UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2018

ANÁLISIS TÉCNICO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO RECOMENDADO POR EL FABRICANTE A LOS COMPONENTES CRITICOS EXPUESTOS A ALTAS TEMPERATURAS EN LAS TURBINAS A GAS MODELO M701F EN CENTRAL TERMOELÉCTRICA SAN ISIDRO, ENDESA

TRUJILLO NAHUELPAN, GABRIEL ADOLFO

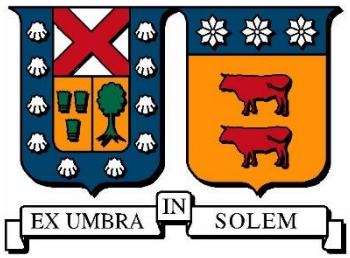
http://hdl.handle.net/11673/40173

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE



"ANÁLISIS TÉCNICO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO RECOMENDADO POR EL FABRICANTE A LOS COMPONENTES CRITICOS EXPUESTOS A ALTAS TEMPERATURAS EN LAS TURBINAS A GAS MODELO M701F EN CENTRAL TERMOELÉCTRICA SAN ISIDRO, ENDESA"

GABRIEL ADOLFO TRUJILLO NAHUELPAN

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCION ENERGÍA

PROFESOR GUÍA: Ing, Mg. LUIS GUZMAN BONET

PROFESOR COREFERENTE: Dr. Ing. MARIO TOLEDO T.

Enero - 2016

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos son totales para Dios y mi familia, mi padre Sergio Trujillo Miranda, mi madre Cristina Nahuelpan Reyes, mis dos hermanas Carmen y Bárbara, mi familia que siempre me ha apoyado, mis amigos de toda la vida y amigos que cultive en estos años de universidad. Un agradecimiento especial a los profesores, Luis Guzman y Mario Toledo, y al jefe, Mauricio Bustos.

DEDICATORIA

A mis padres, a mis hermanas, a la vida.

RESUMEN

En este estudio se realiza un aporte a la Ingeniería de planificación del mantenimiento de los componentes expuestos a altas temperaturas de dos turbinas a gas modelo M701F, de la central termoeléctrica de ciclo combinado San Isidro-Endesa, denominadas SI1 y SI2.

En un primer lugar se analiza la situación actual de funcionamiento del mantenimiento de las turbinas a gas para así introducirse en el contexto de la planta. Luego se realiza una depuración de la información histórica existente donde se advierte la gran variabilidad de los datos producto de cambios mayores de diseño, principalmente en los componentes de la sección de combustión, y algunos cambios menores de diseño constructivo en algunos componentes, tales como diferencias en el espesor de recubrimiento. Lo anterior produce que se eliminen gran cantidad de datos y se generen datos atípicos. Posteriormente, para concentrar el estudio se realiza un Análisis de Criticidad (*AC*) a los componentes estudiados, obteniendo 6 con alta criticidad de un total de 17, dentro de los cuales la *cámara de combustión* alcanza la mayor criticidad en ambas turbinas. Con el conocimiento de los componentes expuestos a alta temperatura críticos se estudian los diferentes modos de fallo que producen inaceptabilidad en las diferentes intervenciones o mantenciones, donde se observa que *grietas* es el modo de fallo más común dentro de este grupo de componentes. Se intenta determinar las posibles causas de los modos de fallo que producen inaceptabilidad en cada componente de este grupo, donde se concluye que la *temperatura de combustión*, además de las *horas de operación con gas* y *cantidad de partidas*, son las causas más probables de estos modos de fallo.

Finalmente, se realiza un análisis estadístico, particularmente un análisis de regresión para obtener las relaciones entre la cantidad de componentes inaceptables y las variables operacionales estudiadas. Es posible obtener baja cantidad de ecuaciones de regresión debido a la baja cantidad de datos en el tamaño muestral final luego de la depuración de la información histórica. Sin embargo, en las relaciones encontradas, se advierte que las

principales causas de inaceptabilidad son las *horas de operación con gas* y *cantidad de partidas*, corroborando los resultados del análisis de los modos de fallo y sus posibles causas.

ABSTRACT

In this study, a contribution is made to the Engineering for planning the maintenance of the components exposed to high temperatures of two gas turbines, model M701F, of the San Isidro-Endesa combined cycle thermoelectric power station, known as SI1 and SI2.

In the first place, the current operating situation of gas turbine maintenance is analyzed in order to be introduced in the context of the plant. Then, a cleansing of the existing historical information is realized where the great variability of the data product of major design changes is noticed, mainly in the components of the combustion section, and some minor changes of constructive design in some components, such as differences in the coating thickness. The above results in the elimination of a large amount of data and the generation of atypical data. Subsequently, to concentrate the study, a Criticality Analysis (CA) is performed on the components studied, obtaining 6 with high criticality of a total of 17, within which the combustion chamber reaches the highest criticality in both turbines. With the knowledge of the components exposed to critical high temperature, the different modes of failure that produce unacceptability in the different interventions or maintenance are studied, where it is observed that cracking is the most common failure mode within this group of components. We try to determine the possible causes of failure modes that produce unacceptability in each component of this group, where it is concluded that the combustion temperature, in addition to the hours of operation with gas and number of items, are the most likely causes of these failure modes.

Finally, a statistical analysis is performed, particularly a regression analysis to obtain the relationships between the quantity of unacceptable components and the operational variables studied. It is possible to obtain a low quantity of regression equations due to the low amount of data in the final sample size after the purging of historical information. However, in the relationships found, it is noted that the main causes of unacceptability are the hours of operation with gas and number of items, corroborating the results of the analysis of failure modes and their possible causes.

GLOSARIO

AC:	Análisis de criticidad.
AD:	Prueba de Anderson-Darling.
C:	Criticidad, en Análisis de criticidad.
d:	Estadístico d de Durbin-Watson.
EOH:	Horas equivalentes de operación (Equivalent Operation Hours).
F:	Frecuencia de falla o inaceptabilidad, en Análisis de criticidad.
gl:	Grados de libertad.
H_0:	Hipótesis nula.
H_1:	Hipótesis alternativa.
I:	Impacto, en Análisis de criticidad.
IC:	Inspección de turbina.
IM:	Inspección mayor.
IT:	Inspección de combustión.
LTSA:	Contrato de servicio a largo plazo (Long Term Service Agreement).
N:	Tamaño de la muestra o tamaño muestral.
MM:	Mantenimiento mayor.
r:	Coeficiente de correlación lineal de Pearson.
SC:	Suma de cuadrados.

SCE: Suma de cuadrados explicada.

SCP: Suma de cuadrados promedios.

SCR: Suma de cuadrados de los residuos.

SCT: Suma de cuadrados totales.

SI: San Isidro, central termoeléctrica de ciclo combinado ubicada en Quillota, Chile.

SI1: Unidad generadora 1 de la central San Isidro.

SI2: Unidad generadora 2 de la central San Isidro.

TG: Turbina a gas.

TG1: Turbina a gas de la unidad generadora 1 de la central San Isidro.

TG2: Turbina a gas de la unidad generadora 2 de la central San Isidro.

Trips: Detención intempestiva de la turbina producto de un parámetro de operación anormal (fuera de los valores de protocolo), ya sea interno o externo a la máquina.

Valor p: Nivel exacto de significancia.

α: Nivel de significancia.

β: Coeficiente de regresión.

$\hat{\sigma}^2$: Varianza estimada de las perturbaciones o residuos.

R^2: Coeficiente múltiple de determinación.

R^2 ajustada: Coeficiente múltiple de determinación ajustada.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS ii
DEDICATORIA iii
RESUMEN iv
ABSTRACT vi
GLOSARIO vii
ÍNDICE ix
ÍNDICE DE FIGURAS xiii
ÍNDICE DE TABLAS xvi
ÍNDICE DE GRÁFICOS xx
INTRODUCCIÓN xxii
Breve contexto y motivación del trabajo xxii
Planteamiento del problema xxiii
Objetivo general y específicos xxiv
Objetivo general xxiv
Objetivos específicos xxiv
Estructura de la memoria xxv
DESARROLLO DEL ESTUDIO 1
1 MARCO TEÓRICO 1
1.1 Políticas de mantenimiento 1
1.2 Definición modelo de criticidad: Análisis de Criticidad AC 3
1.2.1 Frecuencia 4
1.2.2 Impacto 4
1.3 Modos de fallo, causas y efectos 5
1.3.1 Tabla Funcionalidad-Modos de fallo-Causas 7
1.4 Consideraciones estadísticas 8
1.4.1 Pruebas de hipótesis y nivel de significancia α 8
1.4.2 Pruebas de significancia 8
1.4.3 Valor *p* o nivel exacto de significancia 9
1.5 Análisis y depuración de la calidad de información histórica existente 9
1.5.1 Datos atípicos 10

1.5.2 Prueba estadístico T 11
1.5.3 Prueba de Dixon 12
1.6 Análisis multivariante 12
1.7 Análisis de regresión múltiple 15
1.7.1 Supuestos del análisis de regresión múltiple 16
1.7.1.1 Coeficiente de correlación lineal de Pearson 17
1.7.1.2 Prueba de Anderson-Darling (AD) 19
1.7.1.3 Evaluación homocedasticidad 20
1.7.1.4 Evaluación de ausencia de errores correlacionados: Prueba *d* de Durbin-Watson y método grafico 21
1.7.1.5 Transformaciones cuando no se cumplen los supuestos 25
1.7.2 Estimación del modelo de regresión 29
1.7.3 Valoración del modelo de regresión 31
1.7.3.1 Análisis de la varianza 32
1.7.3.2 Coeficiente múltiple de determinación $\boldsymbol{R2}$ y $\boldsymbol{R2}$ajustada 35
1.7.3.3 Error estándar de los coeficientes de correlación 37
1.7.4 Predicción con el modelo de regresión 40
1.7.4.1 Predicción individual 40
2 METODOLOGÍA 42
3 RESULTADOS 46
3.1 Mantenimiento turbina a gas M701F en central termoeléctrica San Isidro 46
3.1.1 Descripción general del equipo 46
3.1.2 Descripción de componentes expuestos a altas temperaturas 48
3.1.3 Funcionamiento actual del mantenimiento turbina a gas M701F en central termoeléctrica San Isidro. 54
3.2 Resultado de análisis y depuración de la calidad de información histórica existente 59
3.2.1 San Isidro 1, TG1 59
3.2.2 San Isidro 2, TG2 67
3.3 Análisis de Criticidad AC 73
3.3.1 Frecuencia de falla 73
3.3.2 Impacto 75
3.3.3 Criticidad 77

3.4 Causas, modos y efectos de fallo en componentes expuestos a altas temperaturas en turbina a gas M701F 79
3.4.1 Causas de fallo 79
3.4.2 Modos de fallo 83
3.4.3 Efectos de fallo 85
3.4.4 Tablas Funcionalidad-Modos de fallo-Causas 86
3.5 Análisis de regresión múltiple 94
3.5.1 Turbina a gas San Isidro 1 (SI1) 94
3.5.1.1 Tobera piloto principal 94
3.5.1.2 Tobera piloto gas y tobera piloto petróleo 95
3.5.1.3 Cámara de combustión 96
3.5.1.4 Pieza de transición 101
3.5.1.5 Alabe fijo de 1° etapa 103
3.5.1.6 Alabe fijo de 2° etapa 108
3.5.1.7 Alabe fijo de 3° etapa 113
3.5.1.8 Alabe fijo de 4° etapa 113
3.5.1.9 Alabe móvil de 1° etapa 113
3.5.1.10 Alabe móvil de 2° etapa 115
3.5.1.11 Alabe móvil de 3° etapa SI1 116
3.5.1.12 Alabe móvil de 4° etapa 124
3.5.1.13 Ring segment de 1° etapa 132
3.5.1.14 Ring segment de 2° etapa 133
3.5.1.15 Ring segment de 3° etapa 135
3.5.1.16 Ring segment de 4° etapa 135
3.5.2 Turbina a gas San Isidro 2 (SI2) 136
3.5.2.1 Tobera piloto principal 136
3.5.2.2 Tobera piloto gas 138
3.5.2.3 Tobera piloto petróleo 142
3.5.2.4 Cámara de combustión 144
3.5.2.5 Pieza de transición 151
3.5.2.6 Alabe fijo de 1° etapa 152
3.5.2.7 Alabe fijo de 2° etapa 157

3.5.2.8 Alabe fijo de 3° etapa 158
3.5.2.9 Alabe fijo de 4° etapa 159
3.5.2.10 Alabe móvil de 1° etapa 159
3.5.2.11 Alabe móvil de 2° etapa 165
3.5.2.12 Alabe móvil de 3° etapa 166
3.5.2.13 Alabe móvil de 4° etapa 167
3.5.2.14 Ring segment de 1° etapa 167
3.5.2.15 Ring segment de 2° etapa 172
3.5.2.16 Ring segment de 3° etapa 172
3.5.2.17 Ring segment de 4° etapa 172
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS 172
CONCLUSIONES 196
Conclusiones generales 196
Conclusiones específicas 197
Recomendaciones 200
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS 201
ANEXOS 202
A-1: Tabla valores críticos del estadístico T, norma ASTM E178-08. 202
A-2: Tabla calculo estadístico de prueba de Dixon y valores críticos, norma ASTM E178-08. 203
A-3: Diagrama de flujo para elegir el análisis multivariante apropiado. 204
A-4: Estadístico d de Durbin-Watson para un nivel de significancia de 0,05. 205
A-5: Tabla de distribución t. 206
A-6: Diagrama de flujo de componentes expuestos a altas temperaturas en turbina a gas modelo M701F. 207
A-7: Tabla resumen de resultado del análisis y depuración de la información histórica SI1. 208
A-8: Tabla resumen de resultado del análisis y depuración de la información histórica SI2. 210
A-9: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, cámara de combustión SI1. 212
A-10: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, alabe fijo de 1° etapa SI1. 213

A-11: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, alabe fijo de 2° etapa SI1. 214
A-12: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, alabe móvil de 3° etapa SI1. 215
A-13: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, alabe móvil de 4° etapa SI1. 216
A-14: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, tobera piloto gas SI2.. 217
A-15: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, cámara de combustión SI2. 218
A-16: Resultados de análisis de regresión por Minitab, alabe fijo de 1° etapa SI2. 219
A-17: Resultados de análisis de regresión por Minitab, alabe móvil de 1° etapa SI2. 220
A-18: Resultados de análisis de regresion por Minitab, ring segment de 1° etapa SI2. ... 221

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Evolución mantenimiento industrial. [2] 1
Figura 1.2: Relación causa, modo y efecto del fallo. 7
Figura 1.3: Ejemplo dato atípico. 10
Figura 1.4: Gráficos residuos v/s valor teórico del modelo obtenido. 21
Figura 1.5: Gráficos con patrones comunes que representan presencia de errores correlacionados. 25
Figura 1.6: Gráficos de probabilidad normal para diferentes distribuciones. 28
Figura 2.1: Diagrama de flujo para metodología análisis de regresión. 45
Figura 3.1: Turbina a gas M701F. [9] 47
Figura 3.2: Ensamble tobera de inyección. [9] 50
Figura 3.3: Cámara de combustión, turbina a gas M701F. 50
Figura 3.4: Pieza de transición, turbina a gas M701F. 51
Figura 3.5: Etapas de alabes fijos en turbina a gas M701F. [9] 52
Figura 3.6: Alabe fijo de 1° etapa en turbina a gas M701F. 52
Figura 3.7: Alabe fijo y ring segment de 3° etapa. [9] 53
Figura 3.8: Alabes móviles de 1°, 2°, 3° y 4° etapa (en ese orden) [9] 54
Figura 3.9: Gráfico de puntos tobera piloto combustible (gas, petróleo) SI1. 60

Figura 3.10: Gráfico de puntos cámara de combustión SI1 61
Figura 3.11: Gráfico de puntos pieza de transición SI1 62
Figura 3.12: Gráfico de puntos alabe fijo de 2° etapa SI1 63
Figura 3.13: Gráfico de puntos alabe móvil de 3° etapa SI1 65
Figura 3.14: Gráfico de puntos alabe móvil de 4° etapa SI1. 66
Figura 3.15: Gráfico de puntos tobera piloto gas SI2. 68
Figura 3.16: Gráfico de puntos cámara de combustión SI2. 69
Figura 3.17: Gráfico de puntos ring segment de 1° etapa SI2. 72
Figura 3.18: Tabla evaluación impacto, Análisis de criticidad. 76
Figura 3.19: Gráficos de dispersión, datos tobera piloto principal SI1. 95
Figura 3.20: Gráficos de dispersión datos tobera piloto gas y tobera piloto petróleo SI1. 96
Figura 3.21: Gráficos de dispersión, datos cámara combustión SI1. 97
Figura 3.22: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Componentes inaceptables (izquierda), y Horas operación petróleo (derecha), cámara de combustión SI1. 99
Figura 3.23: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Ln(Componentes inaceptables) (izquierda), y Ln(Horas operación petróleo) (derecha), cámara de combustión SI1. 100
Figura 3.24: Gráficos de dispersión, datos pieza de transición SI1. 102
Figura 3.25: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Ln(Componentes inaceptables) (izquierda), y Horas operación gas (derecha), pieza de transición SI1. 103
Figura 3.26: Gráficos de dispersión datos alabe fijo de 1° etapa SI1. 104
Figura 3.27: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Ln(Componentes inaceptables) (izquierda), y Horas operación gas (derecha), alabe fijo de 1° etapa SI1. 105
Figura 3.28: Gráficos de dispersión datos alabe fijo de 2° etapa SI1. 109
Figura 3.29: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para la variable Ln(Componentes inaceptable) (derecha) y Horas operación gas (izquierda), alabe fijo de 2° etapa SI1. 110
Figura 3.30: Gráficos de dispersión de datos, alabe móvil de 1° etapa SI1. 114
Figura 3.31: Gráficos de dispersión datos alabe móvil de 2° etapa SI1. 115
Figura 3.32: Gráficos de dispersión datos alabe móvil de 3° etapa SI1. 117
Figura 3.33: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptable (izquierda), y Horas operación gas (derecha), alabe móvil de 3° etapa SI1. 118
Figura 3.34: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptable transformada (izquierda), y Horas operación gas transformada (derecha), alabe móvil de 3° etapa SI1. 119

Figura 3.35: Gráficos de dispersión datos alabe móvil de 4° etapa SI1. 125

Figura 3.36: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Componentes inaceptables (izquierda), y Cantidad partidas (derecha), alabe móvil de 4° etapa SI1. 126

Figura 3.37: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Horas operación petróleo (izquierda) y Cantidad trips (derecha), alabe móvil de 4° etapa SI1. 127

Figura 3.38: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Componentes inaceptables transformada (izquierda), y Horas operación petróleo transformada (derecha), alabe móvil de 4° etapa SI1. 128

Figura 3.39: Gráficos de dispersión datos ring segment de 1° etapa SI1. 132

Figura 3.40: Gráficos de dispersión datos ring segment de 2° etapa SI1. 133

Figura 3.41: Grafico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Componentes inaceptables (izquierda), y Horas operación petróleo (derecha), ring segment de 2° etapa SI1. 135

Figura 3.42: Gráficos de dispersión tobera piloto principal SI2. 136

Figura 3.43: Gráficos de dispersión tobera piloto gas SI2. 138

Figura 3.44: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para las variables Componentes inaceptables (izquierda) y Horas operación gas (derecha), tobera piloto gas SI2. 139

Figura 3.45: Gráficos de dispersión tobera piloto petróleo SI2. 143

Figura 3.46: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptables (izquierda) y Horas operación gas (derecha), tobera piloto petróleo SI2. 144

Figura 3.47: Gráficos de dispersión, cámara de combustión SI2. 145

Figura 3.48: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptables (izquierda) y Ln(Horas operación gas) (derecha), cámara de combustión SI2. 147

Figura 3.49: Gráficos de dispersión, pieza de transición SI2. 151

Figura 3.50: Gráficos de dispersión alabe fijo de 1° etapa SI2. 153

Figura 3.51: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptables (izquierda) y Cantidad partidas (derecha), alabe fijo de 1° etapa SI2. 154

Figura 3.52: Gráficos de dispersión, alabe fijo de 2° etapa SI2. 158

Figura 3.53: Gráficos de dispersión, alabe móvil de 1° etapa SI2. 159

Figura 3.54: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptables (izquierda) y Horas operación gas (derecha), alabe móvil de 1° etapa SI2. 161

Figura 3.55: Gráficos de dispersión, alabe móvil de 2° etapa SI2. 166

Figura 3.56: Gráficos de dispersión, ring segment de 1° etapa SI2. 167

Figura 3.57: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para variables Ln(componentes inaceptables) (izquierda) y Horas operación gas (derecha), ring segment de 1° etapa SI2. 168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Niveles de criticidad. 4
Tabla 1.2: Ejemplo tabla evaluación del impacto. 5
Tabla 1.3: Ejemplo tabla Funcionalidad-Modos de fallo-Causas. 7
Tabla 1.4: Transformaciones para conseguir linealidad. 29
Tabla 1.5: Resumen análisis de varianza para dos variables. 34
Tabla 1.6: Resumen análisis de varianza para *k* variables. 34
Tabla 3.1: Potencia instalada en turbinas a gas, central termoeléctrica San Isidro. [7] [8]..... 46
Tabla 3.2: Componentes expuestos a altas temperaturas en TG modelo M701F. 48
Tabla 3.3: Resumen inspección a turbina a gas M701F..... 57
Tabla 3.4: Recomendación orden de inspecciones 57
Tabla 3.5: Inspecciones realizadas a TG1. 58
Tabla 3.6: Inspecciones realizadas a TG2. 59
Tabla 3.7: Resumen dato sospechoso piloto combustible (gas, petróleo) SI1. 60
Tabla 3.8: Resumen dato sospechoso cámara de combustión SI1 61
Tabla 3.9: Resumen dato sospechoso pieza de transición SI1 62
Tabla 3.10: Resumen dato sospechoso alabe fijo de 2° etapa SI1 64
Tabla 3.11: Evaluación dato sospechoso alabe móvil de 3° etapa SI1 65
Tabla 3.12: Evaluación dato sospechoso alabe móvil de 4° etapa SI1. 66
Tabla 3.13: Resumen evaluación dato sospechoso tobera piloto gas SI2. 68
Tabla 3.14: Evaluación dato sospechoso cámara de combustión SI2. 70
Tabla 3.15: Evaluación dato sospechoso ring segment de 1° etapa SI2. 72
Tabla 3.16: Frecuencia porcentaje componentes inaceptables en 10.000 [eoh] SI1. 74
Tabla 3.17: Frecuencia porcentaje componentes inaceptables en 10.000 [eoh] SI2 74
Tabla 3.18: Impacto en componentes expuestos a altas temperaturas en TG, central termoeléctrica San Isidro. 76

