

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.1494	0.0496	0.0316
error máximo	1.2365	1.1107	1.4434
error medio	0.61	0.53	0.79

Tabla 32

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Temperatura de 95 % vol. recobrado en el Diesel B2E

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	367.85	367.62	367.84	365.10	0.7532	0.6900	0.7498
9/02/2020	367.46	367.63	367.62	368.60	0.3105	0.2618	0.2646
9/03/2020	367.56	367.65	367.62	366.70	0.2340	0.2592	0.2508
9/04/2020	367.64	367.67	367.67	370.00	0.6390	0.6307	0.6291
9/05/2020	367.59	367.68	367.68	367.40	0.0522	0.0768	0.0749
9/06/2020	367.62	367.70	367.68	369.50	0.5097	0.4877	0.4923
9/08/2020	367.64	367.71	367.69	367.40	0.0651	0.0854	0.0802
9/11/2020	367.64	367.73	367.71	369.80	0.5829	0.5599	0.5664
9/12/2020	367.66	367.75	367.72	368.55	0.2417	0.2184	0.2263
9/13/2020	367.67	367.76	367.73	370.15	0.6690	0.6454	0.6546
9/14/2020	367.69	367.78	367.74	368.30	0.1668	0.1421	0.1527

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.0522	0.0768	0.0749
error máximo	0.7532	0.6900	0.7498
error medio	0.38	0.37	0.38

Tabla 33

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Poliaromáticos en el Diesel B2E

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	5.92	5.79	5.71	5.13	15.4025	12.9493	11.2637
9/02/2020	5.81	6.01	5.95	5.10	13.9870	17.8582	16.6608
9/03/2020	6.03	5.94	5.80	4.29	40.5994	38.5131	35.1549
9/04/2020	6.07	5.77	5.59	4.25	42.8734	35.8005	31.5258
9/05/2020	6.09	6.00	6.20	6.30	3.3153	4.7277	1.5247
9/06/2020	6.12	5.91	6.04	5.98	2.2585	1.0906	1.0036
9/08/2020	6.20	5.83	5.90	4.63	33.9578	26.0109	27.5200
9/11/2020	6.02	5.71	5.71	3.53	70.6236	61.6628	61.7455
9/12/2020	6.07	5.83	6.00	6.12	0.8162	4.8182	1.9627
9/13/2020	6.12	6.06	6.47	6.25	2.1154	2.9734	3.4895
9/14/2020	6.15	6.20	6.80	6.78	9.3495	8.4853	0.2906

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.8162	1.0906	0.2906
error máximo	70.6236	61.6628	61.7455
error medio	21.39	19.54	17.47

Apéndice E. Error de capacidad de proceso del Diesel B2E

Tabla 34

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Aromáticos en el Diesel B2E

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/2020	0.6636	0.6652	0.24
9/02/2020	0.6614	0.6657	0.66
9/03/2020	0.6559	0.6664	1.59
9/04/2020	0.6543	0.6676	2.04
9/05/2020	0.6543	0.6693	2.30
9/06/2020	0.6558	0.6713	2.37
9/08/2020	0.6566	0.6734	2.56
9/11/2020	0.6559	0.6755	2.99
9/12/2020	0.6547	0.6776	3.49
9/13/2020	0.6535	0.6796	3.99
9/14/2020	0.6498	0.6816	4.89

error mínimo	0.24
error máximo	4.89
error medio	2.47

Tabla 35

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el número de Cetano en el Diesel B2E

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/2020	0.4524	0.4531	0.16
9/02/2020	0.4494	0.4499	0.12
9/03/2020	0.4440	0.4460	0.45
9/04/2020	0.4400	0.4420	0.47
9/05/2020	0.4345	0.4378	0.77
9/06/2020	0.4288	0.4334	1.08
9/08/2020	0.4233	0.4309	1.80
9/11/2020	0.4215	0.4291	1.79
9/12/2020	0.4178	0.4273	2.26
9/13/2020	0.4125	0.4253	3.10
9/14/2020	0.4079	0.4233	3.77

error mínimo	0.12
error máximo	3.77
error medio	1.43

Tabla 36

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Viscosidad en el Diesel B2E

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/2020	0.6967	0.6966	0.02
9/02/2020	0.6991	0.6990	0.02
9/03/2020	0.7015	0.7014	0.01
9/04/2020	0.7038	0.7039	0.01
9/05/2020	0.7063	0.7063	0.01
9/06/2020	0.7088	0.7088	0.00
9/08/2020	0.7112	0.7113	0.01
9/11/2020	0.7136	0.7138	0.02
9/12/2020	0.7161	0.7162	0.02
9/13/2020	0.7185	0.7187	0.03
9/14/2020	0.7209	0.7212	0.04

error mínimo	0.00
error máximo	0.04
error medio	0.02

Tabla 37

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para contenido de Poliaromáticos en el Diesel B2E

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/2020	1.7104	1.7059	0.26
9/02/2020	1.7134	1.7018	0.67
9/03/2020	1.7188	1.6994	1.13
9/04/2020	1.7242	1.6990	1.46
9/05/2020	1.7157	1.6923	1.36
9/06/2020	1.7113	1.6878	1.37
9/08/2020	1.7161	1.6848	1.83
9/11/2020	1.7198	1.6837	2.10
9/12/2020	1.7139	1.6799	1.98
9/13/2020	1.7067	1.6709	2.10
9/14/2020	1.6924	1.6577	2.05

error mínimo	0.26
error máximo	2.10
error medio	1.48

Tabla 38

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Azufre en el Diesel B2E

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/2020	0.7332	0.7303	0.39
9/02/2020	0.7356	0.7307	0.67
9/03/2020	0.7343	0.7314	0.39
9/04/2020	0.7331	0.7294	0.51
9/05/2020	0.7335	0.7295	0.55
9/06/2020	0.7340	0.7295	0.61
9/08/2020	0.7345	0.7294	0.69
9/11/2020	0.7311	0.7307	0.07
9/12/2020	0.7290	0.7316	0.36
9/13/2020	0.7295	0.7324	0.39
9/14/2020	0.7301	0.7334	0.46

error mínimo	0.07
error máximo	0.69
error medio	0.46

Tabla 39

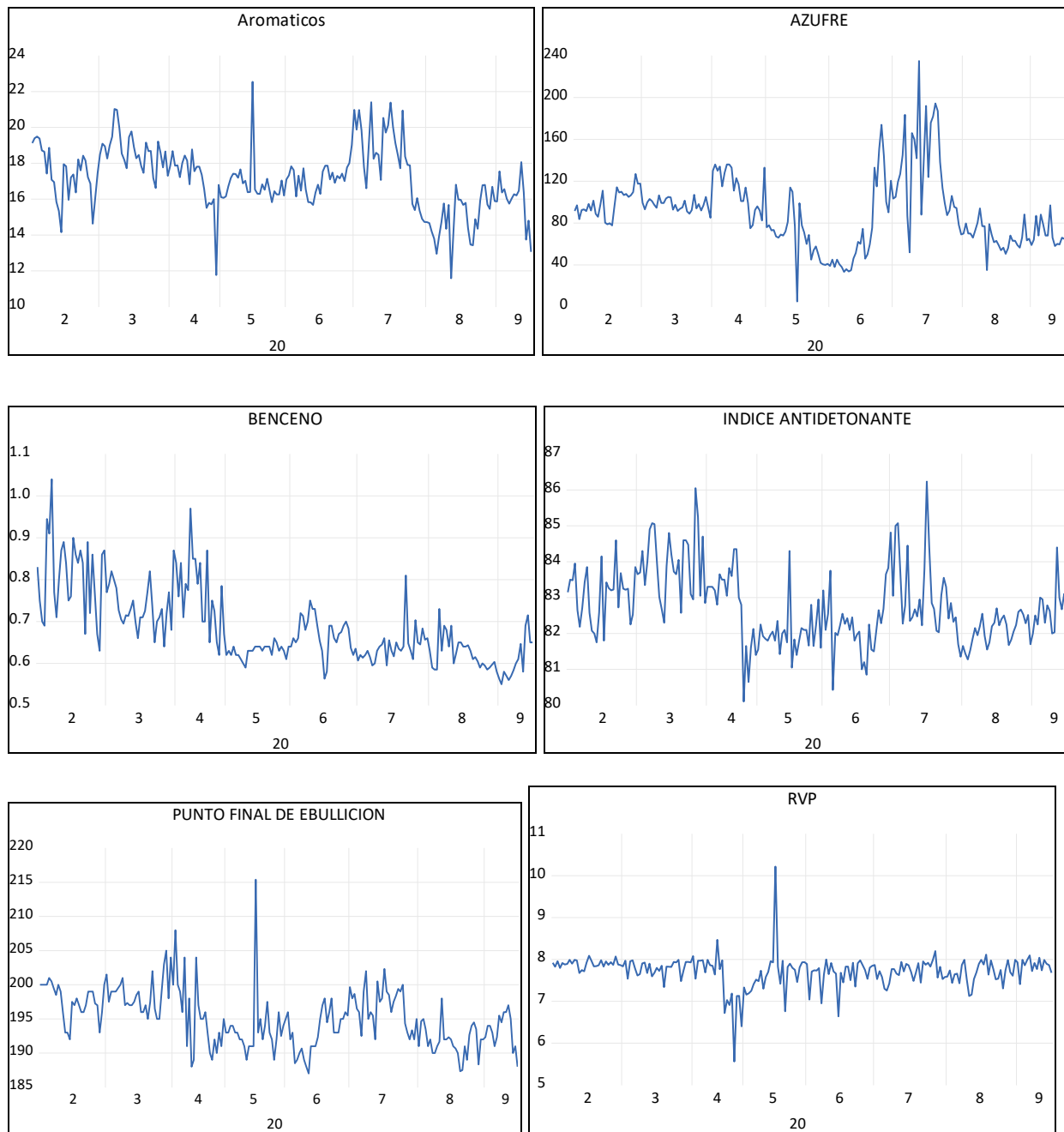
Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Temperatura de 95 % vol. recobrado en el Diesel B2E