Tabla 3.19: Criticidad componentes expuestos a altas temperaturas. 77

Tabla 3.20: Ordenes de criticidad para componentes expuestos a altas temperaturas. 78

Tabla 3.21: Niveles de criticidad piezas expuestas a altas temperaturas, San Isidro, Endesa. 79

Tabla 3.22: Componentes expuestos a altas temperaturas críticas y modos de fallo que producen inaceptabilidad, TG1 San Isidro 1. 84

Tabla 3.23: Componentes expuestos a altas temperaturas críticos y sus modos de fallo que producen inaceptabilidad, TG2 San Isidro II. 85

Tabla 3.24: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para cámara de combustión SI1. 86

Tabla 3.25: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para tobera piloto gas y tobera piloto petróleo SI1. 87

Tabla 3.26: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe fijo de 1° etapa SI1. 87

Tabla 3.27: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe móvil de 1° etapa SI1. 88

Tabla 3.28: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe fijo de 2° etapa SI1. 89

Tabla 3.29: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para camara de combustion SI2. 90

Tabla 3.30: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para tobera piloto petróleo SI2. 91

Tabla 3.31: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para pieza de transición SI2. 91

Tabla 3.32: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe fijo de 1° etapa SI2. 92

Tabla 3.33: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe móvil de 1° etapa SI2. 93

Tabla 3.34: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe móvil de 2° etapa SI2. 94

Tabla 3.35: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables Componentes inaceptables y variables operacionales, tobera piloto principal SI1. 95

Tabla 3.36: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, tobera piloto gas y tobera piloto petroleo SI1. 96

Tabla 3.37: Coeficiente de correlación de Pearson entre variables, cámara de combustión SI1. 97

Tabla 3.38: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, y variable Ln(Componentes inaceptables) y variables operacionales, pieza de transición SI1. 102

Tabla 3.39: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, y variable Ln(Componentes inaceptables) y variables operacionales, alabe fijo de 1° etapa SI1. 104

Tabla 3.40: Límites para intervalos de predicción de componentes inaceptables (con un nivel de significancia de 0,20), alabe fijo de 1° etapa SI1. 108

Tabla 3.41: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, y variable Ln(Componentes inaceptables) y variables operacionales, alabe fijo de 2° etapa SI1. 109

Tabla 3.42: Límites para intervalos de predicción de componentes inaceptables (con un nivel de significancia de 0,20), alabe fijo de 2° etapa SI1. 113

Tabla 3.43: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, alabe móvil de 1° etapa SI1. 114

Tabla 3.44: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, y variable Ln(Componentes inaceptables) y variables operacionales, alabe móvil de 2° etapa SI1..... 116

Tabla 3.45: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables independientes, alabe móvil de 3° etapa SI1. 117

Tabla 3.46: Coeficientes de correlación de Pearson para las variables transformadas y otras variables, alabe móvil de 3° etapa SI1. 120

Tabla 3.47: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,50), alabe móvil de 3° etapa SI1. 123

Tabla 3.48: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables independientes y variable dependiente Componentes inaceptables, alabe móvil de 4° etapa SI1. 125

Tabla 3.49: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables transformadas, alabe móvil de 4° etapa SI1. 129

Tabla 3.50: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,10), alabe móvil de 4° etapa SI1. 131

Tabla 3.51: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, ring segment de 1° etapa SI1. 132

Tabla 3.52: Coeficiente de correlación lineal de Pearson entre variables, ring segment de 2° etapa SI1. 134

Tabla 3.53: Coeficiente de correlación lineal de Pearson entre variables, tobera piloto principal SI2. 137

Tabla 3.54: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, tobera piloto gas SI2. 139

Tabla 3.55: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,10), tobera piloto gas SI2. 142

Tabla 3.56: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, tobera piloto petróleo SI2. 143

Tabla 3.57: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, cámara de combustión SI2. 146

Tabla 3.58: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,20), cámara de combustión SI2. 150

Tabla 3.59: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, pieza de transición SI2. 152

Tabla 3.60: Coeficientes de correlación lineal entre variables, alabe fijo de 1° etapa SI2. .. 153

Tabla 3.61: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,20), alabe fijo de 1° etapa SI2. 157

Tabla 3.62: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, alabe fijo de 2° etapa SI2. 158

Tabla 3.63: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, alabe móvil de 1° etapa SI2. 160

Tabla 3.64: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,20), alabe móvil de 1° etapa SI1. 165

Tabla 3.65: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables Componentes inaceptables y variables operacionales, alabe móvil de 2° etapa SI2. 166

Tabla 3.66: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables Componentes inaceptables y Ln(Componentes inaceptables) y variables operacionales, ring segment de 1° etapa SI2. 168

Tabla 3.67: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,20), ring segment de 1° etapa SI2. 171

Tabla 4.1: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, cámara de combustión. 177

Tabla 4.2: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, cámara de combustión. 178

Tabla 4.3: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, alabe fijo de 1° etapa. 179

Tabla 4.4: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, alabe fijo de 1° etapa. 179

Tabla 4.5: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, alabe móvil de 1° etapa. 180

Tabla 4.6: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, alabe móvil de 1° etapa. 180

Tabla 4.7: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, tobera piloto petróleo. 181

Tabla 4.8: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, tobera piloto gas SI1. 182

Tabla 4.9: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, alabe fijo de 2° etapa SI1. 182

Tabla 4.10: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, alabe fijo de 2° etapa SI1. 182

Tabla 4.11: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, pieza de transición SI2. 183

Tabla 4.12: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, pieza de transición SI2. 183

Tabla 4.13: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, alabe móvil de 2° etapa SI2. 184

Tabla 4.14: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, alabe móvil de 2° etapa SI2. 184

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1: Grafico que representa ausencia de errores o residuos (estándar) correlacionados en el orden de observación o tiempo. 23

Gráfico 3.1: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, alabe fijo de 1° etapa SI1. . 107

Gráfico 3.2: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, alabe fijo de 2° etapa SI1. . 112

Gráfico 3.3: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo obtenido, alabe móvil de 3° etapa SI1. 122

Gráfico 3.4: Residuos estándar v/s orden de observación, alabe móvil de 3° etapa SI1. 123

Gráfico 3.5: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, alabe móvil de 4° etapa SI1. 130

Gráfico 3.6: Probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptables, tobera piloto principal SI2. 137

Gráfico 3.7: Grafico de residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, tobera piloto gas SI2. 141

Gráfico 3.8: Orden de observación v/s residuos estándar, tobera piloto gas SI2. 141

Gráfico 3.9: Residuos v/s valor teórico o ajustado, cámara de combustión SI2. 149

Gráfico 3.10: Residuo estándar v/s orden de observación, cámara de combustión SI2. 150

Gráfico 3.11: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, alabe fijo de 1° etapa SI2. 155

Gráfico 3.12: Residuos estándar v/s orden de observación, alabe fijo de 1° etapa SI2. 156

Gráfico 3.13: Grafico de probabilidad normal para variable Ln(Horas operación gas), alabe móvil de 1° etapa SI2. 162

Gráfico 3.14: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, alabe móvil de 1° etapa SI2. 163

Gráfico 3.15: Grafico de residuos estándar v/s orden de observación, alabe móvil de 1° etapa SI2. 164

Gráfico 3.16: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, ring segment de 1° etapa SI2. 170
Gráfico 3.17: Gráfico de residuo estándar v/s orden de observación, ring segment de 1° etapa SI2. 171
Gráfico 4.1: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, cámara de combustión SI2.. 187
Gráfico 4.2: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, tobera piloto gas SI2. 188
Gráfico 4.3: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe fijo de 1° etapa SI1. ... 189
Gráfico 4.4: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe fijo de 1° etapa SI2. ... 190
Gráfico 4.5: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe fijo de 2° etapa SI1. ... 191
Gráfico 4.6: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe móvil de 1° etapa SI2. 192
Gráfico 4.7: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe móvil de 3° etapa SI1. 193
Gráfico 4.8: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe móvil de 4° etapa SI1. 194
Gráfico 4.9: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, ring segment de 1° etapa SI2. 195

INTRODUCCIÓN

Breve contexto y motivación del trabajo

El siguiente estudio se enmarca en la planificación del mantenimiento de los componentes expuestos a altas temperaturas, de dos turbinas a gas modelo M701F fabricadas por Mitsubishi, que se encuentran en la central termoeléctrica de ciclo combinado San Isidro (de ahora en adelante SI) de propiedad de la empresa de generación de energía Endesa, ubicada en las afueras de Quillota, V región, Chile.

La Central Termoeléctrica SI cuenta con dos unidades generadoras de ciclo combinado, por lo que existen dos turbinas a gas (TG): la primera unidad TG1 puesta en servicio en agosto del año 1998 y la segunda unidad TG2 en operación desde febrero del año 2007. La mantención de ambas turbinas está a cargo del fabricante Mitsubishi, establecido en un contrato a largo plazo denominado LTSA (Long Term Service Agreement), el cual establece las forma y condiciones, entre otros aspectos, de la mantención de las turbinas a gas.

En términos generales, el mantenimiento de ambas turbinas se realiza contabilizando la cantidad de una variable denominada *Horas equivalentes de operación* [eoh] (Equivalent Operation Hours), variable que intenta combinar y ponderar de una forma adecuada algunas variables operacionales, principalmente: horas de operación con gas, horas de operación con petróleo, cantidad de partidas/apagados y cantidad de trips. Luego, a cierto número de horas equivalentes de operación se ejecuta alguna inspección o intervención en la máquina. Es posible encontrar 3 tipos de mantención o inspección que se realizan en la turbina a gas:

- Inspección de Turbina IT
- Inspección de Combustión IC
- Inspección Mayor IM

Cada una de estas posee diferentes características, en donde la principal diferencia entre ellas es el tipo y cantidad de componentes que se inspeccionan e intervienen. Además cada inspección se realiza a intervalos de 8.000 [eoh], siguiendo el siguiente orden: IC- IT- IC- IT- IC- MM, así luego de 48.000 EOH se realiza una Inspección Mayor. El 2012 se realizó un aumento de las horas equivalentes de operación entre las diferentes inspecciones, alcanzando un valor de 12.000 [eoh].

Luego de cada inspección se pueden encontrar cierta cantidad de *componentes inaceptables* de los componentes que fueron inspeccionados. Debido a las condiciones operacionales, variables operacionales y mantención de la máquina, es posible encontrar poca o gran cantidad de componentes inaceptables. Estos componentes son reparados por el fabricante e introducidos nuevamente a la turbina en una nueva inspección, sin embargo si el fabricante advierte que la condición de estos denominados *componentes inaceptables* es irreparable, estos son clasificados como *scrap*, es decir, no pueden ser introducidos nuevamente a la turbina.

Planteamiento del problema

Debido a la externalización de la mantención de ambas turbinas a gas en la central termoeléctrica San Isidro, desarrolladas por el fabricante Mitsubishi, es que gran parte de la información para una adecuada inspección es reservada por el fabricante y por lo tanto desconocida por los ingenieros de la central, particularmente en el área de planificación de la mantención. Por lo que este estudio intenta conocer algunos aspectos fundamentales para la planificación de una inspección, usando como fuente de información los informes de mantención otorgados por el fabricante, y los datos históricos almacenados con el tiempo en la central. Así se desea conocer los principales modos de fallo, sus posibles causas, la relación entre cantidad de componentes inaceptables y las diferentes variables operacionales, entre otros para una mejor planificación y aplicación de las diferentes inspecciones a la turbina a gas modelo M701F.

Objetivo general y específicos

Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo de titulación es poder realizar un análisis técnico del plan de mantención recomendado por Mitsubishi, el cual es el fabricante de las turbinas a gas modelo M701F, estudiando la información histórica que la empresa posee de las turbinas y sus diferentes componentes, realizando un análisis estadístico para conocer el comportamiento de falla de la máquina y aportar indicaciones que optimicen el plan de mantenimiento existente.

Objetivos específicos

Para cumplir con el Objetivo General anteriormente descrito se deben abordar los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la situación actual de funcionamiento del mantenimiento de la turbina a gas, incluyendo diagrama de flujo del proceso; descripción general del equipo; descripción de los diferentes componentes.

- Analizar y depurar la calidad de la información histórica existente.

- Realizar un análisis de criticidad a los componentes expuestos a altas temperaturas en la turbina a gas.

- Determinar los modos de falla que afectan a los diferentes componentes críticos expuestos a altas temperaturas en la máquina, así como también determinar las posibles causas de estas fallas.

- Analizar cómo afectan las condiciones de operación en la vida útil de los componentes críticos, mediante la caracterización del estado de salida de cada componente crítico de la turbina.

Estructura de la memoria

El siguiente estudio se divide en cuatro capítulos: Marco teórico, Metodología, Resultados y Análisis de resultados.

El capítulo denominado Marco teórico sienta las bases para la realización del estudio, definiendo los principales conceptos de mantenimiento, modos de fallo, causas y efectos, y entregando las herramientas estadísticas para el adecuado análisis de la información histórica, desde consideraciones estadísticas generales, herramientas para la depuración de la información hasta la definición del Análisis multivariante, y en particular el *Análisis de regresión múltiple*, solida herramienta estadística para relacionar una variable dependiente con otras independientes.

El capítulo denominado Metodología define claramente las dirección, orden y forma en que las herramientas presentadas en el capítulo 1 serán aplicadas en el estudio. En un análisis estadístico como el desarrollado en este trabajo, es importante mantener la rigurosidad en los procedimientos de aplicación de las herramientas, para así obtener resultados representativos de la población de datos.

El capítulo denominado Resultados presenta los resultados de los diferentes análisis llevados a cabo gracias a las herramientas y metodologías presentadas en los capítulos anteriores. Se presentan las descripciones generales de la máquina y los componentes expuestos a altas

temperaturas, así como también las principales características del funcionamiento actual de su mantenimiento. Se presentan el resultado del análisis y depuración de la información histórica existente, paso clave para obtener resultados acordes a la realidad y no sesgados por datos atípicos o irregulares. Así mismo, se presenta los resultados del análisis de criticidad, causas, modos de fallo y efectos, y análisis de regresión múltiple a los diferentes componentes realizados con la ayuda del programa estadístico Minitab [1].

Finalmente, el capítulo denominado Análisis de resultados presenta las conclusiones generales y particulares que se pueden obtener de los resultados entregados en el capítulo anterior. Para facilitar la comprensión de este capítulo se realiza un análisis de resultados por cada objetivo presentado en la sección *Objetivos general y específicos*.

DESARROLLO DEL ESTUDIO

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Políticas de mantenimiento

Las políticas de mantenimiento definen el conjunto de estrategias que aseguran la continuidad operacional a mínimos costos globales, considerando los propios costos de mantenimiento, ineficiencia, capital fijo y de trabajo asociados. Un buen mantenimiento tiene como objetivo prevenir las fallas, de modo que se reduzcan las detenciones imprevistas en los equipos. El mantenimiento industrial ha ido evolucionando en el tiempo, desde una mantención correctiva, es decir a la falla, a una mantención preventiva y mejora continua como se puede observar en la siguiente Figura 1.1:

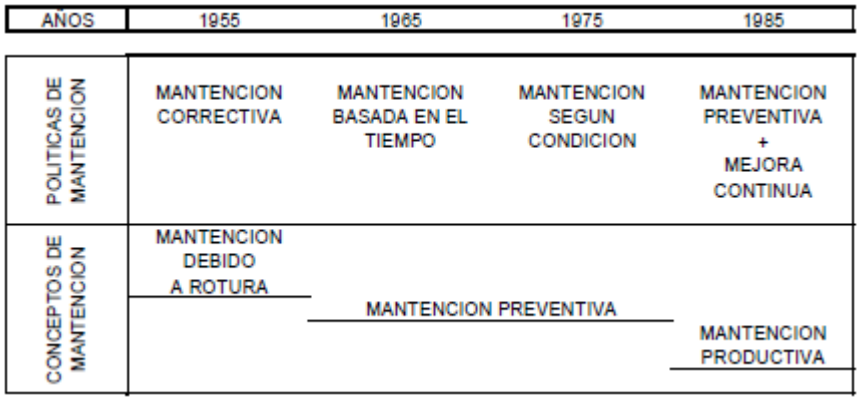


Figura 1.1: Evolución mantenimiento industrial. [2]

Como se observa en la Figura 1.1 existen diferentes estrategias de mantención que pueden ser aplicadas a los procesos industriales. Las diferentes estrategias de mantenciones son:

- Correctivas: es la sustitución de algún elemento que ha fallado.

- No planificado: es una mantención de emergencia producida por una avería imprevista o condición imperativa a satisfacer.

- Planificado: es una mantención de emergencia pero en la cual se sabe qué hacer, se cuentan con las piezas y recursos suficientes para realizar la adecuada mantención.

- Preventivas: es la sustitución de elementos antes de que estos fallen.

  - Edad constante: mantención periódica, basada en el tiempo. Este tipo de mantención se basa en la confiabilidad de los equipos, en el tiempo medio entre fallas (MTBF, por sus siglas en ingles), sin considerar las peculiaridades de una instalación dada.

  - Según condición: se realiza la mantención cuando indicadores muestran que el equipo va a fallar o su desempeño en tiempo real se está deteriorando.

  - Predictiva: en este tipo de mantención se pronostica el punto futuro de la falla para que el componente pueda reemplazarse antes del fallo a través de variables y modelos.

- Mejorativas: modificaciones a los equipos para simplificar o eliminar operaciones de mantenimiento.

- Productivas: es una estrategia de mantención en la cual se unen dos tipos de estrategias, preventivas y mejorativas.

La elección de la estrategia de mantenimiento queda determinada por tres criterios básicos:

1) La factibilidad técnica de la inspección.

2) La criticidad de la falla (relación entre frecuencia e impacto).
3) La relación entre tasa de falla y los costos:
    - Costo global de la intervención a la falla
    - Costo global de la intervención preventiva
    - Costo particular de la inspección

1.2 Definición modelo de criticidad: Análisis de Criticidad AC

El Análisis de Criticidad, de ahora en adelante AC, es una metodología que permite establecer jerarquías entre instalaciones, sistemas, equipos y elementos de un equipo. Se utilizan dos variables para cuantificar la criticidad (C) de un equipo o pieza: frecuencia de falla e impacto de la falla.

- Frecuencia (F): es la evaluación de la probabilidad de que la falla ocurra, basada en el número de eventos en un periodo determinado.
- Impacto (I): evaluación de la gravedad de la ocurrencia de una falla, las cuales pueden tener diversos tipos de impacto; seguridad, medio ambiente, perdidas en producción, costos en reparación.

Luego de evaluar y obtener ambas variables, se procede al cálculo de la criticidad de cada pieza como el producto entre ambas variables:

$$C = F \text{ x } I \qquad (1.1)$$

Se pueden usar dos enfoques para obtener la criticidad: cualitativo o cuantitativo. El enfoque a elegir depende de la información existente y disponible; si no se cuentan con datos de la tasa de falla se utiliza el enfoque cualitativo, luego si se dispone de datos específicos de modos de falla y probabilidad de ocurrencia, se utiliza el enfoque cuantitativo.

Este análisis arroja los Niveles de criticidad tal como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Niveles de criticidad.

Nivel	Criticidad
1	Alta
2	Media
3	Baja

1.2.1 Frecuencia

Para obtener la frecuencia de falla de forma cualitativa se estudia la cantidad de componentes que fallan o componentes inaceptables en un intervalo de tiempo determinado, luego se promedian estos valores individuales para obtener un valor de frecuencia de falla, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F = \frac{(CF_1/C_T) * 100/t_1 + (CF_2/C_T) * 100/t_2 + \cdots + (CF_n/C_T) * 100/t_n}{n} \qquad (1.2)$$

Donde CF_n son los componentes que fallan o inaceptables en el intervalo de tiempo n; C_T son los componentes totales; y t_n es el tiempo del intervalo n, que puede ser expresado en horas o alguna medida equivalente.

1.2.2 Impacto

Para obtener el impacto o gravedad de la ocurrencia de una falla se evalúan varios posibles impactos que algún modo de falla podría ocasionar, los más comunes son los siguientes:

- Impacto en seguridad

- Impacto en el medio ambiente
- Impacto en pérdidas de producción
- Impacto en costos de reparación

Para cuantificar el impacto generado por la falla de un equipo se construyen tablas con ayuda de profesionales con conocimiento y experiencia en el tema. Los impactos se evalúan de forma cualitativa. Un ejemplo de una tabla de evaluación de impactos es la siguiente Tabla 1.2:

Tabla 1.2: Ejemplo tabla evaluación del impacto.

Puntaje	**Impacto en seguridad**	**Impacto en el medio ambiente**	**Impacto en pérdidas de producción**	**Impacto en costos de reparación**
3	Alto	Alto	Alto	Alto
2	Medio	Medio	Medio	Medio
1	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

Así mismo, con ayuda de profesionales con conocimiento y experiencia en el tema, se evalúa el impacto de cada equipo o pieza, siendo el impacto total la suma de cada impacto evaluado:

$$I = IS + IMA + IPP + ICR \qquad (1.3)$$

Donde, I: Impacto, IS: Impacto en seguridad, IMA: Impacto en el medio ambiente, IPP: Impacto en pérdidas de producción, ICR: Impacto en costos de reparación.

1.3 Modos de fallo, causas y efectos

Modo de fallo

Un modo de fallo significa que un elemento o sistema no satisface o no funciona de acuerdo con la especificación, o simplemente no se obtiene lo que se espera de él. El fallo es una desviación o defecto de una función o especificación. Con esa definición, un fallo puede no ser inmediatamente detectable por el cliente y sin embargo hemos de considerarlo como tal. [3]

Efecto/s del fallo

Los efectos corresponden a los síntomas. Generalmente hacen referencia al rendimiento o prestaciones del sistema. Cuando se analiza una parte o componente se tendrá también en cuenta la repercusión en todo el sistema, lo que ofrecerá una descripción más clara del efecto. Si un modo de fallo tiene muchos efectos, a la hora de evaluar, se elegirá el más grave. Entre los efectos típicos de fallo podrían citarse los siguientes:

- Diseño: ruido, acabado basto, inoperante, olor desagradable, inestable, etc.
- Proceso: no puede sujetarse, no puede alinearse, no puede perforarse, no se puede montar, etc.

Para la obtención de los efectos se utiliza mucho el "diagrama causa-consecuencia" entendiendo por consecuencia el efecto. [3]

Causa del fallo

Causas potenciales del fallo atribuibles a cada modo de fallo. La causa potencial del fallo se define como indicio de una debilidad del diseño o proceso cuya consecuencia es el modo de fallo. Las causas relacionadas deben ser lo más concisas y completas posibles, de modo que las acciones correctoras y/o preventivas puedan ser orientadas hacia las causas pertinentes. Entre las causas típicas de fallo podrían citarse las siguientes:

- En diseño: porosidad, uso de material incorrecto, sobrecarga, etc.
- En proceso: daño de manipulación, utillaje incorrecto, sujeción, amarre, etc. [3]

La siguiente Figura 1.2 resume lo anterior, en donde se observa la cadena que produce una falla, primero se tiene la causa del fallo, que es la que produce el fallo propiamente tal o modo de fallo, y luego de ocurrido esto se tienen los síntomas observables y/o medibles (efectos del fallo).

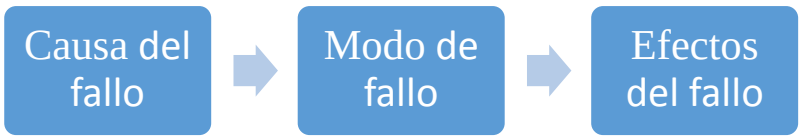


Figura 1.2: Relación causa, modo y efecto del fallo.

1.3.1 Tabla Funcionalidad-Modos de fallo-Causas

Los conceptos causas del fallo y modos de fallo se pueden resumir para su mejor comprensión una tabla que llamaremos *Funcionalidad-Modos de falla- Causas*, la cual se presenta en la siguiente Tabla 1.3:

Tabla 1.3: Ejemplo tabla Funcionalidad-Modos de fallo-Causas.

Funcionalidad	**Modos de falla**	**Causas**
Función principal del componente analizado	Modo de falla 1	Causa 1 del modo de fallo 1
		Causa 2 del modo de fallo 1
		Causa n del modo de fallo 1
	…	
	Modo de falla n	Causa 1 del modo de fallo n
		Causa 2 del modo de fallo n
		Causa n del modo de fallo n

1.4 Consideraciones estadísticas

1.4.1 Pruebas de hipótesis y nivel de significancia α

Las pruebas de hipótesis son usadas para evaluar si una observación o hallazgo es lo bastante cercana a un valor hipotético propuesto, de forma que no se rechace la hipótesis planteada. La hipótesis planteada se llama *hipótesis nula* (H_0), la cual suele probarse frente a otra hipótesis llamada *hipótesis alternativa* (H_1). Para decidir si se rechaza o no la hipótesis nula existe un método que permite crear reglas para esta decisión: la *prueba de significancia*.

En la decisión de rechazar o no la hipótesis nula es posible cometer dos tipos de errores:

- Error tipo I: rechaza la hipótesis nula cuando es en realidad verdadera, la probabilidad de este tipo de error se denomina nivel de significancia α, y se fija en 1%, 5% o máximo 10% generalmente.
- Error tipo II: acepta la hipótesis nula cuando en realidad es falsa, la probabilidad de este tipo de error se representa por β.

Cuando de rechaza la hipótesis nula se dice que el hallazgo es estadísticamente significativo para un nivel de significancia α el cual es elegido por el investigador, y cuando no se rechaza se dice que el resultado no es estadísticamente significativo. [4]

1.4.2 Pruebas de significancia

Para aceptar o rechazar una hipótesis nula se utilizan las pruebas de significancia que consisten en utilizar la información muestral con el fin de obtener un *estadístico de prueba*, del cual se conoce su distribución de probabilidades, o se determina. Así eligiendo un nivel de significancia α, sabiendo la distribución del estadístico, se puede obtener un valor crítico

de este estadístico comparando este valor con el valor calculado del estadístico de prueba y si este último está por debajo del valor crítico se rechaza la hipótesis nula. [4]

Entre los estadísticos más usuales están las pruebas F y t.

1.4.3 Valor p o nivel exacto de significancia

Para evitar seleccionar un nivel de significancia fijo α, como 1%, 5% o 10% se puede obtener el valor p o nivel exacto de significancia de un estadístico de prueba. El cual se define como el nivel de significancia más bajo al cual puede rechazarse la hipótesis nula planteada. Es decir, la probabilidad más baja de equivocarse al rechazar una hipótesis nula. [4]

1.5 Análisis y depuración de la calidad de información histórica existente

Este análisis se centra principalmente en dos aspectos: homogeneizar los datos del tipo de componentes y aislar datos atípicos.

Cuando se habla de homogeneizar los datos del tipo de componente se hace referencia a que todos los componentes que se analicen deben compartir las mismas características de diseño, para así asegurar un análisis lo más real posible. Es bien sabido que en grandes industrias la mejora continua en mantención y operación es un requisito fundamental, por lo que nuevos componentes pueden recibir mejoras que cambien sus características de diseño que las diferencie de los otros componentes que antes habían operado en la máquina, haciendo que estos nuevos componentes sean por ejemplo más resistentes en las mismas condiciones de operación que antiguos componentes. Entonces es importante poder identificar y dar un tratamiento adecuado a las mejoras que se puedan dar en los componentes, para que el análisis sea lo más representativo posible y no aportar con errores a los resultados finales que son fácilmente evitables.

Para detectar datos atípicos y dar un tratamiento adecuado a estos se usara la norma ASTM E178-08, *Práctica estándar para el tratamiento de observaciones atípicas*.

1.5.1 Datos atípicos

Un dato atípico es una observación que parece desviarse notablemente en valor en comparación con otros valores de observaciones que aparecen en la muestra. Un ejemplo de lo anterior se observa en la siguiente Figura 1.3, donde el dato atípico es el valor extremo a la derecha:

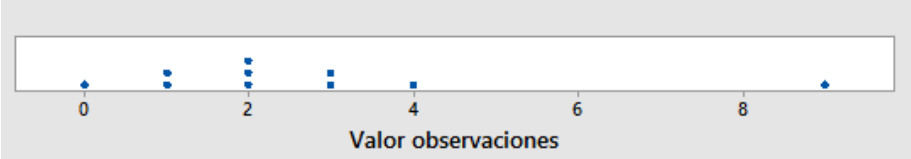


Figura 1.3: Ejemplo dato atípico.

Sin embargo los datos atípicos pueden ubicarse en el extremo derecho, izquierdo o en ambos, y estos pueden ser solo un dato, dos o más.

Se describen en los siguientes apartados pruebas estadísticas para identificar datos atípicos, sin embargo estas pruebas son usadas como soporte a una razón física existente que produzca que un dato sea atípico, o bien la prueba estadística puede ser utilizado para iniciar la acción de encontrar una causa física del por qué un dato es atípico.

Por otro lado, cabe destacar que los criterios estadísticos aquí descritos se basan en muestran que siguen una distribución normal. [5]

1.5.2 Prueba estadístico T

Es una prueba para identificar datos individuales sospechosos como atípicos, tanto en el extremo izquierdo o derecho de la distribución de datos. Sea una muestra de N datos u observaciones X, ordenadas como sigue: $X_1 \leq X_2 \leq X_3 \leq \cdots \leq X_n$, donde X_n es el dato sospechoso, que en ese caso es el dato más grande. El criterio recomendado para un valor atípico único es el siguiente [5]:

$$T_n = \frac{X - \bar{X}}{s} \qquad (1.4)$$

Donde $\bar{X}$ es el promedio aritmético de los n datos; s es una estimación de la desviación estándar de la población basada en los datos de la muestra, calculado de la siguiente forma:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \qquad (1.5)$$

Ahora bien, si X_1 es el valor sospechoso, es decir el valor menor dentro de la muestra, el criterio es el siguiente:

$$T_1 = \frac{\bar{X} - X_1}{s} \qquad (1.6)$$

Los valores críticos para ambos casos, para un nivel de significancia de 1% y 5% se dan en anexo A-1, esta tabla y las que se usan en la norma dan niveles de significancia de un único lado de la distribución. La hipótesis que intentamos probar en todos los casos es que las observaciones provienen de la misma población normal. [5]

1.5.3 Prueba de Dixon

Un criterio alternativo al anterior es el criterio de Dixon, el cual está basado en ratios de las diferencias entre las observaciones y puede usarse en los casos en que se desea evitar el cálculo de la estimación de la desviación estándar de población (s). Para esta prueba, el criterio o estadístico de la muestra cambia con el tamaño de ésta. En anexo A-2 provee los estadísticos a calcular según el tamaño de la muestra y los valores críticos para 1%, 5% y 10% de nivel de significancia.

Puede dase en algunos casos límites que mediante un test se acepte un dato como atípico, y con otro test se rechace el dato como atípico, por ejemplo el test de Dixon rechace un dato como atípico, y la prueba T-estadístico acepte el mismo dato como atípico, en estos casos el T-estadístico es el mejor para los casos de análisis de datos individuales. [5]

1.6 Análisis multivariante

El análisis multivariante es un conjunto de técnicas de análisis de datos que permite relacionar variables dependientes o de respuesta, con variables independientes o predictoras, estos datos pueden ser de dos tipos: no métricos (cualitativos) y métricos (cuantitativos). Este tipo de análisis permite examinar dependencia entre variables o interdependencia, en este estudio nos centraremos en las técnicas que examinan dependencia. El número de variables estudiadas le otorga el adjetivo de multivariante, ya que se estudia la relación de un o más variables dependientes en relación a dos o más variables independientes. Existen diferentes técnicas para realizar lo anterior:

- Regresión múltiple: es el método adecuado cuando el problema del investigador incluye una única variable métrica dependiente que se supone está relacionada con una o más variables métricas, o no métricas, independientes. El objetivo del análisis de la regresión múltiple es predecir los cambios en la variable dependiente en respuesta a cambios en varias de las variables independientes.

$$Y_1 = X_1 + X_2 + \cdots + X_n \qquad (1.6)$$

- Análisis discriminante múltiple: Si la única variable dependiente es dicotómica (dos niveles de respuesta) o mutidicotómica (3 o más niveles de respuesta) y por tanto no métrica, la técnica multivariante apropiada es un análisis discriminante múltiple. Como en la regresión múltiple, las variables independientes se supone que son métricas. Los objetivos primarios del análisis discriminante múltiple son entender las diferencias de grupos y predecir la verosimilitud de que una entidad (persona u objeto) pertenezca a una clase o grupo particular basándose en varias variables métricas independientes.

$$Y_1 = X_1 + X_2 + \cdots + X_n \qquad (1.7)$$

- Análisis multivariante de la varianza y covarianza: es una técnica estadística que puede ser usada simultáneamente para explorar las relaciones entre diversas categorías de variables independientes, es decir variables no métricas, y dos o más variables métricas dependientes. Es útil cuando se diseña una situación experimental (manipulación de varias variables de tratamientos no métricas) para comprobar hipótesis concernientes a la varianza de respuestas de grupos sobre dos o más variables métricas dependientes.

$$Y_1 + Y_2 + \cdots + Y_n = X_1 + X_2 + \cdots + X_n \qquad (1.8)$$

- Análisis conjunto: es una técnica de dependencia emergente que ha introducido una nueva sofisticación en la evaluación de objetos, sean nuevo productos, servicios o ideas. Relaciona una variable dependiente, la cual puede ser métrica o no, con variables independientes no métricas.

$$Y_1 = X_1 + X_2 + \cdots + X_n \qquad (1.9)$$

- Correlación canónica: el análisis de correlación canónica puede verse como una extensión lógica de un análisis de regresión múltiple, el cual implica una única variable dependiente métrica y varias variables métricas independientes. Con el análisis canónico el objetivo es correlacionar simultáneamente varias variables dependientes métricas y varias variables métricas independientes.

$$Y_1 + Y_2 + \cdots + Y_n = X_1 + X_2 + \cdots + X_n \qquad (1.10)$$

- Modelos de probabilidad lineal: consisten en una combinación de regresión múltiple y análisis discriminante múltiple. Esta técnica es similar al análisis de regresión múltiple en que una o más variables independientes métricas se usan para predecir una única variable dependiente. Lo que distingue a este modelo es que la variable dependiente es no métrica, como en el análisis discriminante.

$$Y_1 = X_1 + X_2 + \cdots + X_n \qquad (1.11)$$

- Modelos de ecuaciones estructurales: es una técnica que permite separar las relaciones para cada conjunto de variables dependientes. Se caracteriza por dos componentes básicos: (1) el modelo estructural y (2) el modelo de medida. El modelo estructural es el modelo "guía", que relaciona variables independientes y variables dependientes. El modelo de medida permite usar varias variables para una única variable dependiente o independiente.

En el anexo A-3 se muestra un diagrama de flujo para poder elegir la técnica multivariante que se deba usar según sea el número de variables dependientes o independientes, y si estas son métricas o no métricas. [6]

1.7 Análisis de regresión múltiple

El análisis de regresión múltiple es una técnica estadística que se utiliza para analizar la relación entre una única variable dependiente (respuesta) y una o más variables independientes (predictoras), en donde todas las variables son métricas, es decir datos cuantitativos que pueden ser cantidades discretas o continuas. Lo que se desea es estimar una *función de regresión poblacional*, que sea representativa para toda la población de datos, lo que se logra mediante una *función de regresión muestral*. La forma de la una *función de regresión poblacional* es la siguiente:

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \cdots + \beta_k X_{ki} + u_i \qquad (1.12)$$

En donde Y es la variable dependiente de respuesta, representada en el modelo por Y_i que es el valor representativo de la población de datos de la variable dependiente de respuesta, relacionada con las diferentes variables independientes predictoras X_k, representadas en el modelo por los valores de las variables X_{ki}; β_k son los coeficientes de correlación que ponderan cada variable independiente; además se observa un término de error o residuo u_i, que es la desviación de Y_i alrededor de su valor esperado o media.

Por otro lado, la *función de regresión muestral* se obtiene estimando los diferentes términos de la ecuación (1.12) usando los datos de la muestra disponible, esta función tiene la siguiente forma:

$$Y_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_{2i} + \hat{\beta}_3 x_{3i} + \cdots + \hat{\beta}_k x_{ki} + \hat{u}_i \quad (1.13)$$

En donde el énfasis "gorro" en las variables denota que es un estimador. Los que son obtenidos (o estimados) por un procedimiento matemático conocido como *mínimos cuadrados*. Cabe señalar, que un estimador, conocido también como estadístico (muestral) es

solo una formula, regla o método para estimar el parámetro poblacional a partir de información suministrada por la muestra disponible.

Existe el caso que para predecir la variable dependiente solo es usada una variable predictora independiente, en ese caso el análisis es denominado regresión simple, y es una caso particular de la regresión múltiple.

En el análisis de regresión múltiple interesa la dependencia estadística entre variables, no asi la relación funcional o determinista, propia de la física clásica, es decir interesan variables con distribuciones de probabilidad.

Así, para resumir, concluimos que el objetivo principal del análisis de regresión múltiple es estimar una *función de regresión poblacional*, de la forma de la ecuación (1.12), mediante una *función de regresión muestral*, de la forma de la ecuación (1.13), en donde esta última es solo una aproximación en el mejor de los casos. [4]

1.7.1 Supuestos del análisis de regresión múltiple

Para realizar un análisis de regresión múltiple, o cualquier análisis multivariante, es necesario verificar algunos supuestos que se deben cumplir en los datos a analizar, estos supuestos son los siguientes:

- Linealidad: supuesto implícito de todas las técnicas multivariantes basadas en medidas de correlación. Es importante destacar que el supuesto es para los coeficientes de correlación y la variable dependiente, y no entre la variable dependiente y las independientes, por lo que al presentarse relaciones no lineales entre las variables, estas relaciones se pueden linealizar con algunas transformaciones conocidas.

- Normalidad: un supuesto fundamental de todo análisis multivariante es la normalidad de los datos, es decir que estos sigan una distribución normal. Este supuesto es importante entre otras cosas porque permite usar estadísticos que requieren normalidad en los datos para su utilización. Este supuesto debe ser aplicado a todas las variables, sean estas dependientes o independientes.

- Homocedasticidad: se refiere a que las variables dependientes deben tener igual nivel o dispersión de varianza a lo largo del rango del predictor de la variable. Este supuesto es requerido ya que la varianza de la variable dependiente no debería concentrarse solo en un limitado rango de los valores independientes.

- Ausencia de errores correlacionados: cuando se realiza un análisis multivariante se desea que cualquiera de los errores de predicción no este correlacionado con el resto, por ejemplo si encontramos que los errores son positivos y negativos alternadamente, se podría suponer que hay alguna relación no explicada de la variable dependiente, es decir que existe otro factor que está afectando los resultados pero no está siendo incluido en los análisis. [4]

En las siguientes secciones se definirán estadísticos y métodos para evaluar los supuestos antes nombrados.

1.7.1.1 Coeficiente de correlación lineal de Pearson

Es una cuantificación de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas, es decir es útil en nuestro análisis para evaluar linealidad. Se obtiene de la siguiente forma:

$$r = \frac{n\sum_{i=1}^{n} X_i Y_i - \sum_{i=1}^{n} X_i \sum_{i=1}^{n} Y_i}{\sqrt{n\sum_{i=1}^{n} X_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} X_i)^2}\sqrt{n\sum_{i=1}^{n} Y_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} Y_i)^2}} \qquad (1.14)$$

Donde n es el número de datos totales de la muestra, X_i son los datos muestrales de la variable independiente e Y_i son los datos muestrales de la variable dependiente, en donde se desea cuantificar la relación entre ambas variables. Los valores de r se interpretan de la siguiente forma:

- Si $r = 1$ existe correlación lineal positiva perfecta.
- Si $0 < r < 1$ existe algún grado de correlación lineal positiva.
- Si $r = 0$ no existe relación lineal.
- Si $-1 < r < 0$ existe algún grado de correlación lineal negativa.
- Si $r = -1$ existe correlación lineal negativa perfecta.

Además de lo anterior, se puede obtener el nivel de significancia de los valores de r, es decir si tal valor obtenido muestra que las variables están relacionadas en realidad o solo muestran dicha relación como consecuencia del azar. Un coeficiente de correlación se dice que es significativo si se puede afirmar con cierta probabilidad que es diferente de cero, por lo que tendremos dos hipótesis posibles:

- $H_0: r = 0$. El coeficiente de correlación obtenido proviene de una población donde la correlación lineal es cero.
- $H_1: r = 0$. El coeficiente de correlación obtenido procede de una población donde la correlación lineal es distinta de cero.

Luego, si se obtiene un nivel exacto de significancia, valor p, menor al nivel de significancia elegido, generalmente 0,05 (5%), se rechaza la hipótesis nula, por lo que existe correlación lineal entre las variables. [4]

1.7.1.2 Prueba de Anderson-Darling (AD)

Es una prueba para evaluar si los datos se acercan a algún tipo de distribución, en nuestro caso será usada para evaluar normalidad. Este estadístico se obtiene de la siguiente forma:

$$A^2 = -n - S \qquad (1.15)$$

Donde,

$$S = \sum_{i=1}^{n} \frac{2i-1}{n} \left[\ln\left(F(Y_i)\right) + \ln(1 - F(Y_{n+1-i}))\right] \qquad (1.16)$$

Donde, F es la función de distribución acumulada, en este caso distribución normal; n es el tamaño de la muestra; e Y_i son los datos que se desean evaluar si siguen una distribución elegida.

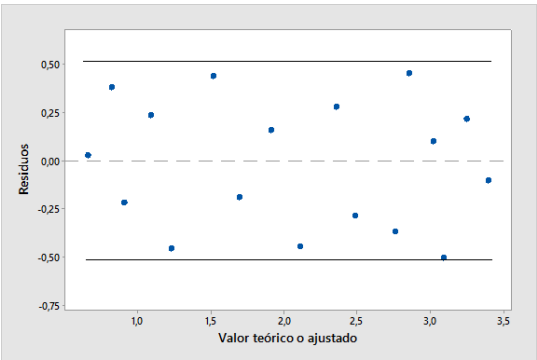
Luego para evaluar si los datos siguen respectivamente la distribución elegida se realiza una prueba de hipótesis y se obtiene el valor p, las hipótesis correspondientes son las siguientes:

- H_0: los datos coinciden con la distribución elegida.
- H_1: los datos no coinciden con la distribución elegida.