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/2020	0.4142	0.4125	0.42
9/02/2020	0.4124	0.4115	0.21
9/03/2020	0.4122	0.4106	0.38
9/04/2020	0.4090	0.4097	0.15
9/05/2020	0.4083	0.4087	0.10
9/06/2020	0.4058	0.4078	0.49
9/08/2020	0.4052	0.4069	0.43
9/11/2020	0.4024	0.4060	0.89
9/12/2020	0.4009	0.4051	1.05
9/13/2020	0.3979	0.4042	1.58
9/14/2020	0.3966	0.4033	1.68

error mínimo	0.10
error máximo	1.68
error medio	0.67

Figura A15

Gráficas de los parámetros de calidad de la Gasolina Motor Regular



Apéndice G. Gráficas de estimación de modelos AR, MA y ARIMA para los parámetros de calidad de la Gasolina motor regular (GMR)

Figura A16

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en la Gasolina Motor Regular

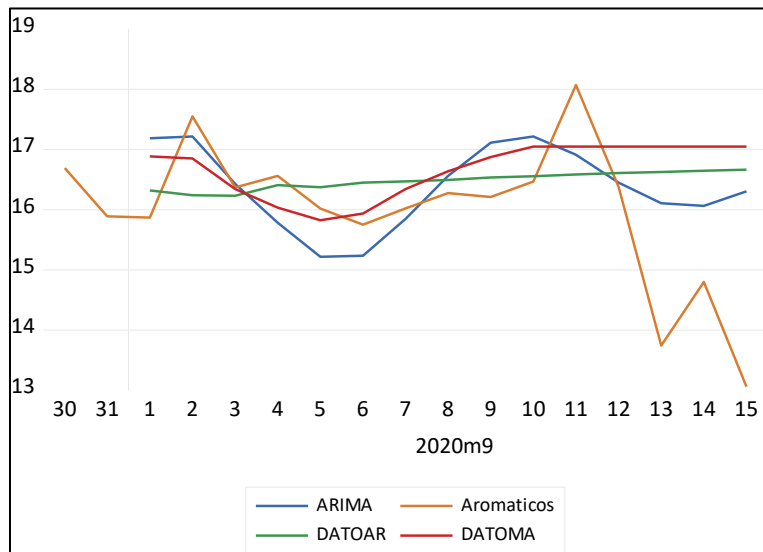


Figura A17

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en la Gasolina Motor Regular

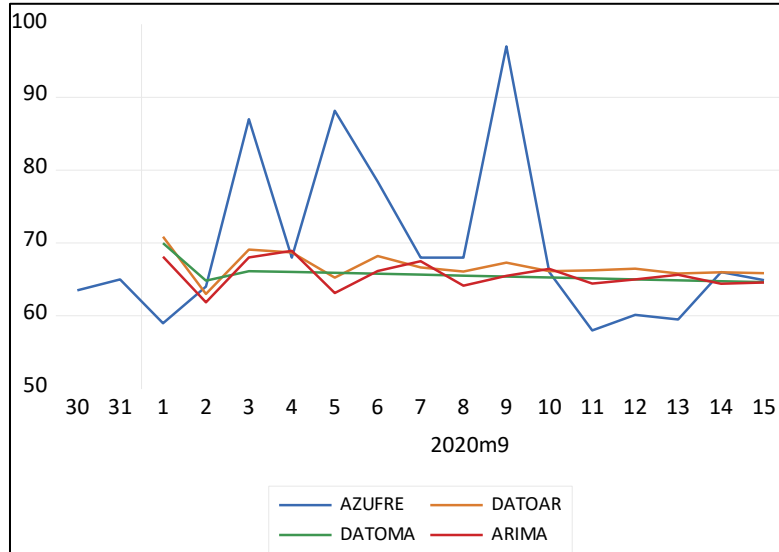


Figura A18

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Benceno en la Gasolina Motor Regular

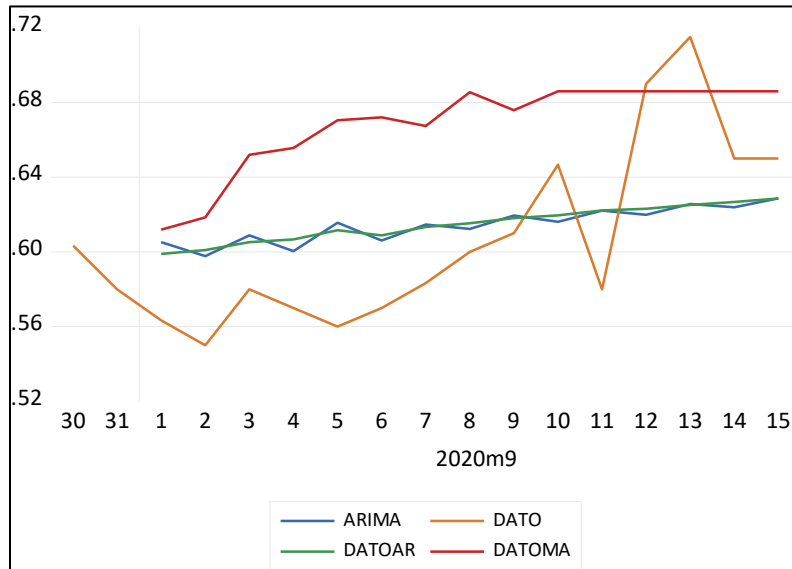


Figura A19

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el índice antidetonante en la Gasolina Motor Regular

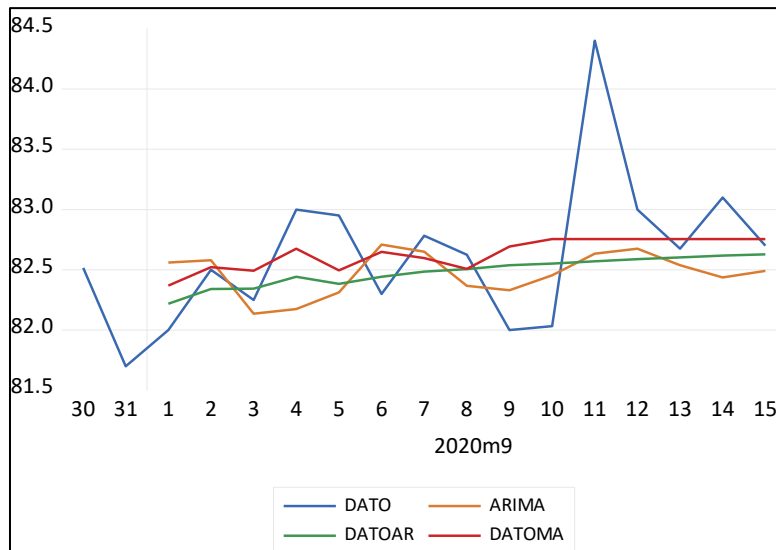


Figura A20

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el Punto final de ebullición en la Gasolina Motor Regular

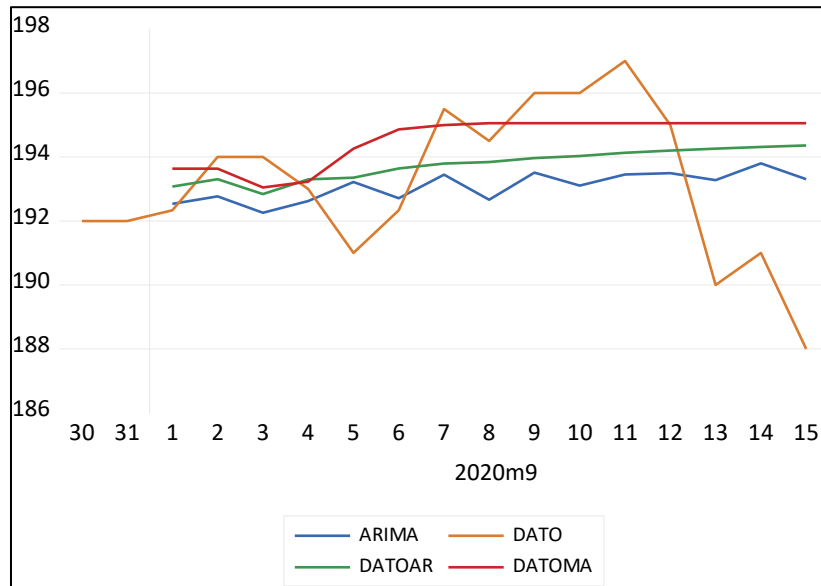
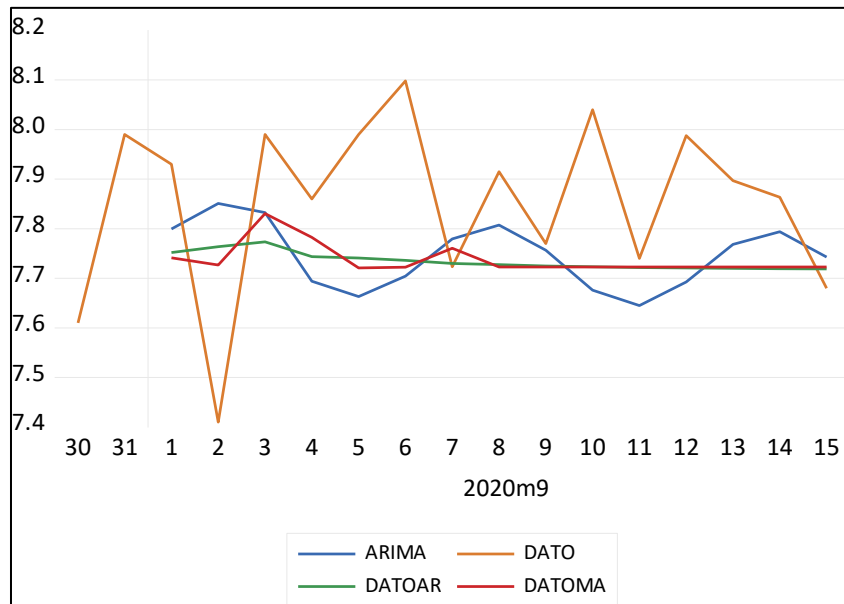


Figura A21

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Presión de Vapor Reid en la Gasolina Motor Regular



Apéndice H. Error de los modelos AR, MA y ARIMA para la Gasolina motor regular (GMR)