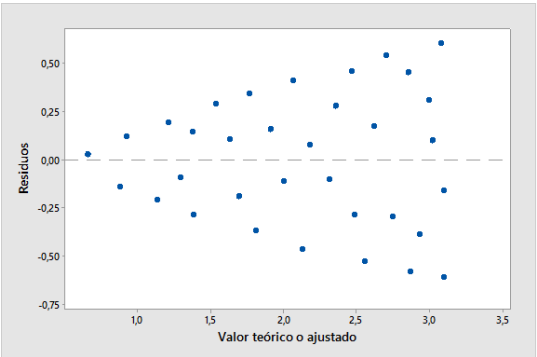
Si el valor p es mayor a un nivel de significación elegida, obtenido luego de comparar el estadístico A con la distribución especificada, se aprueba la hipótesis nula, y en caso contrario se acepta la hipótesis alternativa. [4]

1.7.1.3 Evaluación homocedasticidad

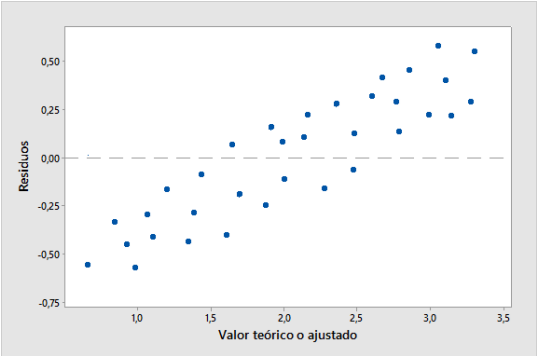
Para evaluar la constancia en la varianza se puede optar por un modo grafico analizando los residuos entre los valores reales y teóricos. En un primera instancia se considera que los datos cumplen el supuesto de homocedasticidad, se realiza el análisis de regresión múltiple, luego se procede a graficar los residuos, la diferencia entre el valor teórico obtenido mediante la regresión y el valor real, versus el valor teórico obtenido a partir del modelo de regresión, y se analiza la forma o patrón que tiene este gráfico. El patrón debería ser como se muestra en el grafico (a) de la Figura 1.4, en donde los puntos son aleatorios y no presentan ningún patrón observable, no así como en los gráficos (b), (c) y (d), los cuales presentan patrones identificables. [6]

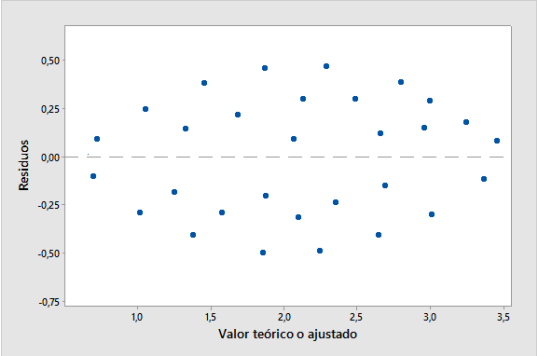


(a)



(b)





(c) (d)

Figura 1.4: Gráficos residuos v/s valor teórico del modelo obtenido.

1.7.1.4 Evaluación de ausencia de errores correlacionados: Prueba *d* de Durbin-Watson y método grafico

Para evaluar el supuesto de ausencia de errores correlacionados usaremos dos métodos: la prueba *d* de Durbin-Watson y el método gráfico, en donde ambos usan los errores o residuos del modelo obtenido para verificar el supuesto, es decir se supone a priori antes de obtener el modelo que este supuesto se cumple.

La prueba *d* de Durbin-Watson se define por el siguiente estadístico:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^{n}(\hat{u}_i - \hat{u}_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^{n}\hat{u}_i^2} \qquad (1.17)$$

En donde $\hat{u}_t$ son los diferentes residuos, es decir la diferencia entre el valor teórico del modelo y el valor real $(\hat{u}_i = Y_i - \hat{Y}_i)$. Para aplicar este estadístico se deben tener en consideración algunas condiciones tales como incluir en el modelo el término del intercepto (coeficiente β_1), si este término no está presente es necesario incluirlo y realizar nuevamente el modelo para obtener el estadístico Durbin-Watson. Otra condición es la de cumplir con el supuesto de normalidad (distribución) de los términos de error o residuos.

Una vez obtenido el estadístico d, se puede realizar una prueba de hipótesis buscando la significancia estadística de esta. La hipótesis nula se establece como H_0: ausencia de errores correlacionados, luego el valor calculado se compara con la tabla *Estadístico d de Durbin-Watson para una significancia de 0,05* (provista en el anexo A-4), la tabla arroja dos valores límites d_L y d_U, los cuales establecen los límites para aceptar o rechazar la hipótesis nula según los siguientes intervalos para el estadístico d:

$$0 < d < d_L \qquad \Rightarrow rechazar\ H_0$$

$$d_L < d < d_U \qquad \Rightarrow\ zona\ de\ indecisión$$

$$d_U < d < 4 - d_U \quad \Rightarrow \qquad Aceptar\ H_0$$

$$4 - d_U < d < 4 - d_L \quad \Rightarrow zona\ de\ indecisión$$

$$4 - d_L < d < 4 \qquad \Rightarrow zona\ de\ indecisión$$

Se observa en los intervalos anteriores zonas de indecisión, para estas zonas no hay una respuesta clara por lo que se evalúa de forma gráfica.

Al igual que para evaluar la homocedasticidad, evaluar la ausencia de errores correlacionados se puede hacer de manera gráfica. Luego de obtener el modelo se grafican los residuos versus el orden de observación o el tiempo, estos residuos pueden ser estandarizados que son los residuos ($\hat{u}_i$) divididos el error estándar de la regresión ($\sqrt{\hat{\sigma}^2}$) es decir $\hat{u}_i/\hat{\sigma}$, la ventaja de obtener este tipo de residuos es que son numero puros desprovistos de unidades de medición, por lo tanto son comparables con los residuos estandarizados de otras regresiones. Por recomendación bibliográfica se usaran este tipo de residuos para evaluar de forma gráfica el supuesto de ausencia de errores o residuos correlacionados. Al obtener estos gráficos se esperan resultados como el del Gráfico 1.1, en donde los residuos no siguen ningún patrón visible en el orden de observación o tiempo, como si ocurre en los resultados de la Figura 1.5. [4] [6]

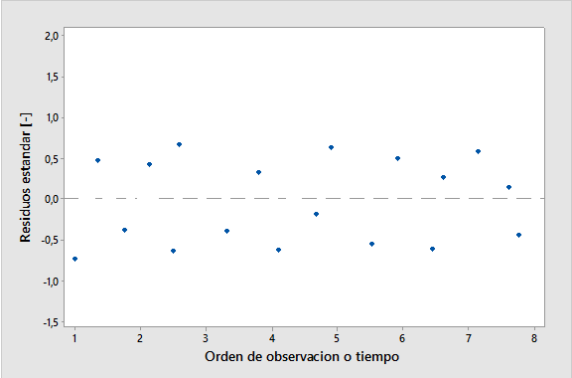
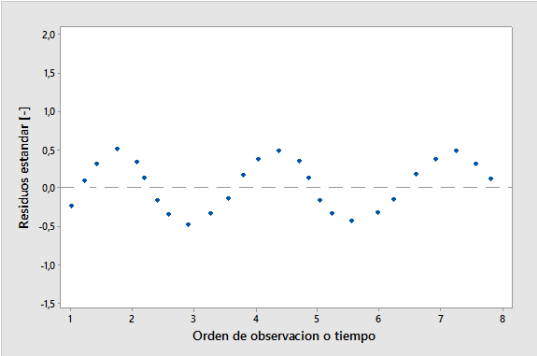
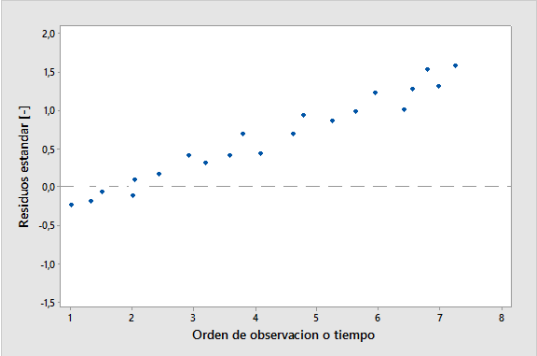


Gráfico 1.1: Grafico que representa ausencia de errores o residuos (estándar) correlacionados en el orden de observación o tiempo.


Residuos estandar [-]
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
1
2
3
4
5
6
7
8
Orden de observacion o tiempo


Residuos estandar [-]
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
1
2
3
4
5
6
7
8
Orden de observacion o tiempo

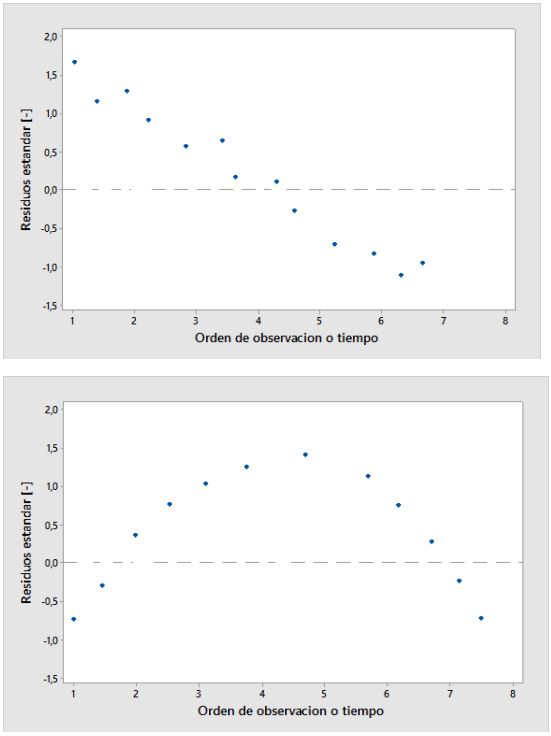


Figura 1.5: Gráficos con patrones comunes que representan presencia de errores correlacionados.

1.7.1.5 Transformaciones cuando no se cumplen los supuestos

Existen casos donde los supuestos para el análisis de regresión múltiple no se cumplen a cabalidad. Para estos casos existen algunas soluciones que consisten en transformaciones de los datos para poder cumplir los supuestos.

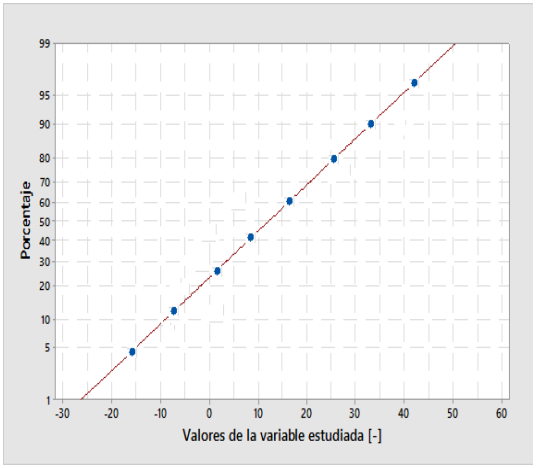
- Transformaciones de los datos para conseguir normalidad y homocedasticidad

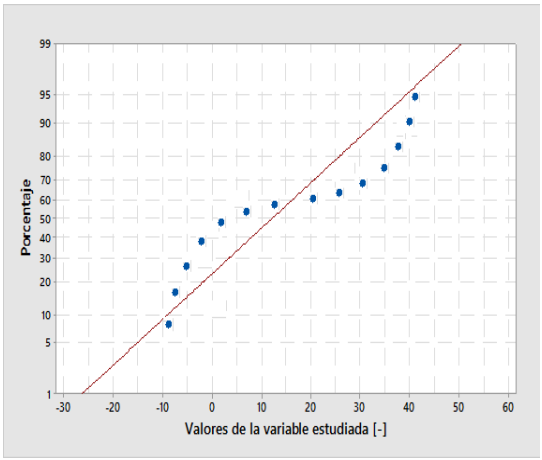
Cuando no se cumple normalidad en los datos es debido principalmente a dos razones: distribuciones planas o distribuciones asimétricas de los datos.

Para las distribuciones planas las transformaciones más comunes son la inversa, es decir:

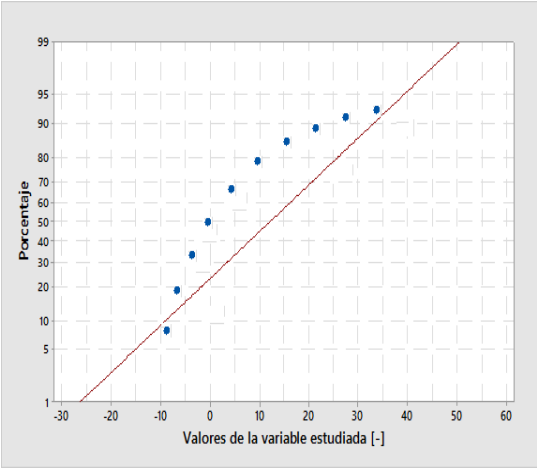
$$z = \frac{1}{X} \qquad \text{ó} \qquad Z = \frac{1}{Y} \qquad (1.18)$$

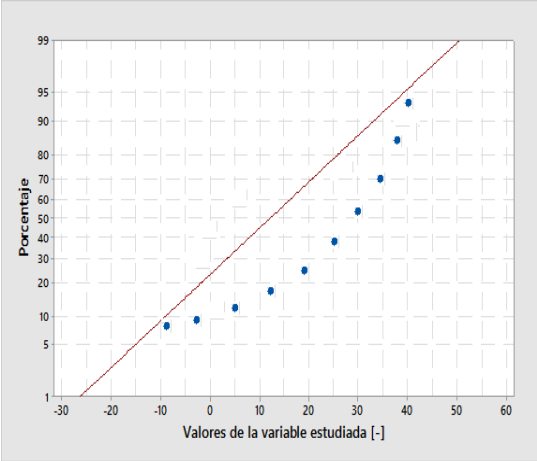
Las distribuciones asimétricas pueden ser transformadas empleando la raíz cuadrada, logaritmos o también la inversa de la variable, sin embargo para las distribuciones negativamente asimétricas funciona mejor la raíz cuadrada, mientras que el logaritmo funciona mejor para la asimetría positiva. Para identificar qué tipo de distribución tiene los datos de una variable es posible usar los gráficos de probabilidad normal, en la Figura 1.6 *(a)* se muestra el grafico de probabilidad normal que cumple con el supuesto de normalidad (los puntos se encuentran en la diagonal o cercanos a ella); *(b)* presenta una distribución plana; *(c)* presenta un distribución asimétrica positiva; y *(d)* presenta una distribución asimétrica negativa.


Porcentaje
99
95
90
80
70
60
50
40
30
20
10
5
1
-30
-20
-10
0
10
20
30
40
50
60
Valores de la variable estudiada [-]


Porcentaje
99
95
90
80
70
60
50
40
30
20
10
5
1
-30
-20
-10
0
10
20
30
40
50
60
Valores de la variable estudiada [-]

(a) (b)





(c) (d)

Figura 1.6: Gráficos de probabilidad normal para diferentes distribuciones.

Por otro lado, la homocedasticidad es un problema asociado a la normalidad, y en general si se soluciona el problema de la no normalidad se soluciona el problema de varianza no constante.

- Transformaciones para conseguir linealidad

Al graficar la variable respuesta dependiente versus las variables independientes o predictoras se pueden observar relaciones no lineales, las cuales se pueden transformar en relaciones lineales para cumplir con el supuesto. En la siguiente tabla se pueden observar las diferentes transformaciones recomendadas cuando se presentan relaciones no lineales entre las variables:

Tabla 1.4: Transformaciones para conseguir linealidad.

Relación no lineal entre las variables	Transformación	Modelo linealizado
$Y = ae^{bX}$	$Z = \log(Y) \quad X = X$	$Z = \log(a) + bX$
$Y = a + blog(X)$	$Y = Y \quad W = \log(X)$	$Y = a + bW$
$Y = aX^b$	$Z = \log(Y) \quad W = \log(X)$	$Z = \log(a) + bW$
$Y = a + \frac{b}{X}$	$Y = Y \quad W = \frac{1}{X}$	$Y = a + bW$
$Y = \frac{1}{a + bX}$	$Z = \frac{1}{Y} \quad X = X$	$Z = a + bX$

1.7.2 Estimación del modelo de regresión

Existen varios programas estadísticos que ayudan a estimar los coeficientes de regresión en el modelo usando el método matemáticos de mínimos cuadrados, sin embargo queda en el usuario del programa estadístico la responsabilidad de alcanzar la mayor coherencia con la realidad de los datos, coherencia que estará dada por la valoración del modelo de regresión que se explicará en la siguiente sección definiendo estadísticos para este objetivo.

En la mayoría de los casos cuando se desea realizar un análisis de regresión múltiple, se tiene un número posible de variables independientes predictoras entre las cuales elegir para incluirlas en el modelo de regresión. Entonces el problema del investigador o usuario del programa estadístico recae en adicionar las variables adecuadas al modelo y así conseguir el mayor ajuste a los datos. Existen por lo tanto algunos métodos para lograr lo anterior, los que

pueden dividirse en tres: Especificación confirmatoria, Métodos de búsqueda secuencial y Métodos combinatorios.

1) *Especificación confirmatoria*

Es en donde el investigador conoce con seguridad las variables que se deben incluir en el modelo, ya sea por una investigación anterior o por una teoría ya comprobada. Por lo que el investigador debe confirmar que las variables independientes incluidas producen el máximo ajuste con los datos.

2) *Métodos de búsqueda secuencial*

Es un método en el cual la búsqueda de la ecuación del modelo es realizada incluyendo o eliminando variables independientes según el ajuste con los datos aumente, así se maximiza la predicción con el número más pequeño de variables empleadas. Existen dos tipos: la estimación por etapas y la eliminación progresiva o regresiva.

La estimación por etapas es agregar variables independientes y observar si la valoración del modelo aumenta, en una primera instancia se agrega la variable independiente que posea la mayor correlación lineal con la variable dependiente, la cual es la situación base desde donde se agregan más variables independientes esperando un mayor ajuste del modelo a los datos.

La eliminación progresiva o regresiva es un método en donde la situación base para encontrar la ecuación del modelo es incluir todas las variables independientes disponibles, e ir eliminando variables para alcanzar la mayor valoración del modelo.

1.7.3 Valoración del modelo de regresión

Cuando se obtiene un modelo regresión simple o múltiple se desea medir cuan ajustado esta este modelo a los datos, para lo cual se presentan varias herramientas estadísticas que nos permiten cuantificar el ajuste:

- *Análisis de la varianza*

Permite medir la variabilidad explicada por el modelo, y de cada una de las variables independientes predictores incluidas en este, y si esta variabilidad es significativa estadísticamente o no. Lo anterior nos permite incluir o rechazar variables independientes en el modelo.

- *Coeficiente múltiple de determinación R^2 y R^2 ajustada*

Permite cuantificar la bondad del ajuste del modelo y comparar diferentes modelos con diferentes variables incluidas en él. R^2 ajustada se prefiere ya que en este estadístico no influyen la cantidad de variables.

- *Error estándar de los coeficientes de correlación*

Al igual que el análisis de la varianza, nos permite tener una segunda opinión acerca de las variables que se deben incluir en el modelo, incluyendo el coeficiente constante en el modelo, y si estas son significativas estadísticamente o no

En las próximas secciones se profundizara con mayor detalle en las herramientas estadísticas para la valoración del modelo de regresión obtenido.

1.7.3.1 Análisis de la varianza

Para introducir el análisis de la varianza se tiene la siguiente ecuación:

$$Y_i = \hat{Y}_i + \hat{u}_i \qquad (1.19)$$

Es decir la desviación entre el verdadero valor de Y_i y su estimador $\hat{Y}_i$ son los residuos estimados $\hat{u}_i$.Al elevar al cuadrado en ambos lados y sumar sobre la muestra se tiene que:

$$\sum_{i=1}^{n} y_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \hat{y}_i^2 + \sum_{i=1}^{n} \hat{u}_i^2 + 2\sum_{i=1}^{n} \hat{y}_i \hat{u}_i \qquad (1.20)$$

Pero $\sum_{i=1}^{n} \hat{y}_i \hat{u}_i = 0$, por lo que la ecuación anterior queda igual a:

$$\sum_{i=1}^{n} y_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \hat{y}_i^2 + \sum_{i=1}^{n} \hat{u}_i^2 \qquad (1.21)$$

Luego se definen los siguientes términos:

- Suma de cuadrados totales SCT, que es la variación total de los valores reales de *Y* respecto a su media muestral, y se describe de la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^{n} y_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (Y_i - \bar{Y})^2 \qquad (1.22)$$

- Suma de cuadrados explicadas SCE, que es la variación de los valores de *Y* estimados alrededor de su media, o variación explicada por la regresión o variable/s independientes en el modelo, se describe de la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^{n} \hat{y}_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \qquad (1.23)$$

- Suma de cuadrados de los residuos SCR, que es la variación residual o no explicada de los valores de Y alrededor de la línea de regresión:

$$\sum_{i=1}^{n} \hat{u}_i^2 \qquad (1.24)$$

Luego la ecuación (1.21) es igual a:

$$SCT = SCE + SCR \qquad (1.25)$$

Así, el análisis de los componentes de la SCT se conoce como análisis de varianza o ANOVA.

Para un análisis de regresión con dos variables la SCE toma la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^{n} \hat{y}_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 = \hat{\beta}_2^2 \sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2 \qquad (1.26)$$

Luego, analizar la suma de cuadrados explicada por cada variable independiente predictora nos da una medida de cuanto aportan estas variables a la explicación de la variabilidad de la variable dependiente de respuesta Y.

Existe también otra forma de cuantificar la variabilidad explicada por las variables y la no explicada debido a los residuos, la cual es la suma de los cuadrados promedio SCP, la que se obtiene al dividirse la suma de los cuadrados, ya sea por la/s variable/s o residuos, y el número de grados de libertad. La siguiente tabla resume todo lo anterior:

Tabla 1.5: Resumen análisis de varianza para dos variables.