Tabla 40

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en la Gasolina motor regular

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	16.3196	16.8869	17.1873	15.8700	2.8333	6.4074	8.3003
9/02/2020	16.2408	16.8501	17.2160	17.5500	7.4599	3.9880	1.9033
9/03/2020	16.2306	16.3445	16.4301	16.3700	0.8513	0.1558	0.3670
9/04/2020	16.4082	16.0329	15.7822	16.5600	0.9169	3.1827	4.6966
9/05/2020	16.3714	15.8243	15.2187	16.0200	2.1932	1.2216	5.0019
9/06/2020	16.4490	15.9378	15.2360	15.7500	4.4379	1.1926	3.2632
9/07/2020	16.4707	16.3425	15.8473	16.0233	2.7922	1.9921	1.0985
9/08/2020	16.4928	16.6379	16.5600	16.2750	1.3384	2.2296	1.7513
9/09/2020	16.5359	16.8731	17.1131	16.2100	2.0108	4.0909	5.5715
9/10/2020	16.5560	17.0462	17.2167	16.4667	0.5423	3.5196	4.5550
9/11/2020	16.5856	17.0462	16.9108	18.0700	8.2149	5.6656	6.4152
9/12/2020	16.6075	17.0462	16.4486	16.3800	1.3892	4.0673	0.4189
9/13/2021	16.6272	17.0462	16.1076	13.7450	20.9689	24.0177	17.1885
9/14/2021	16.6477	17.0462	16.0635	14.8000	12.4845	15.1772	8.5372
9/15/2021	16.6647	17.0462	16.3049	13.0600	27.6008	30.5224	24.8459

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.5423	0.1558	0.3670
error máximo	27.6008	30.5224	24.8459
error medio	6.40	7.16	6.26

Tabla 41

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en la Gasolina motor regular

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	70.8596	69.9831	68.1109	58.9667	20.1689	18.6824	15.5075
9/02/2020	62.9970	64.8110	61.8565	64.0000	1.5672	1.2672	3.3492
9/03/2020	69.0933	66.1229	68.0247	87.0000	20.5824	23.9967	21.8107
9/04/2020	68.7106	66.0342	68.9288	68.0000	1.0450	2.8909	1.3659
9/05/2020	65.2477	65.9053	63.1336	88.1500	25.9810	25.2350	28.3793
9/06/2020	68.2004	65.7765	66.1495	78.4333	13.0466	16.1371	15.6615

9/07/2020	66.6476	65.6477	67.5050	68.0000	1.9889	3.4593	0.7279
9/08/2020	66.0747	65.5188	64.1328	68.0000	2.8313	3.6488	5.6871
9/09/2020	67.3108	65.3900	65.4931	97.0000	30.6074	32.5876	32.4813
9/10/2020	66.1135	65.2611	66.4423	66.0000	0.1720	1.1195	0.6701
9/11/2020	66.2367	65.1323	64.4160	58.0000	14.2012	12.2971	11.0621
9/12/2020	66.4571	65.0035	64.9878	60.1333	10.5162	8.0989	8.0729
9/13/2021	65.7980	64.8746	65.6281	59.5000	10.5848	9.0330	10.2994
9/14/2021	65.9782	64.7458	64.4025	66.0000	0.0330	1.9003	2.4205
9/15/2021	65.8413	64.6170	64.5696	64.9000	1.4504	0.4361	0.5091

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.0330	0.4361	0.5091
error máximo	30.6074	32.5876	32.4813
error medio	10.32	10.72	10.53

Tabla 42

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Benceno en la Gasolina motor regular

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	0.5989	0.6119	0.6052	0.5633	6.3216	8.6160	7.4399
9/02/2020	0.6010	0.6185	0.5977	0.5500	9.2702	12.4560	8.6740
9/03/2020	0.6052	0.6520	0.6089	0.5800	4.3463	12.4134	4.9820
9/04/2020	0.6067	0.6556	0.6004	0.5700	6.4414	15.0233	5.3398
9/05/2020	0.6116	0.6705	0.6156	0.5600	9.2140	19.7272	9.9317
9/06/2020	0.6089	0.6721	0.6061	0.5700	6.8228	17.9056	6.3371
9/07/2020	0.6134	0.6674	0.6146	0.5833	5.1477	14.4120	5.3666
9/08/2020	0.6154	0.6855	0.6123	0.6000	2.5631	14.2443	2.0528
9/09/2020	0.6181	0.6759	0.6194	0.6100	1.3268	10.7978	1.5475
9/10/2020	0.6196	0.6860	0.6162	0.6467	4.1880	6.0767	4.7165
9/11/2020	0.6222	0.6860	0.6221	0.5800	7.2737	18.2695	7.2668

9/12/2020	0.6231	0.6860	0.6199	0.6900	9.6963	0.5851	10.1604
9/13/2021	0.6252	0.6860	0.6256	0.7150	12.5649	4.0611	12.4996
9/14/2021	0.6268	0.6860	0.6239	0.6500	3.5757	5.5328	4.0143
9/15/2021	0.6286	0.6860	0.6287	0.6500	3.2986	5.5328	3.2844

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	1.3268	0.5851	1.5475
error máximo	12.5649	19.7272	12.4996
error medio	6.14	11.04	6.24

Tabla 43

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Índice antidetonante en la Gasolina motor regular

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	82.2184	82.3689	82.5603	82.0000	0.2664	0.4499	0.6833
9/02/2020	82.3400	82.5212	82.5787	82.5000	0.1939	0.0257	0.0954
9/03/2020	82.3443	82.4921	82.1362	82.2500	0.1146	0.2943	0.1384
9/04/2020	82.4417	82.6758	82.1739	83.0000	0.6726	0.3906	0.9952
9/05/2020	82.3840	82.4951	82.3121	82.9500	0.6823	0.5484	0.7690
9/06/2020	82.4424	82.6480	82.7092	82.3000	0.1730	0.4229	0.4972
9/07/2020	82.4856	82.5975	82.6499	82.7833	0.3596	0.2245	0.1612
9/08/2020	82.5061	82.5068	82.3669	82.6250	0.1440	0.1430	0.3124
9/09/2020	82.5387	82.6929	82.3301	82.0000	0.6569	0.8450	0.4026
9/10/2020	82.5512	82.7548	82.4544	82.0333	0.6313	0.8795	0.5133
9/11/2020	82.5703	82.7548	82.6333	84.4000	2.1679	1.9493	2.0932
9/12/2020	82.5888	82.7548	82.6749	83.0000	0.4954	0.2954	0.3917
9/13/2021	82.6029	82.7548	82.5379	82.6750	0.0872	0.0965	0.1658
9/14/2021	82.6174	82.7548	82.4364	83.1000	0.5808	0.4154	0.7985
9/15/2021	82.6286	82.7548	82.4915	82.7000	0.0863	0.0662	0.2521

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.0863	0.0257	0.0954
error máximo	2.1679	1.9493	2.0932
error medio	0.49	0.47	0.55

Tabla 44

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Punto final de ebullición en la Gasolina motor regular

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	193.0768	193.6365	192.5317	192.3333	0.3865	0.6776	0.1031
9/02/2020	193.3034	193.6359	192.7690	194.0000	0.3591	0.1877	0.6345
9/03/2020	192.8423	193.0462	192.2563	194.0000	0.5968	0.4917	0.8988
9/04/2020	193.2980	193.2278	192.6246	193.0000	0.1544	0.1180	0.1945
9/05/2020	193.3500	194.2579	193.2170	191.0000	1.2303	1.7057	1.1608
9/06/2020	193.6422	194.8615	192.7094	192.3333	0.6805	1.3144	0.1955
9/07/2020	193.7928	194.9962	193.4467	195.5000	0.8732	0.2577	1.0503
9/08/2020	193.8442	195.0561	192.6625	194.5000	0.3371	0.2859	0.9447
9/09/2020	193.9683	195.0561	193.5124	196.0000	1.0366	0.4816	1.2692
9/10/2020	194.0324	195.0561	193.1058	196.0000	1.0039	0.4816	1.4767
9/11/2020	194.1295	195.0561	193.4537	197.0000	1.4571	0.9867	1.8002
9/12/2020	194.2022	195.0561	193.4914	195.0000	0.4091	0.0288	0.7736
9/13/2021	194.2589	195.0561	193.2756	190.0000	2.2415	2.6611	1.7240
9/14/2021	194.3153	195.0561	193.7983	191.0000	1.7357	2.1236	1.4651
9/15/2021	194.3585	195.0561	193.3051	188.0000	3.3822	3.7533	2.8219

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.1544	0.0288	0.1031
error máximo	3.3822	3.7533	2.8219
error medio	1.06	1.04	1.10

Tabla 45

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Presión de vapor Reid en la Gasolina motor regular

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/01/2020	7.7517	7.7412	7.7995	7.9300	2.2485	2.3808	1.6453
9/02/2020	7.7635	7.7266	7.8509	7.4100	4.7704	4.2727	5.9507
9/03/2020	7.7736	7.8304	7.8325	7.9900	2.7087	1.9975	1.9709
9/04/2020	7.7437	7.7825	7.6943	7.8600	1.4797	0.9856	2.1087
9/05/2020	7.7410	7.7207	7.6630	7.9900	3.1164	3.3708	4.0932
9/06/2020	7.7360	7.7225	7.7042	8.0980	4.4708	4.6367	4.8629
9/07/2020	7.7300	7.7604	7.7793	7.7233	0.0867	0.4805	0.7244
9/08/2020	7.7274	7.7228	7.8073	7.9150	2.3705	2.4289	1.3605
9/09/2020	7.7249	7.7228	7.7566	7.7700	0.5804	0.6081	0.1727
9/10/2020	7.7230	7.7228	7.6761	8.0400	3.9429	3.9459	4.5267
9/11/2020	7.7217	7.7228	7.6451	7.7400	0.2363	0.2229	1.2263
9/12/2020	7.7207	7.7228	7.6927	7.9875	3.3402	3.3145	3.6913
9/13/2021	7.7200	7.7228	7.7684	7.8967	2.2378	2.2024	1.6246
9/14/2021	7.7194	7.7228	7.7940	7.8633	1.8303	1.7878	0.8813
9/15/2021	7.7190	7.7228	7.7430	7.6800	0.5078	0.5567	0.8200