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados promedio (SCP)
Regresión (SCE)	$\sum_{i=1}^{n} \hat{y}_i^2$	1	$\frac{\sum_{i=1}^{n} \hat{y}_i^2}{k-1}$
Residuos (SCR)	$\sum_{i=1}^{n} \hat{u}_i^2$	$N-2$	$\frac{\sum_{i=1}^{n} \hat{u}_i^2}{N-k}$
Total (SCT)	$\sum_{i=1}^{n} y_i^2$	$N-1$	

Donde N es el tamaño muestral. La tabla anterior describe el análisis de varianza para una regresión con dos variables, cuando existen más variables independientes predictoras que entran en el modelo se pueden obtener la suma de cuadrados explicada por cada variable y así cuantificar el aporte que estas tienen al modelo, la siguiente tabla muestra de forma matricial como se obtienen estos valores para k variables:

Tabla 1.6: Resumen análisis de varianza para k variables.

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados promedio (SCP)
Regresión (SCE)	$\widehat{\boldsymbol{\beta}}^t \boldsymbol{X}^t \boldsymbol{y} - N\bar{Y}^2$	$k-1$	$\frac{\widehat{\boldsymbol{\beta}}^t \boldsymbol{X}^t \boldsymbol{y} - N\bar{Y}^2}{k-1}$
Residuos (SCR)	$\boldsymbol{y}^t \boldsymbol{y} - \widehat{\boldsymbol{\beta}}^t \boldsymbol{X}^t \boldsymbol{y}$	$N-k$	$\frac{\boldsymbol{y}^t \boldsymbol{y} - \widehat{\boldsymbol{\beta}}^t \boldsymbol{X}^t \boldsymbol{y}}{N-k}$
Total (SCT)	$y^t y - N\bar{Y}^2$	$N-1$	

Donde $\widehat{\boldsymbol{\beta}}$ es un vector columna $k\,x\,1$ formado por los coeficientes de regresión; $\boldsymbol{X}$ es la matriz de datos $N\,x\,k$ con N observaciones sobre las $k-1$ variables de X_2 a X_k, y la primera

columna de números 1 representando el término del intercepto; $\boldsymbol{y}$ es el vector columna $N\ x\ 1$ de observaciones sobre la variable dependiente Y.

Puede realizarse una prueba F para evaluar el grado de significancia de estos valores, considerando la siguiente variable:

$$F = \frac{SCP\ de\ SCE}{SCP\ de\ SCR} \qquad (1.27)$$

Evaluando la hipótesis nula $H_0: \beta = 0$, y la hipótesis alternativa $H_0: \beta \neq 0$ (siendo β cualquier coeficiente de regresión que se desee evaluar), calculando la razón F y comprarandola con algún valor critico obtenido con un nivel de significancia deseado, o bien calculando el valor p del estadístico F calculado, se puede saber si el coeficiente es significativo o no en el modelo, mientras menor sea el valor p mayor es la significancia del coeficiente y por lo tanto también de la variable independiente que acompaña a este coeficiente. [4]

1.7.3.2 Coeficiente múltiple de determinación R^2 y R^2ajustada

Es una medida de la bondad de ajuste de la ecuación de regresión, es decir entrega el porcentaje de la variación total en la variable respuesta dependiente explicada por las variables independientes predictoras. Se define de la siguiente manera:

$$R^2 = \frac{SCE}{SCT} = 1 - \frac{SCR}{SCT} \qquad (1.28)$$

Donde; SCE es la suma de cuadrados explicada por la; SCT es la suma de cuadrados total; y SCR suma de los cuadrados de los residuos, vistos con anterioridad en la sección anterior.

Para una regresión simple, es decir entre solo dos variables, el coeficiente de determinación se representa por r^2, y se obtiene de la siguiente forma:

$$r^2 = \frac{SCE}{SCT} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2} = \hat{\beta}_2^2 \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2} \right) \qquad (1.29)$$

Donde $\hat{\beta}_1$ es el coeficiente de regresión estimado que multiplica a la variable independiente, X_i e Y_i son los n datos de la muestra, variable dependiente e independiente respectivamente.

Ahora si la regresión es múltiple, por ejemplo con 3 variables, el coeficiente múltiple de determinación es el siguiente:

$$R^2 = \frac{SCE}{SCT} = \frac{\hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})(X_{2i} - \bar{X}) + \hat{\beta}_3 \sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})(X_{3i} - \bar{X})}{\sum_{i=1}^{n} y_i^2} \qquad (1.30)$$

Donde Y_i, X_{2i}, X_{3i} son los datos reales de la variable dependiente de respuesta y las dos variables independientes predictoras respectivamente.

Si generalizamos para el caso de k variables obtenemos:

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})(X_{2i} - \bar{X}) + \hat{\beta}_3 \sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})(X_{3i} - \bar{X}) + \cdots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})(X_{ki} - \bar{X})}{\sum_{i=1}^{n} y_i^2} \qquad (1.31)$$

Donde Y_i, X_{2i},…, X_{ki} son los datos de las k variables empezando por la variable dependiente de respuesta.

El rango de r^2 o R^2 es entre 0 y 1, si es 1 la línea de regresión ajustada explica el 100% de la variación de Y, si es 0 el modelo no explica nada de la variación de Y.

Uno de los problemas del coeficiente múltiple de determinación es que a medida que aumenta el número de variables independientes predictoras R^2 aumenta casi invariablemente y nunca disminuye, por lo que si se desea comparar dos modelos con la misma variable dependiente pero diferente número de variables independientes predictoras, este último factor toma una importancia mayor que puede no ser acorde a la realidad. En vista de esto, se obtiene un coeficiente que si tiene en cuenta el número de variables independientes en el modelo denominado *coeficiente múltiple de determinación ajustada o R^2 ajustada*:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\hat{u}_i^2}{n-k}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{(Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \qquad (1.32)$$

Donde k es el número de parámetros en el modelo incluyendo el termino de intercepto (para una regresión con 3 variables $k = 3$); $\sum_{i=1}^{n} \hat{u}_i^2$ es la suma de los cuadrados de los residuos SCR, nombrada anteriormente; n es el tamaño muestral; $y_i$son los datos reales de la muestra de la variable dependiente.

Al igual que R^2, $\bar{R}^2$ posee un rango de 0 a 1, siendo 1 el 100% de la variación de la variable Y explicada por el modelo. [4]

1.7.3.3 Error estándar de los coeficientes de correlación

Además de obtener una medida global del ajuste del modelo a los datos reales, como es el R^2 y R^2 ajustado, es necesario obtener medidas del aporte a la explicación de la variabilidad de cada coeficiente de regresión que se estime en el modelo, y si estos son estadísticamente significativos. Para tal propósito se calcula el error o desviación estándar de cada estimación de los coeficientes de regresión usada, se calcula el valor t, para luego dado un nivel de significancia evaluar si es significativo o no, o bien obtener directamente el valor p o nivel de significancia exacta.

El error o desviación estándar de un coeficiente de regresión es una medida de la precisión con la que el modelo estima el valor desconocido del coeficiente, mientras menor sea el error estándar más precisa será la estimación. Si existen tres variables en el modelo, es decir una variable dependiente y dos independientes, el error estándar de cada coeficiente se obtiene de la siguiente manera:

$$ee(\hat{\beta}_0) = +\sqrt{var(\hat{\beta}_0)} \qquad (1.33)$$

$$var(\hat{\beta}_0) = \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}_1^2 \sum_{i=1}^{n}(X_{3i} - \bar{X})^2 + \bar{X}_2^2 \sum_{i=1}^{n}(X_{2i} - \bar{X})^2 - 2\bar{X}_1\bar{X}_2 \sum_{i=1}^{n}(X_{2i} - \bar{X})(X_{3i} - \bar{X})}{\sum_{i=1}^{n}(X_{2i} - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^{n}(X_{3i} - \bar{X})^2 - (\sum_{i=1}^{n}(X_{2i} - \bar{X})(X_{3i} - \bar{X}))^2}\right]\sigma^2 \qquad (1.34)$$

$$ee(\hat{\beta}_1) = +\sqrt{var(\hat{\beta}_1)} \qquad (1.35)$$

$$var(\hat{\beta}_1) = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{2i} - \bar{X})^2}{(\sum_{i=1}^{n}(X_{2i} - \bar{X})^2)(\sum_{i=1}^{n}(X_{3i} - \bar{X})^2) - (\sum_{i=1}^{n}(X_{2i} - \bar{X})(X_{3i} - \bar{X}))^2}\right]\sigma^2 \qquad (1.36)$$

$$ee(\hat{\beta}_2) = +\sqrt{var(\hat{\beta}_2)} \qquad (1.37)$$

$$var(\hat{\beta}_2) = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{2i} - \bar{X})^2}{(\sum_{i=1}^{n}(X_{2i} - \bar{X})^2)(\sum_{i=1}^{n}(X_{3i} - \bar{X})^2) - (\sum_{i=1}^{n}(X_{2i} - \bar{X})(X_{3i} - \bar{X}))^2}\right]\sigma^2 \qquad (1.38)$$

Donde; X_{2i}, X_{3i} son los datos muestrales de las variables independientes predictoras; n es el tamaño muestral; σ^2 es la varianza de los residuos poblacionales u_i, que se puede estimar de la siguiente forma:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \hat{u}_i^2}{n-k} \qquad (1.39)$$

Donde; k es el número de variables en el modelo, en este caso son tres: una variable dependiente respuesta y dos variables independientes predictoras.

Al reemplazar en el cálculo del error estándar $\hat{\sigma}^2$ (estimado) por σ^2 se obtiene el valor t para cada coeficiente de regresión, y así poder probar la significancia de cada uno de estos:

$$t = \frac{\hat{\beta}_0 - \beta_0}{ee(\hat{\beta}_0)} \qquad (1.40)$$

$$t = \frac{\hat{\beta}_1 - \beta_1}{ee(\hat{\beta}_1)} \qquad (1.41)$$

$$t = \frac{\hat{\beta}_2 - \beta_2}{ee(\hat{\beta}_2)} \qquad (1.42)$$

Podemos utilizar la prueba t para demostrar una hipótesis sobre cualquier coeficiente de regresión, postulando que:

$$H_0: \beta_0 = 0 \qquad H_1: \beta_0 \neq 0$$

La hipótesis nula establece que el coeficiente puesto a prueba es cero, o bien que al mantener constante las otras variables independientes, la variable que acompaña este coeficiente o el coeficiente mismo (si se trata de β_0) no tiene influencia lineal sobre Y. Si el valor t calculado excede el valor crítico para un nivel de significancia escogido se rechaza H_0. Otra forma de evaluar la hipótesis nula es obtener el valor p (significancia exacta) para la prueba t, a menor

valor p existe mayor evidencia para rechazar H_0, generalmente se esperan valores menores al 5%.

El procedimiento descrito aquí es útil para incluir o rechazar variables independientes en el modelo: si el valor de significancia del coeficiente de regresión evaluado es menor a un valor esperado (generalmente 5%) esta variable es significativa en el modelo. [4]

1.7.4 Predicción con el modelo de regresión

1.7.4.1 Predicción individual

Para la predicción de un valor de Y_0 es necesario construir un intervalo de confianza ya que debido a las fluctuaciones muestrales es probable que una sola estimación difiera del valor verdadero buscado. Se puede utilizar la distribución t para construir un intervalo de confianza para un estimador de la siguiente forma:

$$P\left[-t_{\alpha/2} \leq t \leq t_{\alpha/2}\right] = 1 - \alpha \quad (1.43)$$

Donde el valor t esta dado por:

$$t = \frac{Y_0 - \hat{Y}_0}{ee(Y_0 - \hat{Y}_0)} \quad (1.44)$$

Además, α es el nivel de significancia, también conocida la probabilidad de cometer un error tipo I, el cual consiste en rechazar una hipótesis verdadera; $t_{\alpha/2}$ es el valor de la variable t obtenida de la distribución t para un nivel de significancia $\alpha/2$ y $n - k$ grados de libertad,

llamado valor critico de t a un nivel de significancia $\alpha/2$ (se obtiene de la *tabla distribución t*, anexo A-5); k numero de variables en el modelo; n tamaño muestral.

Luego reemplazando la ecuación (3) en (2) se tiene que el intervalo de confianza para un valor individual de Y_0 es igual:

$$P\left[\hat{Y}_0 - t_{\alpha/2} ee\left(Y_0 - \hat{Y}_0\right) \leq Y_0 \leq \hat{Y}_0 + t_{\alpha/2} ee(Y_0 - \hat{Y}_0)\right] = 1 - \alpha \qquad (1.45)$$

Sabemos también que el error estándar (ee) en el denominador es igual a:

$$ee\left(Y_0 - \hat{Y}_0\right) = +\sqrt{var\left(Y_0 - \hat{Y}_0\right)} \qquad (1.46)$$

Para un modelo de dos variables se tiene que la varianza es igual a:

$$var\left(Y_0 - \hat{Y}_0\right) = \sigma^2 \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}\right] \qquad (1.47)$$

Donde X_0 es el valor dado de X para predecir un valor individual de Y, Y_0; X_i son los valores muestrales de los n datos; σ^2 es la varianza de los residuos poblacionales u_i, que se puede estimar con la ecuación (1.39).

Para el caso de k variables la forma matricial para la varianza de una predicción individual es la siguiente:

$$var\left(Y_0 - \hat{Y}_0\right) = \sigma^2[1 + \boldsymbol{x}_0^t(\boldsymbol{X}^t\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{x}_0] \qquad (1.48)$$

Donde σ^2 es la varianza de los residuos poblacionales u_i, que se puede estimar con la ecuación (5); $\boldsymbol{x}_0$ es la matriz de los valores dados de las variables X para los cuales se desea predecir; $\boldsymbol{X}$ es la matriz de datos, matriz con las n observaciones por cada variable X. [4]

2 METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos específicos propuestos se plantea la siguiente metodología descrita para cada objetivo:

1) *Analizar la situación actual de funcionamiento del mantenimiento de la turbina a gas, incluyendo diagrama de flujo del proceso de mantención; descripción general del equipo; descripción de las diferentes piezas.*

Este objetivo sirve como introducción al tema, para poder contextualizar la situación y el problema en sí mismo. Se plantea cumplir este objetivo de una manera directa, es decir describiendo el equipo en general, las partes que involucran el estudio, el funcionamiento actual del mantenimiento del equipo y finalmente la construcción de un diagrama de flujo del proceso de mantención.

2) *Análisis y depuración de la calidad de la información histórica existente.*

Para cumplir con este objetivo se analiza la información o data histórica de cada componente incluido en el estudio para buscar diferencias constructivas en el mismo componente. Esto se logra analizando la cantidad de componentes inaceptables y modos de falla presentes en estos componentes revisando los informes de cada mantención realizada a la turbina. Si los modos de falla o su ubicación de presencia en el componente cambian drásticamente, se puede suponer diferencias constructivas en este con respecto a componentes usados en otros periodos de operación. La idea principal es poder homogeneizar la información, usando solo un tipo de forma constructiva del componente, que además debe ser la forma más frecuente presente en la operación de la turbina.

Por otro lado, mediante pruebas estadísticas se identifican datos atípicos que interfieren en el resultado final del análisis. Estas pruebas estadísticas son usadas como respaldo a una razón o argumento físico que produzca que un dato sea atípico, entre las razones físicas se encuentran: cambios constructivos o de diseño de un componente, mayor o menor recubrimiento interno, entre otras. Las pruebas estadísticas que son usadas en este estudio se basan en la norma ASTM E178-08, *Práctica estándar para el tratamiento de observaciones atípicas*, en particular son usadas la *prueba estadístico T, prueba de Dixon, estadístico w/s.*

3) *Realizar un análisis de criticidad a los componentes expuestos a altas temperaturas en la turbina a gas.*

Para el estudio de criticidad del equipo se plantea una metodología conocida como *Análisis de Criticidad (AC)* la cual se basa en la frecuencia de falla, en este caso la frecuencia en la que se obtiene un componente inaceptable, y el impacto que este componente inaceptable causa. Es una metodología cuantitativa/cualitativa, ya que la frecuencia de componentes inaceptables se obtiene de la información o data histórica, y el impacto se obtiene se manera cualitativa mediante la clasificación en escalas por aspectos importantes de impacto con ayuda de un profesional con experiencia en la central termoeléctrica.

El producto entre frecuencia e impacto entregan la criticidad de cada componente.

4) *Determinación de los modos de falla que afectan a los diferentes componentes críticos expuestos a altas temperaturas en la máquina, así como también determinar las posibles causas de estas fallas.*

Para cumplir este objetivo nos basamos en el estudio de los informes de mantención disponibles para determinar cuáles son los modos de falla que afectan a los componentes expuestos a altas temperatura críticos, luego mediante *Tablas de Funcionalidad- Modos de falla- Causas* se determina cuáles son las posibles causas de estas fallas.

5) *Análisis de cómo afectan las condiciones de operación en la vida útil de los componentes críticos, mediante la caracterización del estado de salida de cada componente crítico de la turbina.*

Para cumplir con este objetivo nos basamos en el *Análisis multivariante,* y específicamente en el *Análisis de regresión múltiple*, el cual permite relacionar las diferentes variables operacionales estudiadas: horas de operación con gas, horas de operación con petróleo, cantidad de partidas/apagados y cantidad de trips, con la variable de salida: cantidad de componentes inaceptables.

Así, con la ayuda de esta herramienta estadística podemos analizar de manera cuantitativa como afectan las condiciones de operación en la vida útil de los componentes expuestos a altas temperaturas críticos, y poder predecir en el rango de información disponible cuantos componentes inaceptables se obtienen después de un periodo de operación definido por las condiciones de operación antes nombradas. La Figura 2.1 muestra el diagrama de flujo que se debe seguir para lograr predecir el número de componentes inaceptables.

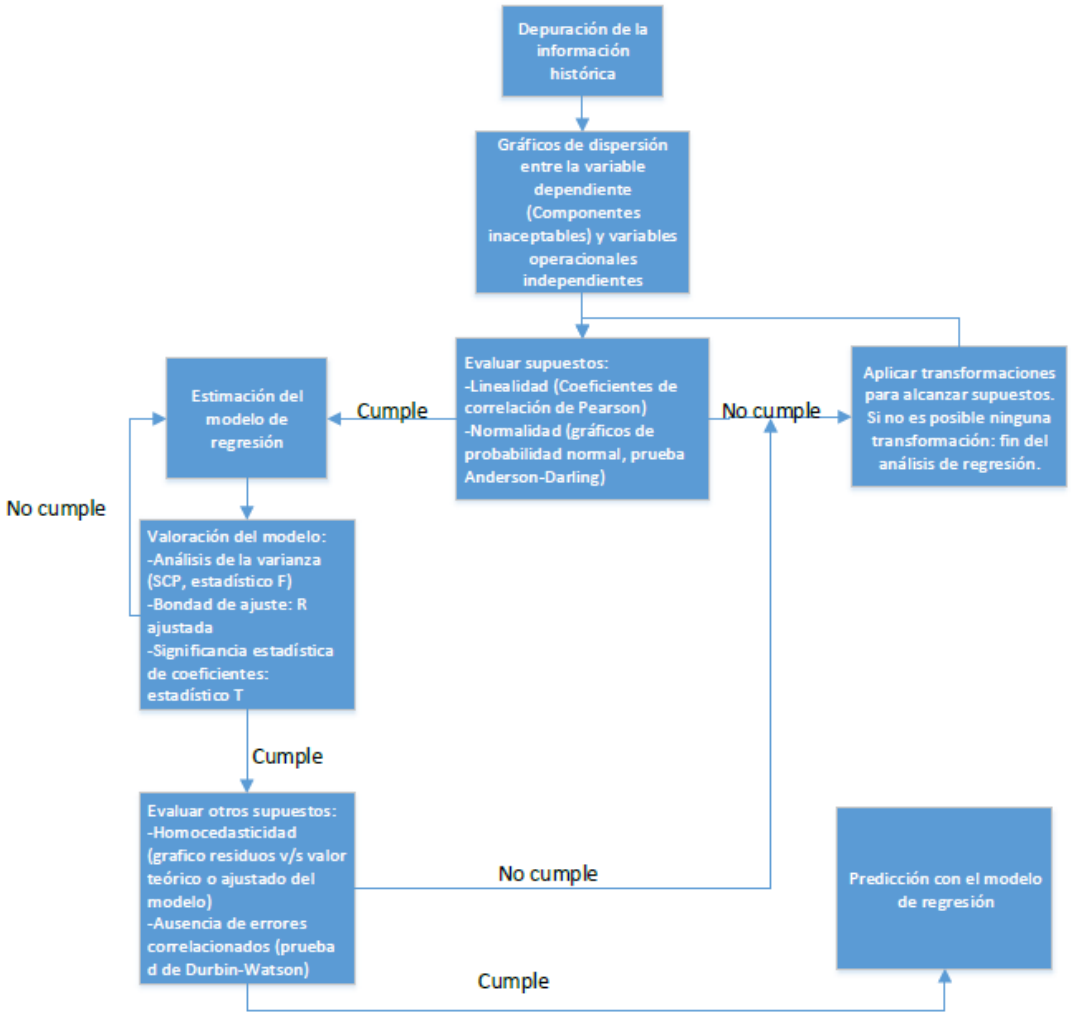


Figura 2.1: Diagrama de flujo para metodología análisis de regresión.

3 RESULTADOS

3.1 Mantenimiento turbina a gas M701F en central termoeléctrica San Isidro

3.1.1 Descripción general del equipo

En la Central Termoeléctrica San Isidro, existen dos unidades generadoras de ciclo combinado, es decir posee dos turbinas a gas modelo M701F del fabricante Mitsubishi: TG1 y TG2.

La turbina a gas M701F está diseñada para generar energía mecánica la cual mediante un generador la transforma en energía eléctrica. Para generar esta energía mecánica la turbina puede quemar como combustible tanto gas natural como petróleo diésel. La potencia instalada de cada unidad se muestra en la siguiente Tabla 3.1:

Tabla 3.1: Potencia instalada en turbinas a gas, central termoeléctrica San Isidro. [7] [8]

Unidad	TG1	TG2
Potencia instalada [MW]	240,00	248,29

Cada turbina a gas se compone de forma constructiva general en 6 secciones como se observa en la Figura 3.1: entrada, compresión, combustión, turbina, rotor, y salida.

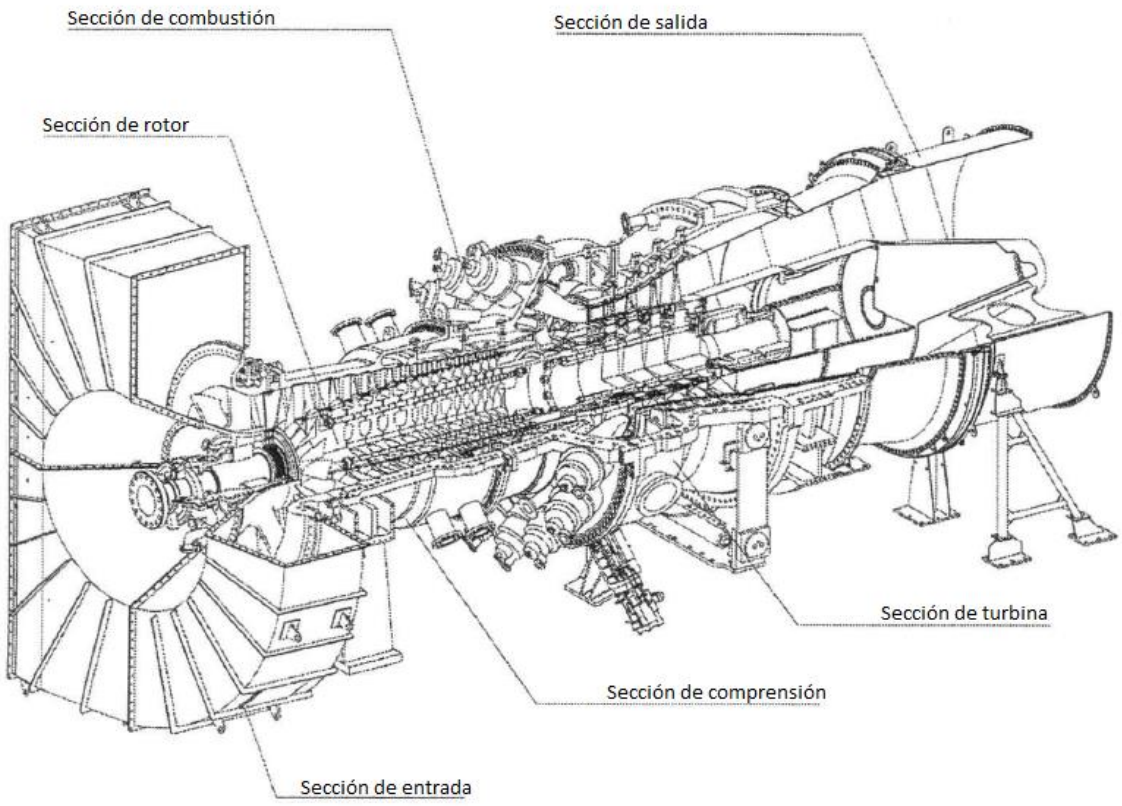


Figura 3.1: Turbina a gas M701F. [9]

- *Sección de entrada*: corresponde a la entrada de aire a la turbina, el cual es utilizado tanto para la combustión como para la refrigeración cuando el combustible usado en la combustión es gas natural. Existen un sistema de filtrado para evitar que partículas dañinas entren al compresor y a la turbina.
- *Sección de compresión*: es la sección en donde el aire que ingreso en la sección de entrada es comprimido. En un rendimiento de ciclo simple el aire alcanza una razón de compresión de 17.
- *Sección de combustión*: es en donde se inyecta el combustible, ya sea gas natural o petróleo, por las toberas hacia las cámaras de combustión en donde se realiza la combustión de forma regulada. En esta sección se inicia la ruta de los gases calientes, en donde estos pueden alcanzar los 1400[°C]. Esta sección está compuesta

principalmente por las toberas, cámaras de combustión y piezas de transición, en donde esta última dirige los gases calientes a la siguiente sección de turbina y rotor. Se compone de una estructura en anillo compuesta por 20 toberas, 20 cámaras de combustión y 20 piezas de transición.

- *Sección de turbina*: aquí los gases calientes se encuentran con las cuatro etapas de alabes fijos de turbina y anillos de estanqueidad (*ring segment*). El principal objetivo de esta sección es dirigir de la manera más eficiente el flujo de gases calientes y permitir la estanqueidad de la zona de turbina.
- *Sección de rotor*: se compone principalmente del rotor propiamente tal de la turbina el cual está unido al generador, y de las cuatro etapas de alabes móviles, los cuales al recibir el flujo de gases calientes por reacción convierten la energía cinética y calórica del flujo en energía mecánica que es recibida por el rotor.
- *Sección de salida*: es la salida de los gases de escape, los cuales pueden alcanzar temperaturas cercanas a los 600[°C].

3.1.2 Descripción de componentes expuestos a altas temperaturas

Los componentes que se analizaron en este estudio fueron los expuestas a altas temperaturas en la turbina a gas modelo M701F, descrita anteriormente. La temperatura de la llama al interior de la cámara de combustión puede alcanzar los 1400[°C], y luego a la salida de la turbina estos gases de escape alcanzan una temperatura cercana a los 600[°C], por lo que desde la inyección del combustible hasta la salida de la turbina a gas es en donde se encuentran las más altas temperaturas en el proceso de ciclo combinado de generación. Las piezas que se encuentran en este tramo y están expuestas a altas temperaturas se enumeran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Componentes expuestos a altas temperaturas en TG modelo M701F.

N°	Componente	Cantidad en el set al interior de la turbina
1	Tobera piloto principal	20

2	Tobera piloto gas	20
3	Tobera piloto petróleo	20
4	Cámara de combustión	20
5	Pieza de transición	20
6	Alabe fijo de 1° etapa	40
7	Alabe fijo de 2° etapa	32
8	Alabe fijo de 3° etapa	18
9	Alabe fijo de 4° etapa	14
10	Alabe móvil de 1° etapa	96
11	Alabe móvil de 2° etapa	87
12	Alabe móvil de 3° etapa	112
13	Alabe móvil de 4° etapa	100
14	Ring segment de 1° etapa	60
15	Ring segment de 2° etapa	64
16	Ring segment de 3° etapa	36
17	Ring segment de 4° etapa	28

Estos componentes nombrados en la tabla anterior se dividen en 3 secciones de la turbina: sección de combustión, sección de turbina y sección de rotor.

- Componentes en la sección de combustión:

En esta sección se encuentran el inyector de combustible (Figura 3.2), que se divide en inyector principal, inyector de petróleo e inyector de gas natural, además se encuentra la cámara de combustión (Figura 3.3), y pieza de transición (Figura 3.4).

Como lo dice su nombre los inyectores son los encargados de inyectar el combustible usado, ya sea petróleo o gas natural. Este combustible es quemado en presencia de oxígeno en la cámara de combustión, donde se produce una combustión controlada, y se alcanzan temperaturas de llama de aproximadamente 1400 [°C]. Luego los gases de escape son dirigidos a la pieza de transición, el cual es el componente encargado de redirigir los gases calientes a la sección de turbina y rotor.

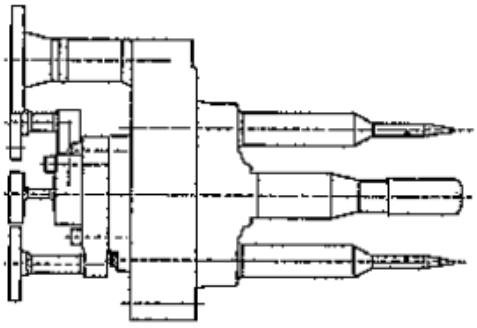


Figura 3.2: Ensamble tobera de inyección. [9]

Figura 3.3: Cámara de combustión, turbina a gas M701F.

Figura 3.4: Pieza de transición, turbina a gas M701F.

- Componentes en la sección de turbina

Esta sección se compone de 2 tipo de componentes: alabes fijos y anillos de estanqueidad (*ring segment*). La turbina posee 4 etapas, por lo que existen 4 tipos de alabes fijos y 4 tipos de anillos de estanqueidad o ring segment.

Las 4 etapas de alabes fijos son los encargados de dirigir de manera eficiente los gases calientes, es decir en la dirección apropiada para que los alabes móviles puedan aprovechar la mayor parte de la energía del flujo de los gases. En la Figura 3.5 se observa el ensamble de los alabes, donde 1° etapa, 2° etapa, 3° etapa y 4° etapa son alabes fijos correspondiente a cada etapa, y entre ellos se encuentran los alabes móviles y los anillos de estanqueidad. En la Figura 3.6 se observa el alabe fijo de 1° etapa.

Las 4 etapas de anillos de estanqueidad son los encargados de mantener la estanqueidad de la turbina en el camino de los gases calientes, es decir al igual que los alabes, están en contacto

directo con el flujo de gases. Al igual que los alabes fijos, estos anillos permanecen estáticos en la operación. En la Figura 3.7 se observa la ubicación del alabe fijo y ring segment de 3° etapa en la turbina a gas.

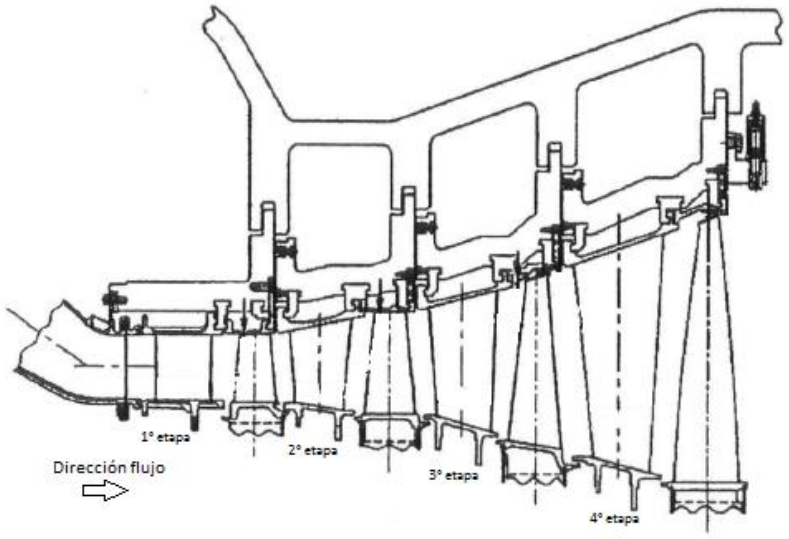


Figura 3.5: Etapas de alabes fijos en turbina a gas M701F. [9]

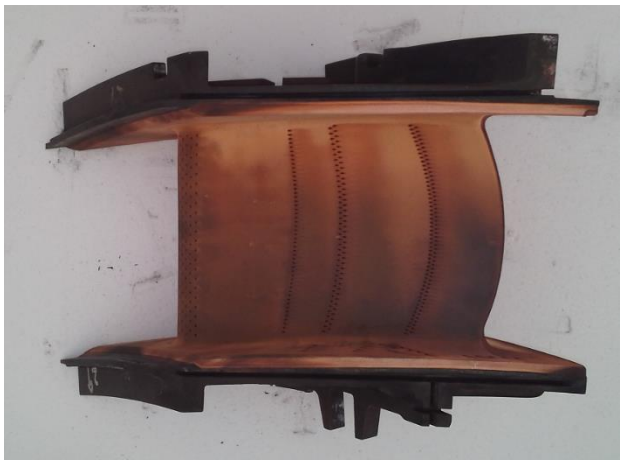


Figura 3.6: Alabe fijo de 1° etapa en turbina a gas M701F.

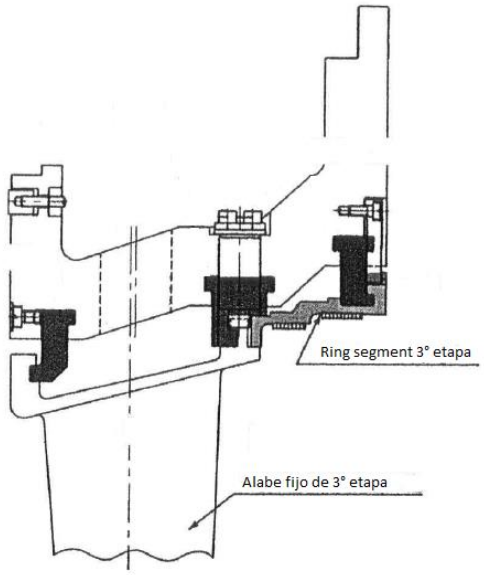


Figura 3.7: Alabe fijo y ring segment de 3° etapa. [9]

- Componentes en la sección de rotor:

Estos componentes son llamados así porque están unidos al rotor o eje de la turbina, son los denominados alabes móviles, que al igual que los alabes fijos existen 4 etapas en la turbina. La primera etapa de alabes móviles es la más pequeña en cuanto a longitud, aumentando este a medida que aumenta las etapas, esto se debe a la expansión volumétrica del gas que ocurre en la turbina. Los alabes móviles son los encargados de aprovechar la energía del flujo de gases calientes y mediante reacción producir movimiento angular del eje. Los 4 tipos de alabes móviles se muestran en la Figura 3.8.

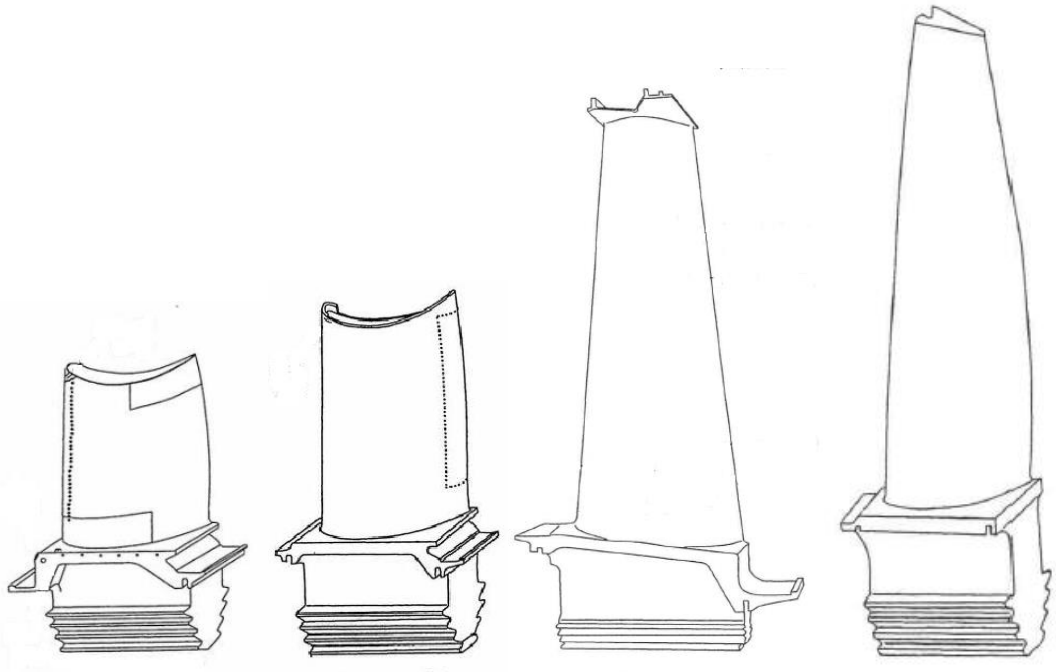


Figura 3.8: Alabes móviles de 1°, 2°, 3° y 4° etapa (en ese orden) [9]

Estos 17 componentes se distribuyen en la turbina a gas como lo muestra diagrama de flujo del proceso en el anexo A-6.

3.1.3 Funcionamiento actual del mantenimiento turbina a gas M701F en central termoeléctrica San Isidro.

Como se dijo anteriormente, la central termoeléctrica San Isidro cuenta con dos unidades generadoras de ciclo combinado, es decir, entre otras cosas, posee dos turbinas a gas modelo M701F. A ambas turbinas se les aplica la misma política de mantenimiento preventivo basada en intervalos determinados por la cantidad de *horas equivalentes de operación, EOH* por sus siglas en inglés (*Equivalent operation hours*).

Cada unidad posee componentes que son expuestos a las más altas temperaturas en la turbina, nombrados y descritos en la sección anterior. Estos componentes son el centro de análisis de este estudio. Por lo que el análisis en esta sección sobre la situación actual de funcionamiento del mantenimiento de la turbina a gas se centrará en este tipo de componentes, dejando presente que el mantenimiento total de la turbina a gas M701F es muchísimo más compleja, el cual considera mantenimientos tanto correctivos como preventivos a los diversos sistemas de la turbina y auxiliares.

El intervalo en el que se realiza algún mantenimiento de los componentes expuestos a altas temperaturas se estima en base a una variable llamada *Horas equivalentes de operación*, esta variable debe ser calculada y considera los factores más importantes que afectan la vida útil de la turbina y sus componentes: tipo de combustible, horas de operación total, cantidad de partidas/apagados, cantidad de *trips*, cantidad de saltos de carga, y cantidad de rechazos de carga. Este intervalo se define por la empresa encargada del mantenimiento de las turbinas, en este caso el fabricante. El intervalo hasta el año 2012 era de 8.000 [eoh] en promedio, y después de este año se cambió a 12.000 [eoh].

Existen además 3 tipos de mantenimiento o inspecciones que se le realizan a la turbina a gas, en donde la diferencia entre ellas es principalmente la cantidad de componentes a inspeccionar:

- Inspección de la sección de combustión (IC)

En esta inspección se revisan los siguientes componentes de combustión que están expuestos a altas temperaturas: toberas de inyección, cámaras de combustión y piezas de transición. Estos componentes se desmontan de la turbina y se reemplazan inmediatamente por otros componentes que ya están dispuestos para la ocasión. Este proceso es llamado *Roll in-Roll out*, y es llevado acabo para minimizar el tiempo de parada de la planta. A los componentes que salen se les aplican diferentes test no destructivos, los que pueden ser test visual o tinta penetrante, y según el resultado se les clasifica en *aceptables* o *no aceptables*, luego según lo anterior se realizan las reparaciones pertinentes.

Además de desmontar y revisar los componentes de combustión antes nombrados, se realiza un test visual a los alabes fijos de 1° etapa y alabes móviles 4° etapa, sin desmontar de la turbina, para observar el estado de estos y si es necesario el reemplazo de algún componente del set.

Esta inspección se realiza en un tiempo aproximado de 12 días.

- Inspección de la sección de turbina (IT)

En esta mantención se realiza una inspección a todos los componentes expuestos a altas temperaturas en la turbina a gas (nombradas en la Tabla 4), para lo cual se remueve la cubierta del cilindro de turbina y la sección de la cámara de combustión, pero el rotor no se remueve.

Todos los componentes expuestos a altas temperaturas se desmontan y se les aplican test de inspección visual y tinta penetrante si fuese necesario. Se les aplican el procedimiento de *Roll in-Roll out* a los siguientes componentes: toberas de inyección, cámaras de combustión, alabes fijos de 1° y 2° etapa, alabes móviles de 1° y 2° etapa, y ring segment de 1° y 2° etapa. Para el resto de los componentes según una inspección visual se decide si reemplazarlos o no.

Esta inspección de realiza en un tiempo aproximado de 21 días.

- Inspección Mayor (IM)

Se inspeccionan todos los componentes expuestos a altas temperaturas, tal como en una inspección de turbina, pero en esta mantención además se desmonta el eje y se inspecciona. Esta inspección tiene una duración aproximada de 35 días. En la Tabla 3.3 se resumen las tres inspecciones que se le realizan a la turbina a gas M701F en la central termoeléctrica San Isidro.

Tabla 3.3: Resumen inspección a turbina a gas M701F.

Inspección	Componentes que se inspeccionan
Inspección de Combustión	- Test visual y de tinta penetrante (desmontando de la turbina) a la cámara de combustión pieza de transición y toberas de inyección. - Test visual (sin desmontar de la turbina) a alabes fijos de 1° y 4° etapa, y alabes móviles de 1° etapa.
Inspección de Turbina	- Test visual y de tinta penetrante (desmontando de la turbina) a cámaras de combustión, piezas de transición, toberas de inyección, además de las cuatro etapas de alabes fijos, móviles y anillos de estanqueidad (ring segment).
Inspección Mayor	- Se realiza una inspección de Turbina y además se desmonta e inspecciona el rotor de la turbina a gas

Por fabricante se recomienda el orden de inspecciones a la turbina presentado en la Tabla 3.4, repitiéndose el ciclo después de la 6° inspección (Inspección Mayor):

Tabla 3.4: Recomendación orden de inspecciones

N°	Horas equivalentes acumuladas [eoh]	Tipo de inspección
1	8.000	Inspección de combustión

2	16.000	Inspección de turbina
3	24.000	Inspección de combustión
4	32.000	Inspección de turbina
5	40.000	Inspección de combustión
6	48.000	Inspección mayor

Las inspecciones realizadas a las turbinas a gas en las unidades SI1 Y SI2 en la central se presentan en la Tabla 3.5 y Tabla 3.6 respectivamente, donde se destaca que el promedio de *horas equivalentes de operación entre inspecciones* es de *9.121 [eoh]* para SI1, y *8.138 [eoh]* para SI2, con desviación estándar de *2.719 [eoh]*y *3.118 [eoh]*, respectivamente.

Tabla 3.5: Inspecciones realizadas a TG1.

N°	Fecha	Horas equivalentes acumuladas [eoh]	Horas equivalentes entre inspecciones [eoh]	Tipo de Inspección
1	15 Nov. 1999	15.842	15.842	Turbina
2	29 Nov. 2000	25.702	9.860	Mayor
3	22 Oct. 2001	32.160	6.458	Inspección por reemplazo de rotor
4	14 Oct. 2002	39.396	7.235	Turbina
5	16 Nov. 2003	48.754	9.359	Combustión
6	2 Oct. 2004	57.139	8.385	Turbina
7	7 May. 2005	68.227	11.088	Combustión
8	19 Feb. 2006	71.994	3.767	Turbina
9	4 Jul. 2007	81.181	9.187	Combustión
10	12 Jun. 2008	90.354	9.172	Turbina
11	18 May. 2009	96.439	6.085	Combustión
12	27 Sept. 2010	106.353	9.913	Mayor
13	10 Sept. 2011	114.275	7.922	Combustión
14	25 Sept. 2012	123.222	8.947	Turbina
15	21 Ene. 2014	134.396	11.174	Combustión
16	6 Nov. 2015	145.933	11.537	Mayor

Tabla 3.6: Inspecciones realizadas a TG2.