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.0867	0.2229	0.1727
error máximo	4.7704	4.6367	5.9507
error medio	2.26	2.21	2.38

Apéndice I. Error de capacidad de proceso de la Gasolina motor regular (GMR)

Tabla 46

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Aromáticos en la Gasolina motor regular

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/1/20	2.0146	2.0164	0.09
9/2/20	2.0193	2.0217	0.12
9/3/20	2.0241	2.0265	0.12
9/4/20	2.0292	2.0296	0.02
9/5/20	2.0331	2.0300	0.15
9/6/20	2.0360	2.0305	0.27
9/7/20	2.0399	2.0339	0.30
9/8/20	2.0445	2.0389	0.27
9/9/20	2.0489	2.0441	0.23
9/10/20	2.0537	2.0491	0.22
9/11/20	2.0568	2.0543	0.12
9/12/20	2.0615	2.0592	0.11
9/13/20	2.0502	2.0632	0.64
9/14/20	2.0482	2.0672	0.93
9/15/20	2.0304	2.0717	2.04

error mínimo	0.02
error máximo	2.04
error medio	0.38

Tabla 47

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Azufre en la Gasolina motor regular

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/1/20	0.3655	0.3654	0.02
9/2/20	0.3672	0.3671	0.02
9/3/20	0.3683	0.3687	0.11
9/4/20	0.3700	0.3704	0.11
9/5/20	0.3710	0.3720	0.27
9/6/20	0.3725	0.3737	0.32
9/7/20	0.3741	0.3753	0.32
9/8/20	0.3757	0.3769	0.32
9/9/20	0.3763	0.3785	0.59
9/10/20	0.3779	0.3802	0.59
9/11/20	0.3796	0.3818	0.58
9/12/20	0.3812	0.3834	0.57
9/13/20	0.3828	0.3850	0.56
9/14/20	0.3844	0.3866	0.56
9/15/20	0.3860	0.3882	0.56

error mínimo	0.02
error máximo	0.59
error medio	0.37

Tabla 48

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Benceno en la Gasolina motor regular

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/1/20	1.1356	1.1378	0.20
9/2/20	1.1338	1.1394	0.49
9/3/20	1.1343	1.1412	0.60
9/4/20	1.1343	1.1431	0.78
9/5/20	1.1335	1.1451	1.02
9/6/20	1.1336	1.1471	1.19
9/7/20	1.1345	1.1493	1.30
9/8/20	1.1362	1.1515	1.35
9/9/20	1.1383	1.1538	1.36
9/10/20	1.1413	1.1562	1.30
9/11/20	1.1421	1.1586	1.45
9/12/20	1.1448	1.1611	1.42
9/13/20	1.1469	1.1637	1.46
9/14/20	1.1499	1.1662	1.42
9/15/20	1.1529	1.1689	1.39

error mínimo	0.20
error máximo	1.46
error medio	1.12

Tabla 49

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el Índice antidetonante en la Gasolina motor regular

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/1/20	0.4857	0.4868	0.22
9/2/20	0.4865	0.4876	0.23
9/3/20	0.4867	0.4884	0.35
9/4/20	0.4882	0.4895	0.25
9/5/20	0.4898	0.4903	0.10
9/6/20	0.4901	0.4913	0.26
9/7/20	0.4914	0.4923	0.19
9/8/20	0.4924	0.4931	0.14
9/9/20	0.4918	0.4942	0.49
9/10/20	0.4914	0.4955	0.84
9/11/20	0.4921	0.4967	0.93
9/12/20	0.4937	0.4980	0.87
9/13/20	0.4948	0.4992	0.90
9/14/20	0.4964	0.5004	0.82
9/15/20	0.4975	0.5017	0.84

error mínimo	0.10
error máximo	0.93
error medio	0.50

Tabla 50

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el Punto final de ebullición en la Gasolina motor regular

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/1/20	1.1733	1.1738	0.04
9/2/20	1.1765	1.1770	0.04
9/3/20	1.1798	1.1800	0.02
9/4/20	1.1828	1.1832	0.03
9/5/20	1.1844	1.1864	0.17
9/6/20	1.1871	1.1895	0.20
9/7/20	1.1900	1.1926	0.22
9/8/20	1.1931	1.1956	0.21
9/9/20	1.1957	1.1987	0.25
9/10/20	1.1982	1.2017	0.29
9/11/20	1.1999	1.2047	0.40
9/12/20	1.2029	1.2077	0.40
9/13/20	1.2032	1.2107	0.63
9/14/20	1.2047	1.2137	0.75
9/15/20	1.2016	1.2167	1.26

error mínimo	0.02
error máximo	1.26
error medio	0.33

Tabla 51

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Presión de vapor Reid en la Gasolina motor regular

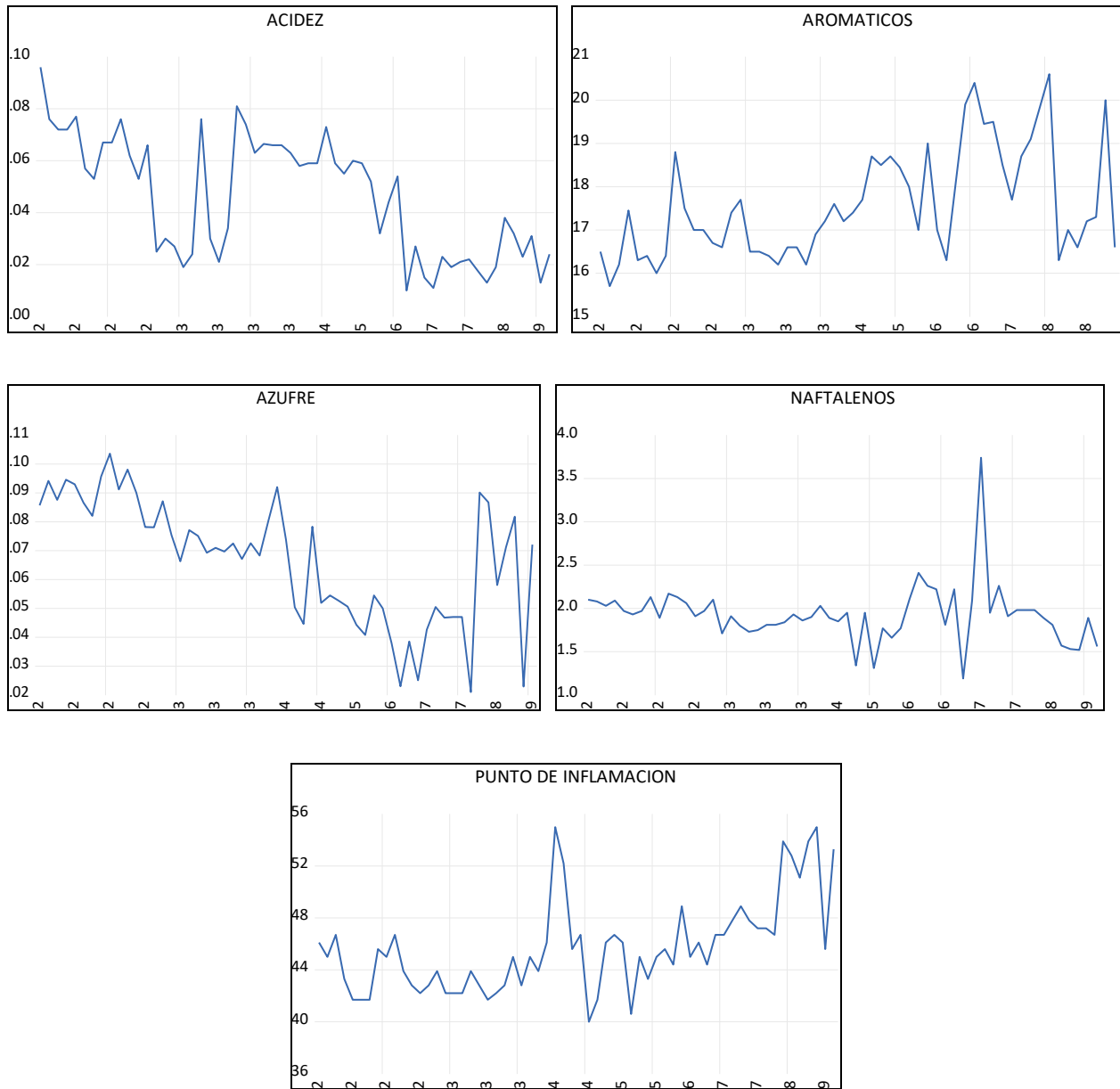
DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/1/20	0.2519	0.2530	0.42
9/2/20	0.2535	0.2536	0.02
9/3/20	0.2526	0.2536	0.42
9/4/20	0.2525	0.2539	0.59
9/5/20	0.2515	0.2546	1.20
9/6/20	0.2498	0.2552	2.14
9/7/20	0.2504	0.2556	2.07
9/8/20	0.2500	0.2562	2.48
9/9/20	0.2504	0.2568	2.56
9/10/20	0.2491	0.2574	3.31
9/11/20	0.2497	0.2580	3.34
9/12/20	0.2488	0.2586	3.93
9/13/20	0.2485	0.2592	4.29
9/14/20	0.2484	0.2598	4.57
9/15/20	0.2492	0.2603	4.48

error mínimo	0.02
error máximo	4.57
error medio	2.39

Apéndice J. Gráficas de los parámetros de calidad del Jet A1

Figura A22

Gráficas de los parámetros de calidad del Jet A1



Apéndice K. Gráficas de estimación de modelos AR, MA y ARIMA para los parámetros de calidad del Jet A1