N°	Fecha	Horas equivalentes acumuladas [eoh]	Horas equivalentes entre inspecciones [eoh]	Tipo de Inspección
1	9 Nov. 2007	5.687	5.687	Combustión
2	22 Sept. 2008	13.036	7.349	Turbina
3	12 Ago. 2009	20.317	7.281	Combustión
4	1 Nov. 2009	22.795	2.478	Reemplazo alabes móviles de 1° y 2° etapa
5	29 Nov. 2010	31.746	8.951	Turbina
6	20 Oct. 2011	39.986	8.240	Combustión
7	1 Nov. 2012	48.644	8.658	Turbina
8	7 Ene. 2014	59.759	11.115	Combustión
9	31 Ago. 2015	73.244	13.485	Mayor

3.2 Resultado de análisis y depuración de la calidad de información histórica existente

Se analiza la información histórica, buscando diferencias de diseño entre un mismo componente y datos atípicos, el resultado por cada unidad generadora es el siguiente:

3.2.1 San Isidro 1, TG1

- *Tobera piloto principal*

En el informe de inspección de turbina realizado entre febrero y marzo del 2006 se informa que se reemplazan los componentes de combustión (tobera piloto principal, tobera piloto combustible, cámara de combustión, pieza de transición) por nuevos diseños. No se presentan datos atípicos sospechosos.

- *Tobera piloto combustible (gas, petróleo)*

En el informe de inspección de turbina realizado entre febrero y marzo del 2006 se informa que se reemplazan los componentes de combustión (tobera piloto principal, tobera piloto combustible, cámara de combustión, pieza de transición) por nuevos diseños.

Se observa la presencia de un dato sospechoso atípico en el gráfico de puntos de la Figura 3.9, perteneciente a la inspección de combustión realizada en septiembre del 2011:

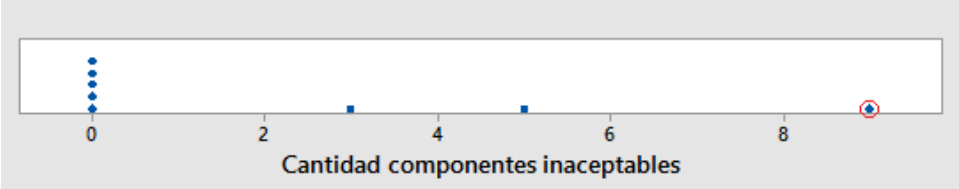


Figura 3.9: Gráfico de puntos tobera piloto combustible (gas, petróleo) SI1.

Al evaluar este dato sospechoso con los criterios descritos en el capítulo 1.5 se obtiene los resultados presentes en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Resumen dato sospechoso piloto combustible (gas, petróleo) SI1.

Dato sospechoso	Criterio	Valor criterio	Valor critico (5%)	¿Dato atípico?
10-Sept-2011	Estadístico T	2,048	2,032	Si

Estadísticamente el dato sospechoso puede ser declarado como dato atípico. Por otro lado, la razón física que apoya esta prueba estadística es que los modos de fallo presentes en estos componentes (grietas, reducción de pared, deformación y obstrucción de vías) no se

presentan en otras inspecciones con magnitudes de variables operacionales similares lo que hace suponer una menor calidad constructiva en estos componentes.

- *Cámara de combustión*

En el informe de inspección de turbina realizado entre febrero y marzo del 2006 se informa que se reemplazan los componentes de combustión (tobera piloto principal, tobera piloto combustible, cámara de combustión, pieza de transición) por nuevos diseños.

Se observa la presencia de un dato sospechoso atípico en el gráfico de puntos de la Figura 3.10, perteneciente a la inspección de combustión realizada en junio del 2009.

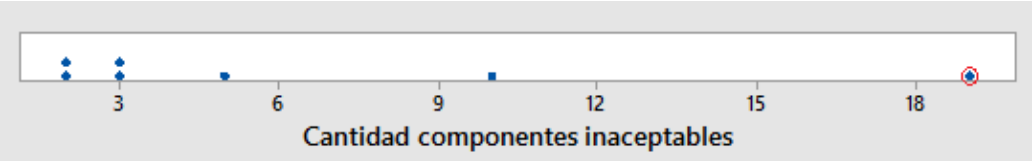


Figura 3.10: Gráfico de puntos cámara de combustión SI1

Al evaluar este dato sospechoso con los criterios descritos en el capítulo 1.5 se obtiene los resultados presentes en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Resumen dato sospechoso cámara de combustión SI1

Dato sospechoso	Criterio	Valor criterio	Valor critico (5%)	¿Dato atípico?
22-Jun-2009	Estadístico T	2,029	1,938	Si

Estadísticamente el dato sospechoso puede ser declarado como dato atípico. Por otro lado, la razón física que apoya esta prueba estadística es que para valores similares o mayores de las

variables operacionales de otros periodos de operación, no se producen modos de falla sobre los límites aceptables en gran cantidad de componentes como sucede aquí. Lo que hace suponer una menor calidad en estos componentes.

- *Pieza de transición*

En el informe de inspección de turbina realizado entre febrero y marzo del 2006 se informa que se reemplazan los componentes de combustión (tobera piloto principal, tobera piloto combustible, cámara de combustión, pieza de transición) por nuevos diseños.

Se observa la presencia de un dato sospechoso atípico en el gráfico de puntos de la Figura 3.11, perteneciente a la inspección de combustión realizada en septiembre del 2010.

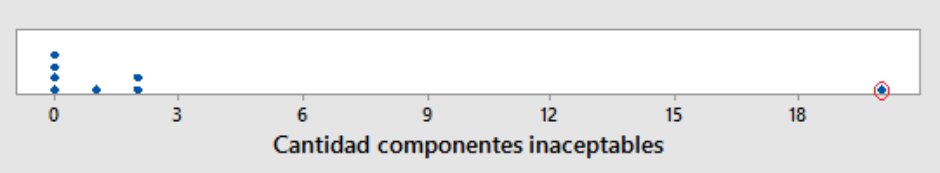


Figura 3.11: Gráfico de puntos pieza de transición SI1

Al evaluar este dato sospechoso con los criterios descritos en el capítulo 1.5 se obtiene los resultados presentados en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Resumen dato sospechoso pieza de transición SI1

Dato sospechoso	Criterio	Valor criterio	Valor critico (5%)	¿Dato atípico?
27-Sept-2010	Estadístico T	2,454	2,032	Si

Estadísticamente el dato sospechoso puede ser declarado como dato atípico. Por otro lado, la razón física que apoya esta prueba estadística es que para valores similares o mayores de las variables operacionales de otros periodos de operación, no se producen modos de falla sobre los límites aceptables en tantos componentes como sucede aquí. Lo que hace suponer una menor calidad en estos componentes.

- *Alabe fijo de 1° etapa*

En la inspección de combustión de mayo 2005 comienza el uso de componentes con el inicio en el número de serie 7F1C, anteriormente a esta inspección los números de serie iniciaban en 975C, 985C, 995F. Este cambio supone una mejora en la calidad de los componentes, comprobable en que los modos de fallas se presentan en mayor cantidad antes de este cambio.

- *Alabe fijo de 2° etapa*

Luego de la inspección de noviembre del 2000 los componentes que se instalan en la turbina son de mayor calidad, esto se comprueba en que los componentes que salen en las inspecciones siguientes presentan menor cantidad de modos de falla que las anteriores a esta inspección (incluida).

Por otro lado, se observa la presencia de un dato sospechoso atípico en el gráfico de puntos de la Figura 3.12, perteneciente a la inspección de turbina realizada en junio del 2008.

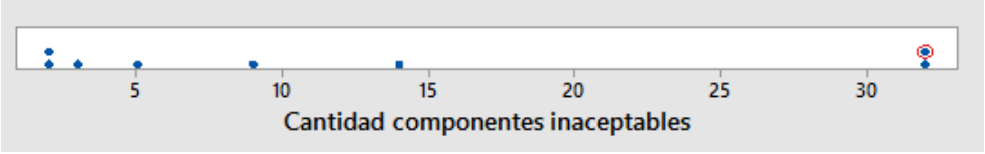


Figura 3.12: Gráfico de puntos alabe fijo de 2° etapa SI1

Al evaluar este dato sospechoso con los criterios descritos en el capítulo 1.5 se obtiene los resultados presentados en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Resumen dato sospechoso alabe fijo de 2° etapa SI1

Dato sospechoso	Criterio	Valor criterio	Valor critico (5%)	¿Dato atípico?
12-Jun-2008	Estadístico T	1,536	2,032	No

Estadísticamente no se considera este dato como atípico, sin embargo se considera un dato atípico ya que estos componentes sobrepasan el límite de aceptabilidad por perdida severa de recubrimiento, lo que no sucede con otros componentes con similares valores de variables operacionales o que le sobrepasan. Esto hace suponer que la calidad (o espesor) de recubrimiento es menor en estos componentes.

- *Alabe fijo de 3° etapa*

No hay indicaciones.

- *Alabe fijo de 4° etapa*

No hay indicaciones.

- *Alabe móvil de 1° etapa*

Se produce un cambio en el número de serie de los alabes el 1-oct-2004, de la serie que inicia en 979, 989, 999 a la serie 7F1S0, esto supone una mejora en las piezas, sin embargo al analizar todos los datos (incluyendo los anteriores a 1-oct-2004) no se observa ninguna relación entre ellos y las variables operacionales, esto mismo ocurre con los datos después

del 1-oct-2004, en donde no se observan relaciones a simple vista. Por lo tanto, a modo de homogeneizar los datos en cierta medida, se consideran solo los datos después de 1-oct-2004.

- *Alabe móvil de 2° etapa*

No hay indicaciones.

- *Alabe móvil de 3° etapa*

Se observa la presencia de un dato sospechoso atípico en el gráfico de puntos de la Figura 3.13, perteneciente a la inspección de combustión realizada en septiembre del 2010.

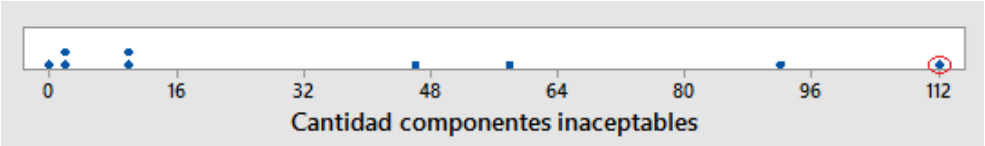


Figura 3.13: Gráfico de puntos alabe móvil de 3° etapa SI1

Al evaluar este dato sospechoso con los criterios descritos en el capítulo 1.5 se obtiene los resultados presentados en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Evaluación dato sospechoso alabe móvil de 3° etapa SI1

Dato sospechoso	Criterio	Valor criterio	Valor critico (5%)	¿Dato atípico?
27-sept-2010	Estadístico T	1,764	2,110	No

Este dato si bien estadísticamente no es atípico se considera como tal, ya que los valores de las variables operacionales no son, comparativamente con otros periodos de operación, tan extremas como para producir 112 componentes inaceptables (la totalidad de los componentes

instaladas en la turbina), por lo que esto supone una baja calidad en los componentes instalados en este periodo de operación.

- *Alabe móvil de 4° etapa*

Se observa la presencia de un dato sospechoso atípico en el gráfico de puntos de la Figura 1.1, perteneciente a la inspección de combustión realizada en octubre del 2004:

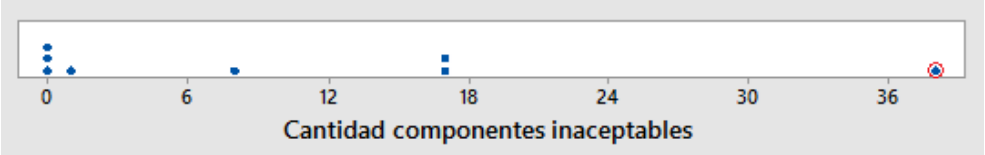


Figura 3.14: Gráfico de puntos alabe móvil de 4° etapa SI1.

Al evaluar este dato sospechoso con los criterios descritos en el capítulo 1.5 se obtiene los resultados presentados en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12: Evaluación dato sospechoso alabe móvil de 4° etapa SI1.

Dato sospechoso	Criterio	Valor criterio	Valor critico (5%)	¿Dato atípico?
01-oct-2004	Estadístico T	2,072	2,032	Si

Estadísticamente el dato sospechoso puede ser declarado como dato atípico. Por otro lado, la razón física que apoya esta prueba estadística es que para valores similares o mayores de las variables operacionales de otros periodos de operación, no se producen modos de falla sobre los límites aceptables en tantos componentes como sucede aquí. Lo que hace suponer una menor calidad en estos componentes.

- *Ring segment de 1° etapa*

Mucha variabilidad constructiva.

- *Ring segment de 2° etapa*

Se elimina el dato de la inspección 01-oct-04 por tratarse de un dato muy particular: es la primera inspección donde estos componentes son retirados, después de su instalación en el año 1997, y todos los componentes están en condiciones aceptables.

- *Ring segment de 3° etapa*

No hay indicaciones.

- *Ring segment de 4° etapa*

No hay indicaciones.

3.2.2 San Isidro 2, TG2

- *Tobera piloto principal*

Se cambió el diseño en el sistema de combustión: en las cámaras de combustión y toberas de inyección (gas, petróleo y principal). Se cambia el sistema de tipo difusión FDF-42 a uno de bajas emisiones de *NOx* denominado *DNL* (*Dry Low NOx type*). Se realiza en la inspección de combustión del 12 de Agosto del 2009.

- *Tobera piloto gas*

Se cambió el diseño en el sistema de combustión: en las cámaras de combustión y toberas de inyección (gas, petróleo y principal). Se cambia el sistema de tipo difusión FDF-42 a uno de bajas emisiones de *NOx* denominado *DNL* (*Dry Low NOx type*). Se realiza en la inspección de combustión del 12 de Agosto del 2009.

Además se advierte un dato sospechoso en el gráfico de puntos de la *Figura 22*, perteneciente a la inspección de combustión realizada en enero 2014.

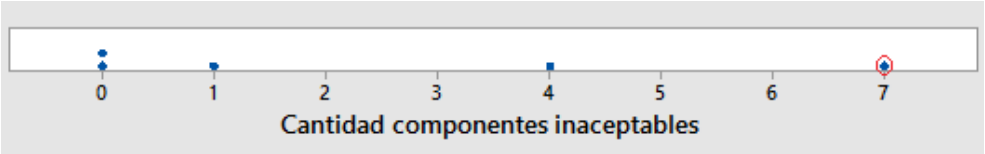


Figura 3.15: Gráfico de puntos tobera piloto gas SI2.

Al evaluar este dato sospechoso con los criterios descritos en el capítulo 1.5 se obtiene los resultados presentados en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13: Resumen evaluación dato sospechoso tobera piloto gas SI2.

Dato sospechoso	Criterio	Valor criterio	Valor critico (5%)	¿Dato atípico?
07-ene-2014	Estadístico T	1,508	1,672	No

Se aprecia que estadísticamente el dato sospechoso no es un dato atípico, sin embargo se advierte que las condiciones operacionales de este periodo de operación no superan las de otros periodos que poseen menos o cero componentes inaceptables, por lo que se puede

suponer una baja calidad en los componentes instalados en este periodo de operación. Luego el dato es atípico.

- *Tobera piloto petróleo*

Se cambió el diseño en el sistema de combustión: en las cámaras de combustión y toberas de inyección (gas, petróleo y principal). Se cambia el sistema de tipo difusión FDF-42 a uno de bajas emisiones de *NOx* denominado *DNL* (*Dry Low NOx type*). Se realiza en la inspección de combustión del 12 de Agosto del 2009.

- *Cámara de combustión*

Se cambió el diseño en el sistema de combustión: en las cámaras de combustión y toberas de inyección (gas, petróleo y principal). Se cambia el sistema de tipo difusión FDF-42 a uno de bajas emisiones de NOx denominado DNL (Dry Low NOx type). Se realiza en la inspección de combustión del 12 de Agosto del 2009.

Además se advierte un dato sospechoso en el gráfico de puntos de la Figura 3.16, perteneciente a la inspección de combustión realizada en enero 2014.

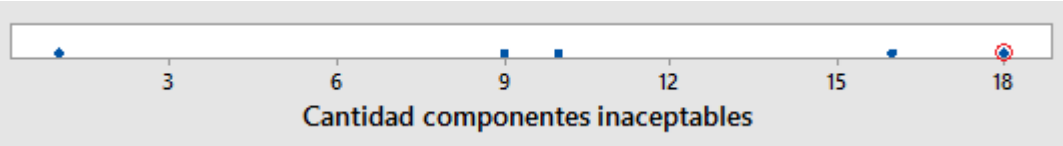


Figura 3.16: Gráfico de puntos cámara de combustión SI2.

Al evaluar este dato sospechoso con los criterios descritos en el capítulo 1.5 se obtiene los siguientes resultados presentados en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14: Evaluación dato sospechoso cámara de combustión SI2.

Dato sospechoso	Criterio	Valor criterio	Valor critico (5%)	¿Dato atípico?
07-ene-2014	Estadístico T	1,077	1,672	No

Como se observa en la Tabla 3.14 el dato sospechoso no cumple las condiciones para ser estadísticamente atípico, sin embargo se puede suponer una baja calidad constructiva en los componentes de este periodo de operación ya que las variables operacionales no superan o son menores para las mismas variables de otros periodos de operación. Lo anterior se ejemplifica con los valores de *Horas equivalentes* el cual para este periodo es de 11.115 [eoh] alcanzando 18 componentes inaceptables, para el periodo de operación que culmina con la inspección en noviembre 2010 se tienen 11.429 [eoh] alcanzando 10 componentes inaceptables, y finalmente para la inspección de agosto 2015 se tienen 13.485 [eoh] alcanzando 16 componentes inaceptables. Luego el dato es atípico.

- *Pieza de transición*

No hay indicaciones.

- *Alabe fijo de 1° etapa*

No hay indicaciones.

- *Alabe fijo de 2° etapa*

No hay indicaciones.

- *Alabe fijo de 3° etapa*

No hay indicaciones.

- *Alabe fijo de 4° etapa*

No hay indicaciones.

- *Alabe móvil de 1° etapa*

No hay indicaciones.

- *Alabe móvil de 2° etapa*

No hay indicaciones.

- *Alabe móvil de 3° etapa*

No hay indicaciones.

- *Alabe móvil de 4° etapa*

No hay indicaciones.

- *Ring segment de 1° etapa*

Se advierte un dato sospechoso en el gráfico de puntos de la Figura 3.17, perteneciente a la inspección de combustión realizada en agosto 2015.

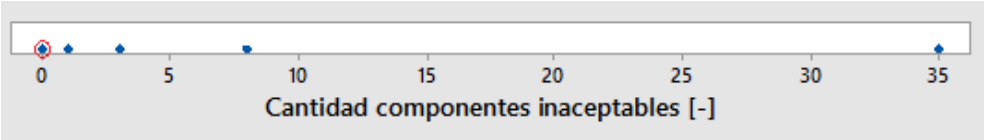


Figura 3.17: Gráfico de puntos ring segment de 1° etapa SI2.

Al evaluar este dato sospechoso con los criterios descritos en el capítulo 1.5 se obtiene los siguientes resultados presentes en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15: Evaluación dato sospechoso ring segment de 1° etapa SI2.

Dato sospechoso	Criterio	Valor criterio	Valor critico (5%)	¿Dato atípico?
31-ago-2015	Estadístico T	0,642	1,672	No

Como se advierte en la Tabla 3.15 el dato sospechoso no cumple estadísticamente con las condiciones para ser un dato atípico, sin embargo se observa que las variables operacionales de este periodo de operación superan casi todas a otros periodos, teniendo 24.599 [eoh] de *Horas equivalentes* y se obtienen cero componentes inaceptables, para la inspección de noviembre 2012 se tienen 16.897 [eoh] de *Horas equivalentes* y se obtienen 35 componentes inaceptables, y sucede algo similar con otros periodos de operación, por lo que se puede suponer que para este dato sospechoso la calidad constructiva de los componentes es mayor con respecto a los demás. Luego el dato es atípico.

- *Ring segment de 2° etapa*

No hay indicaciones.

- *Ring segment de 3° etapa*

No hay indicaciones.

- *Ring segment de 4° etapa*

No hay indicaciones.

El resumen del resultado del análisis y depuración de la información histórica se presenta en los anexos A-7, para SI1, y anexo A-8 para SI2.

3.3 Análisis de Criticidad AC

3.3.1 Frecuencia de falla

Para obtener la frecuencia de falla se estudió la cantidad de componentes inaceptables entre inspecciones programadas.

Estos componentes inaceptables son elegidas como tal por el fabricante de la turbina (encargado de realizar las inspecciones) en las diferentes intervenciones realizadas a lo largo del tiempo bajo criterios estrictos usando diferentes métodos de inspección, principalmente inspección visual (*VT: Visual Test*) y test de tinta penetrante (*PT: Dye Penetrant Test*). Usando la información emanada de los diferentes informes que el fabricante hace entrega a la central se pudo obtener la frecuencia de ocurrencia de alguna falla o componente inaceptable.

La forma de calcular la frecuencia de ocurrencia es con la ecuación (1.2), donde el tiempo t son las *horas equivalentes de operación (EOH)* los resultados se muestran en las siguiente Tabla 3.16 y Tabla 3.17.

Tabla 3.16: Frecuencia porcentaje componentes inaceptables en 10.000 [eoh] SI1.