Figura A23

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Acidez en el Jet A1

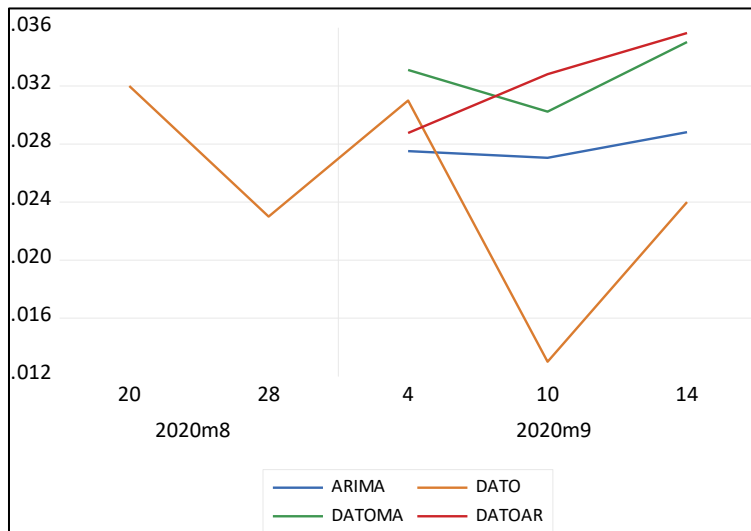


Figura A24

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en el Jet A1

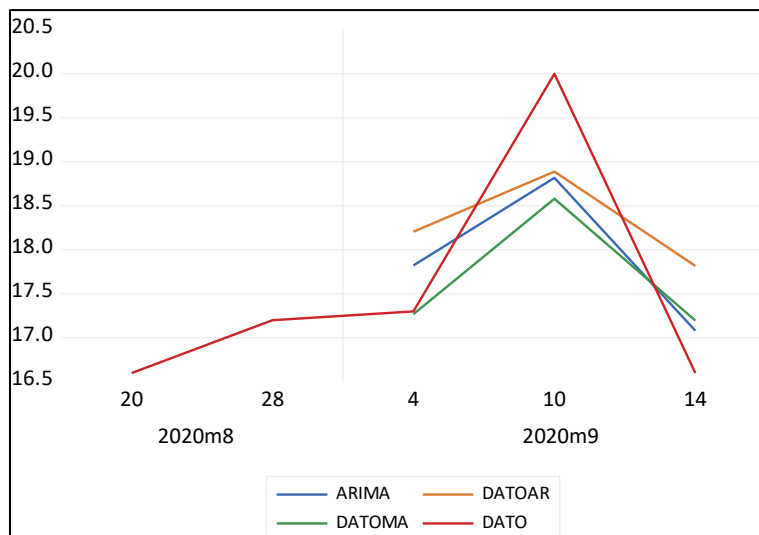


Figura A25

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en el Jet A1

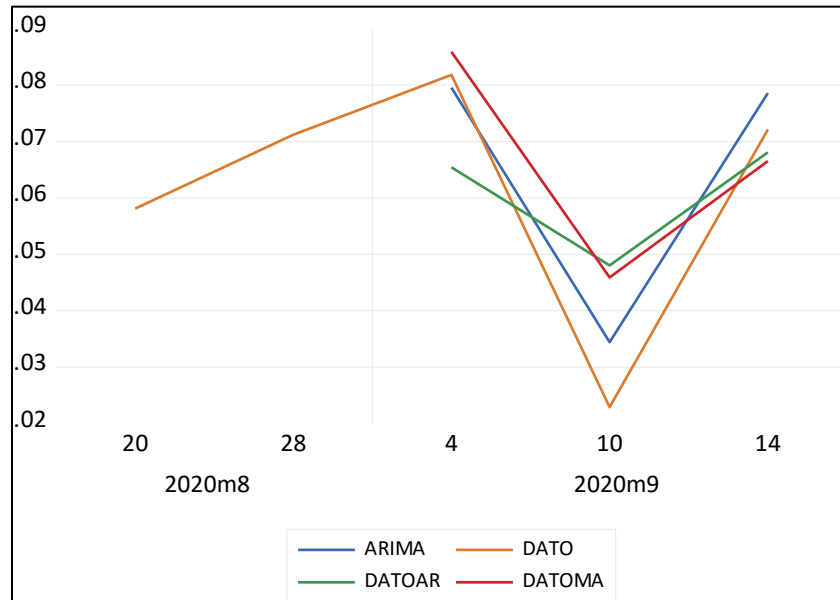


Figura A26

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el contenido de Naftalenos en el Jet A1

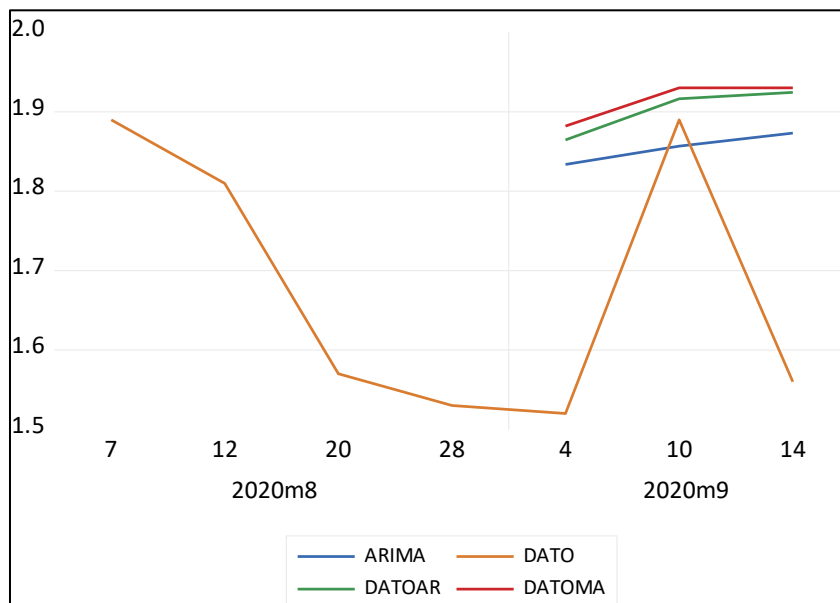
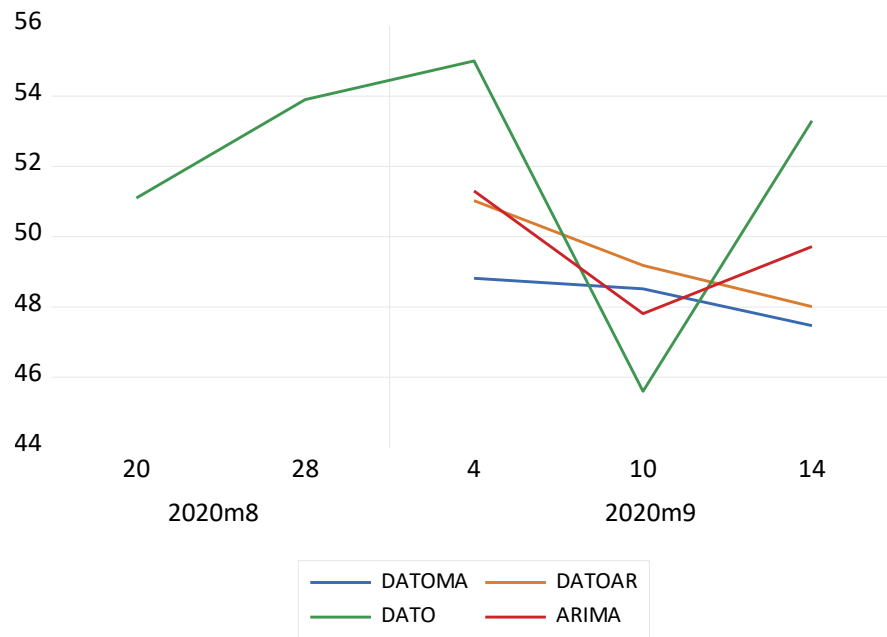


Figura A27

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el Punto de inflamación en el Jet A1



Apéndice L. Error de los modelos AR, MA y ARIMA para el Jet A1

Tabla 52

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Acidez en el Jet A1

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/04/2020	0.0288	0.0331	0.0275	0.0310	7.2198	6.8108	11.2584
9/10/2020	0.0328	0.0302	0.0270	0.0130	152.3913	132.5760	108.0518
9/14/2020	0.0357	0.0350	0.0288	0.0240	48.5676	45.9434	20.0569

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	7.2198	6.8108	11.2584
error máximo	152.3913	132.5760	108.0518
error medio	69.39	61.78	46.46

Tabla 53

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Aromáticos en el Jet A1

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/04/2020	18.2053	17.2678	17.8230	17.3000	5.2329	0.1861	3.0230
9/10/2020	18.8896	18.5806	18.8187	20.0000	5.5520	7.0969	5.9067
9/14/2020	17.8173	17.1959	17.0797	16.6000	7.3333	3.5900	2.8898

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	5.2329	0.1861	2.8898
error máximo	7.3333	7.0969	5.9067
error medio	6.04	3.62	3.94

Tabla 54

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Azufre en el Jet A1

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/04/2020	0.0654	0.0859	0.0795	0.0818	20.0143	5.0163	2.7773
9/10/2020	0.0480	0.0459	0.0344	0.0229	109.7251	100.4069	50.2886
9/14/2020	0.0681	0.0665	0.0786	0.0721	5.5860	7.7553	8.9830

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	5.5860	5.0163	2.7773
error máximo	109.7251	100.4069	50.2886
error medio	45.11	37.73	20.68

Tabla 55

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el contenido de Naftalenos en el Jet A1

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/04/2020	1.8646	1.8822	1.8337	1.5200	22.6721	23.8274	20.6405
9/10/2020	1.9165	1.9301	1.8569	1.8900	1.4006	2.1228	1.7521
9/14/2020	1.9245	1.9301	1.8732	1.5600	23.3659	23.7256	20.0789

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	1.4006	2.1228	1.7521
error máximo	23.3659	23.8274	20.6405
error medio	15.81	16.56	14.16

Tabla 56

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Punto de inflamación en el Jet A1

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/04/2020	51.0225	48.8162	51.2997	55.0000	7.2318	11.2433	6.7279
9/10/2020	49.1835	48.5180	47.8075	45.6000	7.8585	6.3992	4.8410
9/14/2020	48.0082	47.4688	49.7145	53.3000	9.9283	10.9403	6.7271

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	7.2318	6.3992	4.8410
error máximo	9.9283	11.2433	6.7279
error medio	8.34	9.53	6.10

Apéndice M. Error de capacidad de proceso del Jet A1

Tabla 57

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Acidez en el Jet A1

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/04/2020	0.7746	0.7738	0.10
9/10/2020	0.7749	0.7806	0.73
9/14/2020	0.7809	0.7878	0.88

error mínimo	0.10
error máximo	0.88
error medio	0.57

Tabla 58

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Aromáticos en el Jet A1

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/04/2020	2.0419	2.0419	0.00
9/10/2020	1.9749	2.0417	3.38
9/14/2020	1.9870	2.0607	3.71

error mínimo	0.00
error máximo	3.71
error medio	2.37

Tabla 59

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Azufre en el Jet A1

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/04/2020	3.6894	3.6947	0.14
9/10/2020	3.5914	3.6563	1.81
9/14/2020	3.6205	3.6763	1.54

error mínimo	0.14
error máximo	1.81
error medio	1.16

Tabla 60

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el contenido de Naftalenos en el Jet A1

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/04/2020	1.9051	1.9361	1.63
9/10/2020	1.9212	1.9509	1.55
9/14/2020	1.9107	1.9663	2.91

error mínimo	1.55
error máximo	2.91
error medio	2.03

Tabla 61

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el Punto de inflamación en el Jet A1

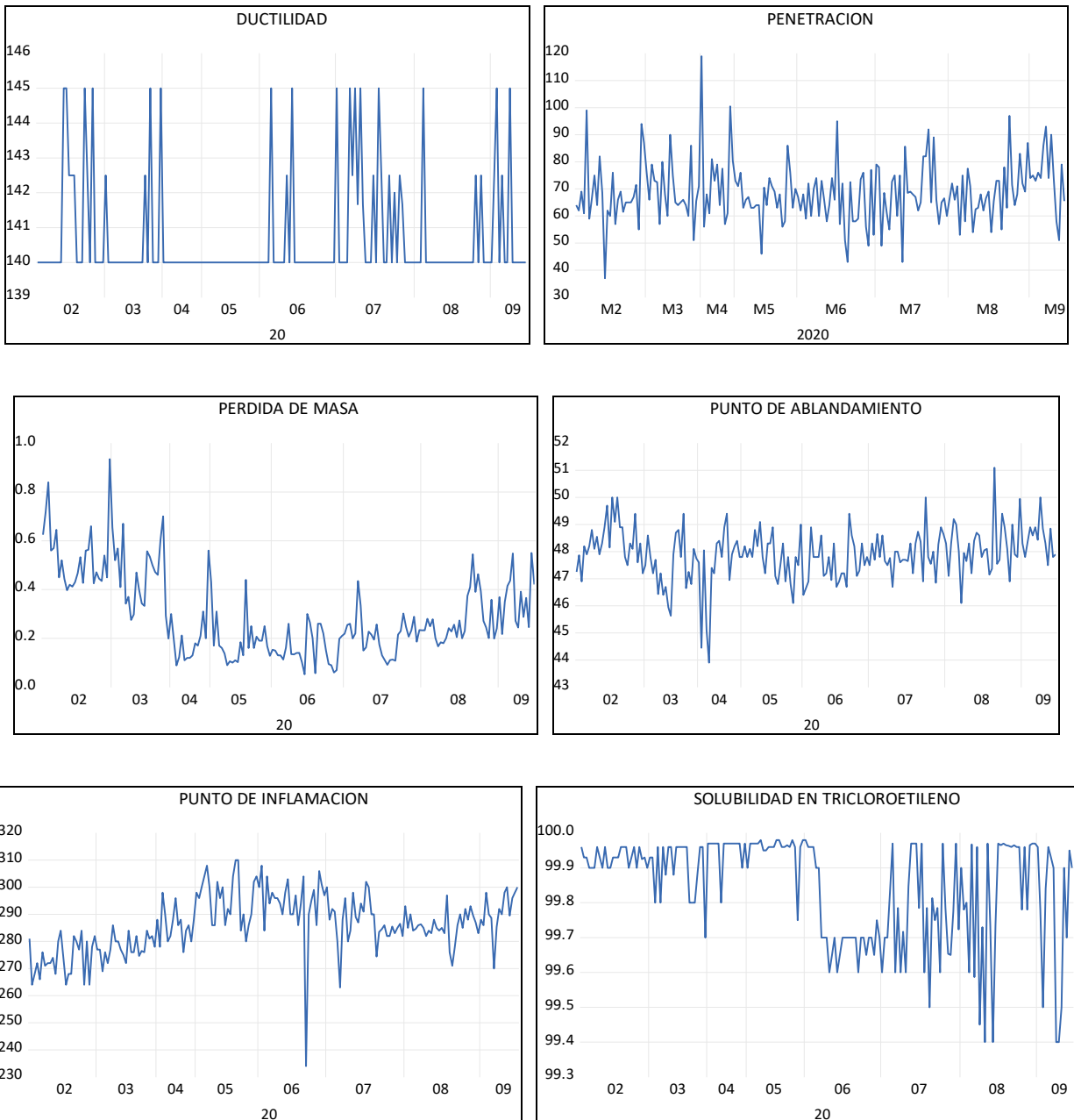
DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/04/2020	0.7137	0.7362	3.16
9/10/2020	0.7197	0.7434	3.29
9/14/2020	0.7102	0.7471	5.20

error mínimo	3.16
error máximo	5.20
error medio	3.88

Apéndice N. Gráficas de los parámetros de calidad del Asfalto 60/70

Figura A28

Gráficas de los parámetros de calidad del Asfalto 60/70



Apéndice O. Gráficas de estimación de modelos AR, MA y ARIMA para los parámetros de calidad del Asfalto 60/70

Figura A29

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Ductilidad en el Asfalto 60/70

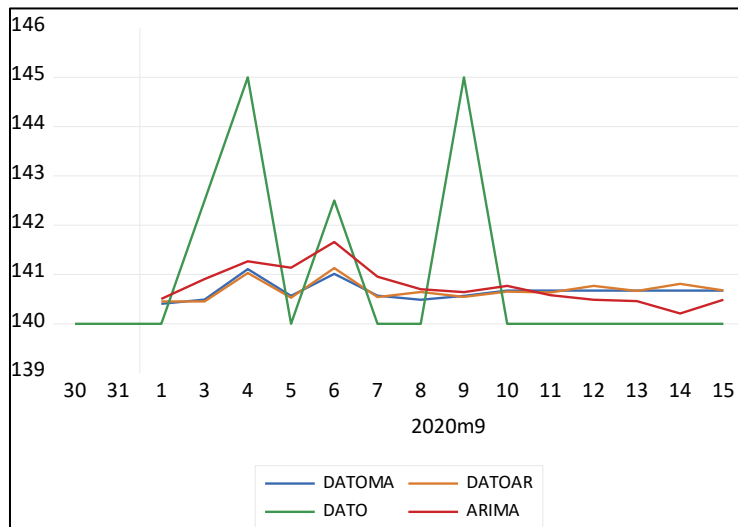


Figura A30

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Penetración en el Asfalto 60/70

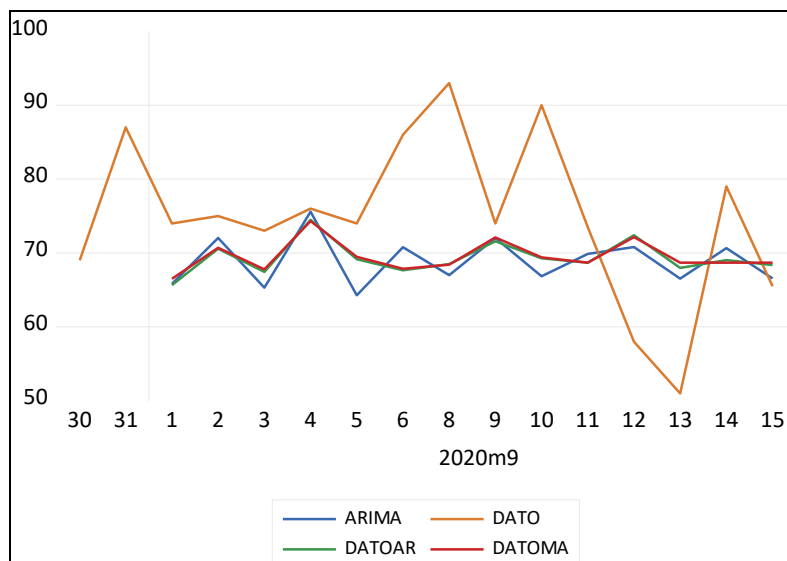


Figura A31

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Pérdida de masa en el Asfalto 60/70

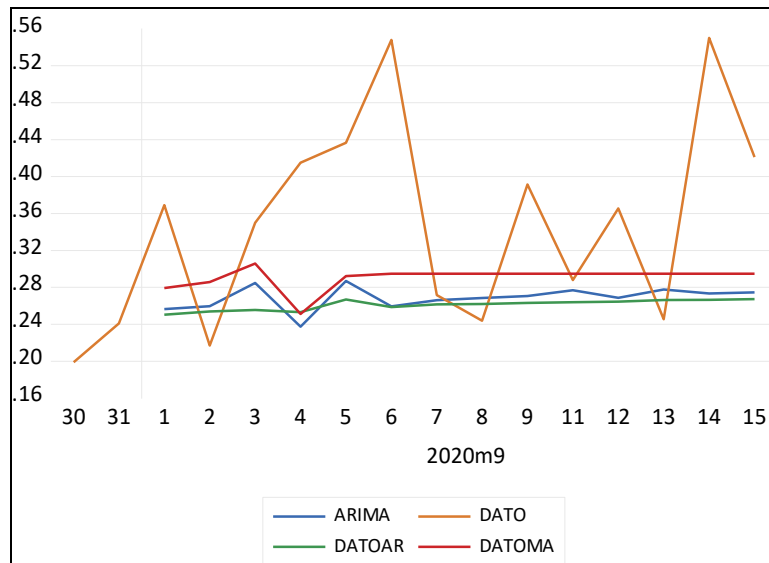


Figura A32

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el Punto de ablandamiento en el Asfalto 60/70

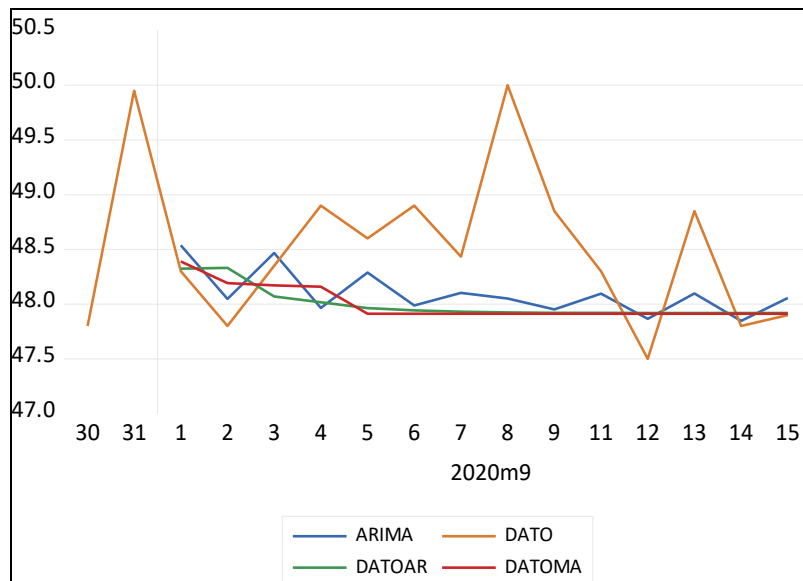


Figura A33

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para el Punto de inflamación en el Asfalto 60/70

Figura

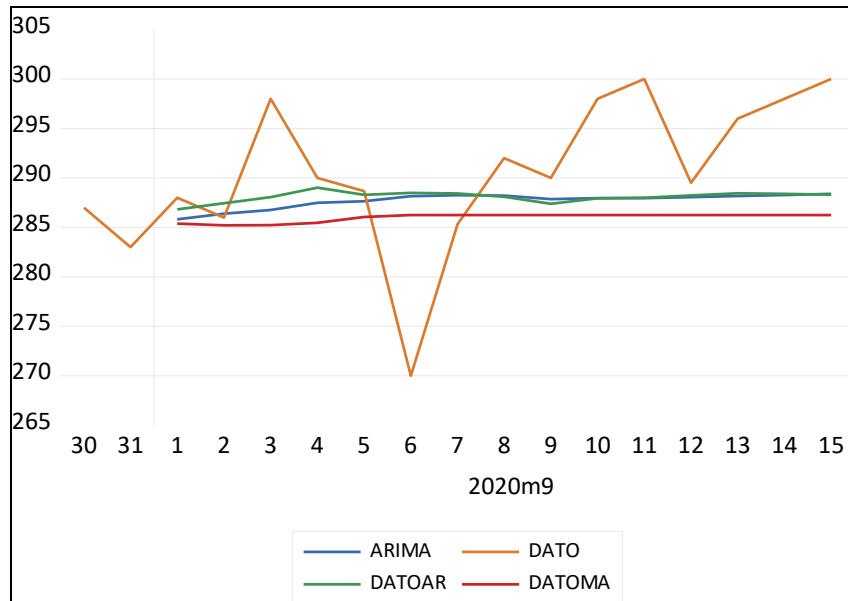


Figura A34

Gráfica de las estimaciones de modelos AR, MA y ARIMA para la Solubilidad del tricloroetileno en el Asfalto 60/70

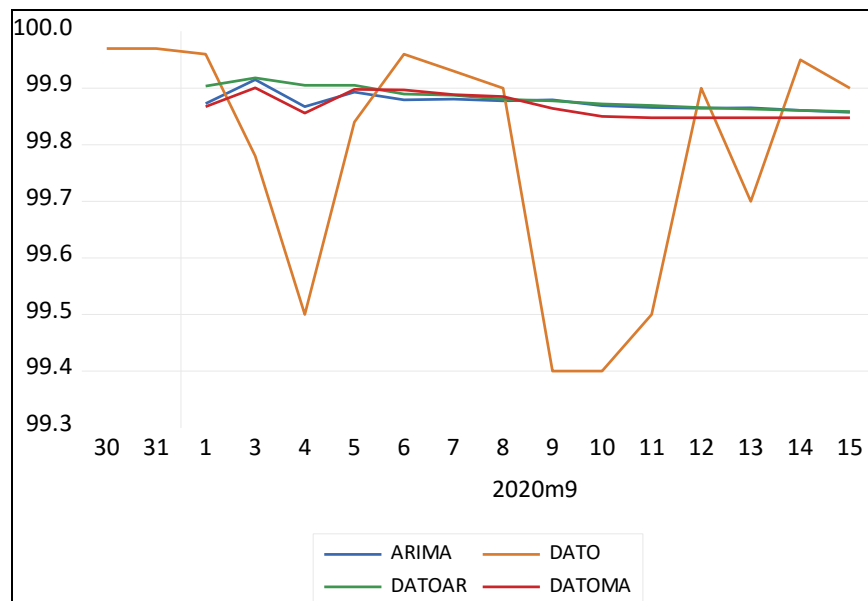


Tabla 62

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Ductilidad en el Asfalto 60/70

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/1/20	140.4515	140.4039	140.5023	140.0000	0.3225	0.2885	0.3588
9/3/20	140.4515	140.4887	140.9070	142.5000	1.4375	1.4115	1.1179
9/4/20	141.0303	141.1090	141.2654	145.0000	2.7377	2.6834	2.5756
9/5/20	140.5287	140.5669	141.1357	140.0000	0.3776	0.4049	0.8112
9/6/20	141.1292	141.0134	141.6576	142.5000	0.9620	1.0432	0.5911
9/7/20	140.5418	140.5677	140.9532	140.0000	0.3870	0.4055	0.6809
9/8/20	140.6444	140.4850	140.6985	140.0000	0.4603	0.3465	0.4989
9/9/20	140.5441	140.5668	140.6400	145.0000	3.0730	3.0574	3.0069
9/10/20	140.6522	140.6715	140.7693	140.0000	0.4659	0.4796	0.5495
9/11/20	140.6351	140.6715	140.5789	140.0000	0.4536	0.4796	0.4135
9/12/20	140.7697	140.6715	140.4852	140.0000	0.5498	0.4796	0.3466
9/13/20	140.6661	140.6715	140.4598	140.0000	0.4758	0.4796	0.3284
9/14/20	140.8096	140.6715	140.2067	140.0000	0.5783	0.4796	0.1477
9/15/20	140.6740	140.6715	140.4855	140.0000	0.4815	0.4796	0.3468

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.3225	0.2885	0.1477
error máximo	3.0730	3.0574	3.0069
error medio	0.91	0.89	0.84

Tabla 63

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Penetración en el Asfalto 60/70

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/1/20	65.6478	66.5105	65.8090	74.0000	11.2868	10.1209	11.0689
9/2/20	70.5766	70.7088	72.0365	75.0000	5.8979	5.7216	3.9513

9/3/20	67.4425	67.7931	65.2929	73.0000	7.6130	7.1327	10.5577
9/4/20	74.4747	74.3077	75.5797	76.0000	2.0070	2.2267	0.5531
9/5/20	69.1587	69.4876	64.2750	74.0000	6.5422	6.0978	13.1419
9/6/20	67.6612	67.8492	70.7777	86.0000	21.3242	21.1056	17.7004
9/8/20	68.4986	68.4297	66.9894	93.0000	26.3456	26.4197	27.9684
9/9/20	71.5812	72.1081	72.0224	74.0000	3.2687	2.5566	2.6725
9/10/20	69.2876	69.4097	66.8401	90.0000	23.0138	22.8781	25.7332
9/11/20	68.6900	68.6828	69.8588	73.5000	6.5442	6.5540	4.9540
9/12/20	72.4035	72.1618	70.8064	58.0000	24.8336	24.4169	22.0800
9/13/20	67.9716	68.7032	66.5413	51.0000	33.2777	34.7121	30.4730
9/14/20	69.0266	68.7032	70.6517	79.0000	12.6246	13.0340	10.5674
9/15/20	68.3715	68.7032	66.5456	65.5000	4.3840	4.8903	1.5963

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	2.0070	2.2267	0.5531
error máximo	33.2777	34.7121	30.4730
error medio	13.50	13.42	13.07

Tabla 64

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Pérdida de masa en el Asfalto 60/70

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/1/20	0.2504	0.2794	0.2565	0.3690	32.1461	24.2951	30.4983
9/2/20	0.2540	0.2858	0.2597	0.2170	17.0470	31.7081	19.6900
9/3/20	0.2555	0.3058	0.2849	0.3500	26.9886	12.6293	18.6049
9/4/20	0.2532	0.2512	0.2375	0.4150	38.9832	39.4783	42.7808

9/5/20	0.2670	0.2923	0.2870	0.4365	38.8363	33.0263	34.2606
9/6/20	0.2586	0.2949	0.2595	0.5480	52.8069	46.1945	52.6491
9/7/20	0.2616	0.2949	0.2660	0.2717	3.7022	8.5353	2.0675
9/8/20	0.2620	0.2949	0.2685	0.2440	7.3618	20.8418	10.0421
9/9/20	0.2632	0.2949	0.2706	0.3915	32.7718	24.6861	30.8789
9/11/20	0.2640	0.2949	0.2770	0.2880	8.3160	2.3799	3.8074
9/12/20	0.2646	0.2949	0.2686	0.3655	27.6159	19.3286	26.5129
9/13/20	0.2663	0.2949	0.2778	0.2455	8.4727	20.1035	13.1573
9/14/20	0.2665	0.2949	0.2735	0.5500	51.5404	46.3902	50.2762
9/15/20	0.2673	0.2949	0.2747	0.4210	36.4991	29.9634	34.7619

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	3.7022	2.3799	2.0675
error máximo	52.8069	46.3902	52.6491
error medio	26.66	25.35	25.79

Tabla 65

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Punto de ablandamiento en el Asfalto 60/70

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/1/20	48.3234	48.3895	48.5367	48.3000	0.0484	0.1853	0.4901
9/2/20	48.3314	48.1913	48.0475	47.8000	1.1117	0.8187	0.5177
9/3/20	48.0697	48.1715	48.4666	48.3500	0.5797	0.3691	0.2411
9/4/20	48.0163	48.1589	47.9639	48.9000	1.8072	1.5155	1.9142
9/5/20	47.9628	47.9116	48.2876	48.6000	1.3112	1.4165	0.6428
9/6/20	47.9429	47.9116	47.9876	48.9000	1.9572	2.0213	1.8659
9/7/20	47.9301	47.9116	48.1018	48.4333	1.0390	1.0773	0.6845
9/8/20	47.9242	47.9116	48.0499	50.0000	4.1516	4.1768	3.9003
9/9/20	47.9209	47.9116	47.9517	48.8500	1.9019	1.9210	1.8388
9/11/20	47.9193	47.9116	48.0959	48.3000	0.7883	0.8042	0.4225
9/12/20	47.9184	47.9116	47.8653	47.5000	0.8808	0.8665	0.7691
9/13/20	47.9179	47.9116	48.0977	48.8500	1.9080	1.9210	1.5401
9/14/20	47.9177	47.9116	47.8463	47.8000	0.2462	0.2334	0.0969
9/15/20	47.9176	47.9116	48.0552	47.9000	0.0367	0.0242	0.3239

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.0484	0.1853	0.0969
error máximo	4.1516	4.1768	3.9003
error medio	1.36	1.33	1.15

Tabla 66

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para el Punto de inflamación en el Asfalto 60/70

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/1/20	286.8254	285.3776	287.8246	288.0000	0.4078	0.9105	0.0609
9/2/20	287.4383	285.2062	286.3754	286.0000	0.5029	0.2776	0.1313
9/3/20	288.0564	285.2248	286.7673	298.0000	3.3368	4.2870	3.7693
9/4/20	289.0089	285.4679	287.4861	290.0000	0.3418	1.5628	0.8669
9/5/20	288.2998	286.0468	287.6387	288.6667	0.1271	0.9076	0.3561
9/6/20	288.4961	286.2516	288.0612	270.0000	6.8504	6.0191	6.6893
9/7/20	288.4213	286.2516	288.2437	285.3333	1.0822	0.3218	1.0200
9/8/20	288.0867	286.2516	288.2178	292.0000	1.3402	1.9686	1.2953
9/9/20	287.3785	286.2516	287.8626	290.0000	0.9040	1.2925	0.7370
9/10/20	287.9345	286.2516	287.9583	298.0000	3.3777	3.9424	3.3697
9/11/20	287.9914	286.2516	288.9651	300.0000	4.0029	4.5828	3.6783
9/12/20	288.2252	286.2516	288.0502	289.5000	0.4403	1.1221	0.5008
9/13/20	288.4549	286.2516	288.1678	296.0000	2.5490	3.2934	2.6460
9/14/20	288.3811	286.2516	288.2677	298.0000	3.2278	3.9424	3.2659
9/15/20	288.3199	286.2516	288.3915	300.0000	3.8934	4.5828	3.8695

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.1271	0.2776	0.0609
error máximo	6.8504	6.0191	6.6893
error medio	1.94	2.35	1.93

Tabla 67

Valores de pronóstico y error porcentual de las funciones, AR, MA y ARIMA para la Solubilidad en tricloroetileno en el Asfalto 60/70

FECHA	AR	MA	ARIMA	dato real	error % AR	error % MA	error % ARIMA
9/1/20	99.9038	99.8676	99.8827	99.9600	0.0562	0.0924	0.0773
9/3/20	99.9182	99.9007	99.9151	99.7800	0.1385	0.1209	0.1354
9/4/20	99.9050	99.8558	99.8312	99.5000	0.4071	0.3576	0.3329
9/5/20	99.9051	99.8979	99.8930	99.8400	0.0653	0.0580	0.0530
9/6/20	99.8895	99.8757	99.8752	99.9600	0.0706	0.0843	0.0848
9/7/20	99.8875	99.8884	99.8806	99.9300	0.0425	0.0417	0.0494
9/8/20	99.8802	99.8851	99.8774	99.9000	0.0198	0.0149	0.0226
9/9/20	99.8776	99.8641	99.8793	99.4000	0.4805	0.4669	0.4822
9/10/20	99.8720	99.8610	99.8389	99.4000	0.4748	0.4638	0.4416
9/11/20	99.8692	99.8475	99.8658	99.5000	0.3711	0.3492	0.3677
9/12/20	99.8655	99.8475	99.8643	99.9000	0.0345	0.0526	0.0357
9/13/20	99.8632	99.8475	99.8650	99.7000	0.1637	0.1479	0.1655
9/14/20	99.8605	99.8475	99.8605	99.9500	0.0896	0.1026	0.0896
9/15/20	99.8586	99.8475	99.8572	99.9000	0.0415	0.0526	0.0428

	error % AR	error % MA	error % ARIMA
error mínimo	0.0198	0.0149	0.0226
error máximo	0.4805	0.4669	0.4822
error medio	0.175	0.172	0.170

Apéndice Q. Error de capacidad de proceso del Asfalto

Tabla 68

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Ductilidad en el Asfalto 60/70

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/20	9.1685	9.1739	0.06
9/03/20	9.1559	9.1999	0.48
9/04/20	8.9695	9.2225	2.82
9/05/20	8.9891	9.2466	2.86
9/06/20	8.9798	9.2618	3.14
9/07/20	8.9991	9.2873	3.20
9/08/20	9.0183	9.3134	3.27
9/09/20	8.8479	9.3393	5.55
9/10/20	8.8665	9.3652	5.62
9/11/20	8.8851	9.3909	5.69
9/12/20	8.9036	9.4160	5.76
9/13/20	8.9221	9.4410	5.82
9/14/20	8.9406	9.4635	5.85
9/15/20	8.9590	9.4884	5.91

error mínimo 0.06

error máximo 5.91

error medio 4.00

Tabla 69

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Penetración en el Asfalto 60/70

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/20	0.0538	0.0553	2.66
9/02/20	0.0528	0.0547	3.73
9/03/20	0.0521	0.0554	6.31
9/04/20	0.0509	0.0542	6.58
9/05/20	0.0500	0.0550	9.98
9/06/20	0.0469	0.0547	16.75
9/08/20	0.0423	0.0551	30.01
9/09/20	0.0415	0.0545	31.28
9/10/20	0.0378	0.0549	45.26
9/11/20	0.0371	0.0548	47.58
9/12/20	0.0389	0.0545	40.28
9/13/20	0.0415	0.0549	32.35
9/14/20	0.0399	0.0547	37.08
9/15/20	0.0405	0.0551	36.10

error mínimo 2.66

error máximo 47.58

error medio 24.71

Tabla 70

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Pérdida de masa en el Asfalto 60/70

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/20	1.3865	1.0926	21.20
9/02/20	1.3906	1.0961	21.18
9/03/20	1.3935	1.0995	21.10
9/04/20	1.3939	1.1029	20.87
9/05/20	1.3933	1.1060	20.62
9/06/20	1.3855	1.1086	19.99
9/07/20	1.3896	1.1114	20.02
9/08/20	1.3937	1.1141	20.06
9/09/20	1.3952	1.1172	19.93
9/11/20	1.3992	1.1205	19.92
9/12/20	1.4016	1.1237	19.82
9/13/20	1.4056	1.1271	19.82
9/14/20	1.3978	1.1301	19.15
9/15/20	1.3981	1.1335	18.93

error mínimo 18.93

error máximo 21.20

error medio 20.19

Tabla 71

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para el Punto de ablandamiento en el Asfalto 60/70

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/20	0.9933	1.0390	4.61
9/02/20	0.9960	1.0422	4.64
9/03/20	0.9990	1.0415	4.25
9/04/20	1.0006	1.0422	4.15
9/05/20	1.0032	1.0453	4.19
9/06/20	1.0049	1.0340	2.90
9/07/20	1.0078	1.0370	2.90
9/08/20	1.0013	1.0393	3.80
9/09/20	1.0032	1.0424	3.91
9/11/20	1.0062	1.0425	3.60
9/12/20	1.0077	1.0454	3.74
9/13/20	1.0096	1.0474	3.75
9/14/20	1.0121	1.0498	3.73
9/15/20	1.0147	1.0525	3.72

error mínimo 2.90

error máximo 4.64

error medio 3.85

Tabla 72

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Ductilidad en el Asfalto 60/70

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/20	1.6396	1.6396	0.00
9/02/20	1.6444	1.6445	0.01
9/03/20	1.6453	1.6494	0.25
9/04/20	1.6500	1.6542	0.26
9/05/20	1.6549	1.6591	0.26
9/06/20	1.6470	1.6640	1.03
9/07/20	1.6515	1.6688	1.05
9/08/20	1.6556	1.6736	1.09
9/09/20	1.6603	1.6784	1.10
9/10/20	1.6611	1.6833	1.33
9/11/20	1.6603	1.6881	1.67
9/12/20	1.6649	1.6928	1.68
9/13/20	1.6672	1.6976	1.82
9/14/20	1.6682	1.7023	2.05
9/15/20	1.6676	1.7071	2.37

error mínimo 0.00

error máximo 2.37

error medio 1.06

Tabla 73

Valores de pronóstico y error porcentual de la Capacidad de Proceso Cpk para la Solubilidad en tricloroetileno en el Asfalto 60/70

DIA	Cpk	Cpk pron	%Error
9/01/20	2.0412	2.0433	0.10
9/03/20	2.0444	2.0489	0.22
9/04/20	2.0088	2.0543	2.27
9/05/20	2.0143	2.0602	2.28
9/06/20	2.0181	2.0662	2.39
9/07/20	2.0231	2.0722	2.43
9/08/20	2.0287	2.0782	2.44
9/09/20	1.9720	2.0841	5.68
9/10/20	1.9204	2.0896	8.81
9/11/20	1.8926	2.0955	10.72
9/12/20	1.8977	2.1013	10.73
9/13/20	1.8962	2.1072	11.13
9/14/20	1.9000	2.1130	11.21
9/15/20	1.9051	2.1187	11.21

error mínimo 0.10

error máximo 11.21

error medio 5.83