Componentes expuestos a altas temperaturas	[% componentes inaceptables/10.000EOH]
Tobera piloto principal	5,59
Tobera piloto gas	19,57
Tobera piloto petróleo	19,57
Cámara de combustión	22,23
Pieza de transición	7,74
Alabe fijo 1R	31,25
Alabe fijo 2R	17,15
Alabe fijo 3R	17,99
Alabe fijo 4R	12,95
Alabe móvil 1R	31,08
Alabe móvil 2R	1,84
Alabe móvil 3R	14,50
Alabe móvil 4R	3,48
Ring segment 1R	9,65
Ring segment 2R	5,11
Ring segment 3R	0,00
Ring segment 4R	0,00

Tabla 3.17: Frecuencia porcentaje componentes inaceptables en 10.000 [eoh] SI2

Componentes expuestos a altas temperaturas	[% piezas inaceptables/10.000EOH]
Tobera piloto principal	7,42
Tobera piloto gas	10,30
Tobera piloto petróleo	14,83
Cámara de combustión	40,28
Pieza de transición	18,28
Alabe fijo 1R	39,87
Alabe fijo 2R	16,64
Alabe fijo 3R	0,00
Alabe fijo 4R	13,65
Alabe móvil 1R	39,67
Alabe móvil 2R	57,84
Alabe móvil 3R	12,66
Alabe móvil 4R	0,00
Ring segment 1R	13,95

Ring segment 2R	0,00
Ring segment 3R	0,00
Ring segment 4R	0,00

Se puede observar que para ambas unidades la pieza que posee un valor más alto de probabilidad de piezas inaceptables en 10.000 EOH es la cámara de combustión.

3.3.2 Impacto

Para obtener el impacto o gravedad de la ocurrencia de una falla se evalúan varios posibles impactos que algún modo de falla podría ocasionar, los más comunes son los siguientes:

- Impacto en seguridad
- Impacto en el medio ambiente
- Impacto en pérdidas de producción
- Impacto en costos de reparación

Sin embargo en nuestro caso el impacto en seguridad es nulo ya que no existe riesgo que los modos de falla analizados produzcan daños a algún operario o persona. Por otro lado, el impacto en la producción también es muy bajo o nulo ya que el fabricante utilizó un factor de seguridad alto para evitar que fallas durante la operación produzcan una falla en la turbina, la cual podría ser catastrófica, además los componentes son reemplazados en inspecciones programadas, por lo que no hay un disminución de la disponibilidad esperada de la máquina. Finalmente el impacto en esta máquina en particular se evalúa de la siguiente manera:

$$I = IMA + ICR \qquad (3.1)$$

Donde, I: Impacto, IMA: Impacto en el medio ambiente, ICR: Impacto en costos de reparación.

Para evaluar los impactos antes mencionados se crearon tablas que permiten cuantificar de una manera cualitativa el impacto generado por la "falla" de alguna pieza, estas tablas fueron evaluadas y ratificadas por un profesional con conocimiento y experiencia en el tema estudiado. La Figura 3.18 presenta la tabla que permite evaluar el impacto.

Puntaje	Medio ambiente	Costos de reparacion (Costo de pieza por unidad de pieza reemplazada)
5	Riesgo de daños irreversibles al ambiente a largo plazo, que violen normas ambientales	Entre 59.420 US$- 73.700 US$
4	Riesgo de daño medioambiental a largo plazo	Entre 45.140 US$- 59.420 US$
3	Riesgo de daño medio ambiental a corto plazo	Entre 30.860 US$- 45.140 US$
2	Riesgo de daño medioambiental menor, sin violacion a las normal ambientales	Entre 16.580 US$- 30.860 US$
1	Sin riesgo de daño medioambiental	Menor a 16.580 US$

Figura 3.18: Tabla evaluación impacto, Análisis de criticidad.

Así también, con ayuda de personal calificado en el tema, se procedió a evaluar el impacto de cada componente expuesto a alta temperatura, el resultado de lo anterior se muestra en la siguiente Tabla 3.18.

Tabla 3.18: Impacto en componentes expuestos a altas temperaturas en TG, central termoeléctrica San Isidro.

Pieza	Medio ambiente	Costos de reparación (Costo de pieza por unidad de pieza reemplazada)	Impacto (I)
Tobera piloto principal	3	5	8
Tobera piloto gas	3	5	8

Tobera piloto petróleo	3	5	8
Cámara de combustión	3	5	8
Pieza de transición	1	5	6
Alabe fijo 1R	1	3	4
Alabe fijo 2R	1	4	5
Alabe fijo 3R	1	3	4
Alabe fijo 4R	1	5	6
Alabe móvil 1R	1	2	3
Alabe móvil 2R	1	2	3
Alabe móvil 3R	1	1	2
Alabe móvil 4R	1	2	3
Ring segment 1R	1	1	2
Ring segment 2R	1	1	2
Ring segment 3R	1	1	2
Ring segment 4R	1	1	2

3.3.3 Criticidad

Finalmente, para obtener la criticidad de cada componente expuesto a alta temperatura se realiza el producto entre Frecuencia (*F*) e Impacto (*I*), $C = F \times I$, por lo que se tienen los siguientes resultados presentados en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19: Criticidad componentes expuestos a altas temperaturas.

Componente	Criticidad (C) San Isidro 1	Criticidad (C) San Isidro 2
Tobera piloto principal	45	59
Tobera piloto gas	157	82
Tobera piloto petróleo	157	119
Cámara de combustión	178	322
Pieza de transición	46	110
Alabe fijo 1° etapa	125	159
Alabe fijo 2° etapa	86	83
Alabe fijo 3° etapa	72	0
Alabe fijo 4° etapa	78	82
Alabe móvil 1° etapa	93	119
Alabe móvil 2° etapa	5	174
Alabe móvil 3° etapa	29	25

Alabe móvil 4° etapa	10	0
Ring segment 1° etapa	19	28
Ring segment 2° etapa	10	0
Ring segment 3° etapa	0	0
Ring segment 4° etapa	0	0

Si ordenamos de mayor a menor los valores de criticidad obtenidos en el *AC* para ambas unidades obtenemos el *orden de* criticidad, valores que se presentan en la siguiente Tabla 3.20.

Tabla 3.20: Ordenes de criticidad para componentes expuestos a altas temperaturas.

Orden de criticidad	Componente SI1	Criticidad (C) SI1	Componente SI2	Criticidad (C) SI2
1°	Cámara de combustión	178	Cámara de combustión	322
2°	Tobera piloto gas	157	Alabe móvil 2° etapa	174
3°	Tobera piloto petróleo	157	Alabe fijo 1° etapa	159
4°	Alabe fijo 1° etapa	125	Tobera piloto petróleo	119
5°	Alabe móvil 1° etapa	93	Alabe móvil 1° etapa	119
6°	Alabe fijo 2° etapa	86	Pieza de transición	110
7°	Alabe fijo 4° etapa	78	Alabe fijo 2° etapa	83
8°	Alabe fijo 3° etapa	72	Tobera piloto gas	82
9°	Pieza de transición	46	Alabe fijo 4° etapa	82
10°	Tobera piloto principal	45	Tobera piloto principal	59
11°	Alabe móvil 3° etapa	29	Ring segment 1° etapa	28
12°	Ring segment 1° etapa	19	Alabe móvil 3° etapa	25
13°	Alabe móvil 4° etapa	10	Alabe fijo 3° etapa	0
14°	Ring segment 2° etapa	10	Alabe móvil 4° etapa	0
15°	Ring segment 2° etapa	5	Ring segment 2° etapa	0
16°	Ring segment 3° etapa	0	Ring segment 3° etapa	0
17°	Ring segment 4° etapa	0	Ring segment 4° etapa	0

Luego, los niveles de criticidad dividen las piezas en criticidad alta, media y baja para cada unidad generadora se presentan en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21: Niveles de criticidad piezas expuestas a altas temperaturas, San Isidro, Endesa.

Nivel	Criticidad	Componentes SI1	Componentes SI2
1	Alta	Cámara de combustión, Tobera piloto gas, Tobera piloto petróleo, Alabe fijo de 1° etapa, Alabe móvil de 1° etapa, Alabe fijo de 2° etapa.	Cámara de combustión, Tobera piloto petróleo, Pieza de transición, Alabe fijo de 1° etapa, Alabe móvil de 1° etapa, Alabe móvil de 2° etapa.
2	Media	Tobera piloto principal, Pieza de transición, Ring segment de 1° etapa, Alabe fijo de 3° etapa, Alabe móvil de 3° etapa, Alabe fijo de 4° etapa.	Tobera piloto principal, Tobera piloto gas, Ring segment de 1° etapa, Alabe fijo de 2° etapa, Alabe móvil de 3° etapa, Alabe fijo de 4° etapa.
3	Baja	Ring segment de 2° etapa, Alabe móvil de 2° etapa, Ring segment de 3° etapa, Ring segment de 4° etapa, Alabe móvil de 4° etapa.	Ring segment de 2° etapa, Alabe fijo de 3° etapa, Ring segment de 3° etapa, Ring segment de 4° etapa, Alabe móvil de 4° etapa.

3.4 Causas, modos y efectos de fallo en componentes expuestos a altas temperaturas en turbina a gas M701F

3.4.1 Causas de fallo

Se procederá a enumerar las diferentes causas que se identificaron, gracias a la revisión de bibliografía especializada [10], como las de mayor influencia en el desarrollo de algún daño o falla en los componentes expuestos a altas temperaturas y que potencialmente producen piezas inaceptables en las inspecciones.

1) Tipo de trabajo

Los tipos de trabajo de la turbina a gas se pueden clasificar en dos: Continuo y Cíclico. Según el tipo de trabajo las piezas reaccionan de manera diferente. Mientras que en el trabajo continuo se presentan daños por creep, oxidación y corrosión, en trabajo cíclico los daños se presentan por fatiga mecánica térmica.

2) Combustible

El uso de gas natural o petróleo afecta a los componentes, principalmente por la energía radiante liberada durante el proceso de combustión. El petróleo o diésel ciudad libera una mayor energía radiante, produciendo desgaste y corrosión por temperatura.

Además otra causa de fallo producto del combustible son los elementos que contienen y que pueden producir daños en las piezas. El petróleo o diésel frecuentemente contienen elementos corrosivos, tales como sodio, potasio, vanadio y plomo los cuales provocan una aceleración en la corrosión caliente (o por temperatura) en los inyectores de turbina y alabes. Además, algunos elementos de estos combustibles pueden causar sedimentos ya sea directamente o a través de compuestos formados con inhibidores que se utilizan para prevenir la corrosión. El gas natural, generalmente no contiene altos niveles de elementos corrosivos pero contaminantes dañinos externos pueden presentarse en estos combustibles cuando son entregados en el sitio, produciendo erosión y corrosión en válvulas de control e inyectores.

Producto de estos elementos o contaminantes en el combustible puede resultar finalmente en un bloqueo de los inyectores, lo que produce altas temperaturas en la sección de entrada de la turbina y puede provocar daños en los alabes de la misma.

3) Temperatura de combustión

A mayor temperatura de combustión el riesgo de provocar una falla por alta temperatura aumenta. Cuando se utiliza gas natural como combustible en la turbina la temperatura de combustión puede traer como consecuencia creep o rotura por fluencia en las piezas, en combustibles pesados que liberan cenizas, la temperatura de combustión puede ocasionar corrosión y sedimentación, además cuando se utiliza petróleo esta temperatura es mayor a cuando se utiliza gas natural.

4) Vapor/agua de inyección

Al adicionar agua a los gases calientes este aumenta su conducción, aumentando la transferencia de calor hacia los componentes, pudiendo aumentar la temperatura del metal. Luego si se inyecta agua a altas cargas de operación esto puede provocar que los componentes de combustión sufran daño por choque térmico. Esta práctica se realiza para refrigerar algunas piezas en la turbina, pero solo se usa cuando el combustible que se está quemando es petróleo.

5) Tiempo de encendido

El tiempo de encendido es una causa principalmente de estrés en el transiente térmico. Como la pieza se encuentra en reposo y con una temperatura baja, el tiempo en llegar a la temperatura de trabajo debe ser la adecuada para minimizar este efecto. Si el tiempo de encendido no es el adecuado, y es menor, se puede producir fatiga del material con creep o agrietamiento.

6) Frecuencia de encendido

El número de encendidos o la cantidad de partidas es una causa importante de deterioro en las piezas calientes debido al choque térmico, que ocurre tanto en el encendido y apagado de la turbina. Al igual que un tiempo de encendido mayor o no adecuado, una mayor cantidad de encendidos produce fatiga térmica en las piezas, aumentando la probabilidad de creep y agrietamiento.

7) Ciclos de carga

Rápidos y frecuentes cambios de carga pueden producir efectos negativos en las piezas. Este efecto es similar al efecto producido por frecuentes encendidos y detenciones, es decir se producen choques térmicos en las piezas. En las piezas calientes, un rápido cambio de carga produce un gradiente de temperatura alto el cual trae como consecuencia, si se produce con frecuencia, fatiga térmica. Estos son los denominados rechazos de carga y saltos de carga, en

donde la operación normal se ve afectada intempestivamente bajando o subiendo de manera anormal la potencia generada.

8) Medio ambiente

El aire que ingresa al compresor puede tener un efecto negativo en los componentes expuestos a altas temperaturas, ya que el aire atmosférico puede tener contaminantes que favorezcan el ensuciamiento, corrosión o abrasión, aumentando la probabilidad de desgaste en los componentes. Además, al igual que al adicionar agua a los gases calientes, al inyectar aire aumenta la transferencia de calor hacia las piezas, pudiendo aumentar la temperatura del metal. Luego las piezas pueden sufrir daño por choque térmico. Se utiliza aire para enfriar algunas piezas en la turbina cuando se quema gas natural.

9) Trip

Consiste en una detención intempestiva de la turbina. La turbina trabajando de forma transiente o estable puede sufrir de un "trip", es decir una detención completa de la máquina de forma brusca y rápida, lo que provoca grandes esfuerzos mecánicos y térmicos en las piezas.

10) Procesos de fabricación y/o reparación

El proceso de fabricación y/o reparación por parte del fabricante es de bajo conocimiento para la empresa, lo que produce que la calidad de las piezas sea producto de incertidumbre a la hora de obtener más o menos piezas inaceptables.

11) Prácticas de mantenimiento

Si existe una deficiente mantención de algún componente, esto puede afectar a los demás componentes, por ejemplo, si no existe una buena mantención de los inyectores, estos pueden

causar deterioro prematuro en las cámaras de combustión, alabes móviles y fijos de la turbina. Por otro lado, el no tener la precaución de una adecuada contabilización de la vida útil de las piezas puede provocar que mayor cantidad de componentes sean inaceptables si el uso sobrepasa la vida útil del mismo. Así mismo, el incorrecto montaje de los componentes en la turbina cuando se realiza una inspección o intervención puede provocar daños a los componentes, aumentando la probabilidad de obtener inaceptabilidad en estos.

3.4.2 Modos de fallo

Se identifican varios modos de fallo que afectan a los componentes críticos estos son:

1. Pérdida de recubrimiento o revestimiento
2. Reducción de pared
3. Pérdida de material
4. Grietas
5. Oxidación por alta temperatura
6. Deformación
7. Abolladuras
8. Obstrucción de vías de refrigeración
9. Depósito de elementos extraños
10. Pérdida de sello de cepillo
11. Signos de rozamiento entre piezas

Sin embargo solo los primeros 8 de estos modos de fallo producen componentes inaceptables tanto en la unidad SI1 como en la unidad SI2, es decir 8 modos de fallo sobrepasan el límite aceptable en los componentes. En la Tabla 3.22 y Tabla 3.23 se presentan los modos de fallo que traen como consecuencia inaceptabilidad en los componentes críticos expuestos a altas temperaturas, y para cada modo de fallo se presenta además el porcentaje de componentes que fueron encontrados inaceptables por el modo de fallo, del total de componentes inaceptables.

Cabe destacar que para el cálculo de este porcentaje de componentes inaceptables por modo de fallo, no fue posible abarcar todas las inspecciones, ya que solo de la inspección de

combustión realizada en el 2007, para el caso de SI1, se informa que modos de fallo están fuera de los rangos de aceptabilidad. Para el caso de SI2, como su inicio de operación es en febrero del 2007, para su primera inspección ya se informa los motivos de inaceptabilidad en los diferentes componentes.

Tabla 3.22: Componentes expuestos a altas temperaturas críticas y modos de fallo que producen inaceptabilidad, TG1 San Isidro 1.

Componente critico	Modos de fallo
Cámara de combustión	- Reducción de pared (12%) - Pérdida de material (8%) - Grietas (84%) - Oxidación por alta temperatura (20%) - Deformación (8%)
Tobera piloto gas y tobera piloto petróleo	- Grietas (63%) - Deformación (38%)
Alabe fijo de 1° etapa	- Pérdida de recubrimiento (53%) - Reducción de pared (16%) - Grietas (36%) - Oxidación por alta temperatura (4%) - Abolladuras (1%)
Alabe móvil de 1° etapa	- Pérdida de recubrimiento (87%) - Grietas (2%) - Abolladuras (1%) - Obstrucción de vías de refrigeración (96%)
Alabe fijo de 2° etapa	- Reducción de pared (16%) - Pérdida de material (20%) - Grietas (73%) - Oxidación por alta temperatura (16%) - Deformación (7%)

Tabla 3.23: Componentes expuestos a altas temperaturas críticos y sus modos de fallo que producen inaceptabilidad, TG2 San Isidro II.

Componente critico	Modos de fallo
Cámara de combustión	- Reducción de pared (28%) - Pérdida de material (36%) - Grietas (61%) - Oxidación por alta temperatura (31%) - Deformación (14%)
Tobera piloto petróleo	- Deformación (100%)
Pieza de transición	- Pérdida de recubrimiento (3%) - Pérdida de material (66%) - Grietas (31%)
Alabe fijo de 1° etapa	- Pérdida de recubrimiento (12%) - Reducción de pared (47%) - Pérdida de material (23%) - Grietas (70%) - Oxidación por alta temperatura (2%) - Obstrucción de vías de refrigeración (1%)
Alabe móvil de 1° etapa	- Pérdida de recubrimiento (85%) - Abolladuras (1%) - Obstrucción de vías de refrigeración (100%)
Alabe móvil de 2° etapa	- Pérdida de recubrimiento (100%)

3.4.3 Efectos de fallo

Las causas antes descritas provocan de alguna manera los modos de fallo antes nombrados, lo cual finalmente trae como consecuencia que un componente sea catalogado como inaceptable, produciendo una disminución en el rendimiento de la turbina mientras este componente no sea reemplazado.

3.4.4 Tablas Funcionalidad-Modos de fallo-Causas

Para relacionar los componentes críticos con sus modos de fallo que producen inaceptabilidad y además con las posibles causas que producen estos modos de fallo se construyen las tablas *Funcionalidad-Modos de fallo-Causas*, presentes para San Isidro 1 en la Tabla 3.24, Tabla 3.25, Tabla 3.26, Tabla 3.27 y Tabla 3.28, y para la unidad San Isidro 2 en la Tabla 3.29, Tabla 3.30, Tabla 3.31, Tabla 3.32, Tabla 3.33 y Tabla 3.34.

Tabla 3.24: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para cámara de combustión SI1.

Funcionalidad	*Modos de falla*	*Causas*
Soportar y crear un ambiente adecuado para la correcta combustión, asegurando que los flujos de aire y combustible se mezclen adecuadamente, conteniendo y soportando las altas temperaturas de los gases calientes.	Reducción de pared	Uso de petróleo como combustible, contaminantes dañinos externos en el combustible gas, altas temperaturas de combustión con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Pérdida de material	Contaminantes dañinos externos en el combustible gas, altas temperaturas de quemado con gas
	Grietas	Tipo de trabajo continuo, altas temperaturas de combustión con gas, usar vapor/agua para refrigeración en uso de petróleo como combustible, tiempo inadecuado de encendido, alto número de partidas/apagados, ciclos de carga irregulares: rechazos y saltos de carga, refrigeración por aire en uso de gas como combustible, trips.
	Oxidación por alta temperatura	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible
	Deformación	Tipo de trabajo cíclico,

		inadecuado proceso de fabricación y/o reparación

Tabla 3.25: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para tobera piloto gas y tobera piloto petróleo SI1.

Funcionalidad	*Modos de falla*	*Causas*
Inyectar el combustible de forma apropiada para su correcta combustión y en los caudales necesarios.	Grietas	Tipo de trabajo continuo, altas temperaturas de quemado con gas, tiempo inadecuado de encendido, alto número de partidas/apagados, ciclos de carga irregulares: rechazos y saltos de carga, refrigeración por aire en uso de gas como combustible, trips.
	Deformación	Tipo de trabajo cíclico, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación

Tabla 3.26: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe fijo de 1° etapa SI1.

Funcionalidad	*Modos de falla*	*Causas*
Direccionar adecuadamente	Pérdida de recubrimiento	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Reducción de pared	Uso de petróleo como combustible, contaminantes dañinos externos en el combustible gas, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Grietas	Tipo de trabajo continuo,

el flujo de gases calientes provenientes de la sección de combustión hacia el alabe móvil de 1° etapa.		altas temperaturas de quemado con gas, usar vapor/agua para refrigeración en uso de petróleo como combustible, tiempo inadecuado de encendido, alto número de partidas/apagados, ciclos de carga irregulares: rechazos y saltos de carga, refrigeración por aire en uso de gas como combustible, trips
	Oxidación por alta temperatura	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible.

Tabla 3.27: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe móvil de 1° etapa SI1.

Funcionalidad	*Modos de falla*	*Causas*
Recibir el flujo de gases calientes direccionado por el alabe fijo de 1° etapa y ser la primera etapa en producir trabajo en el eje.	Pérdida de recubrimiento	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Pérdida de material	Contaminantes dañinos externos en el combustible gas, altas temperaturas de quemado con gas
	Grietas	Tipo de trabajo continuo, altas temperaturas de quemado con gas, usar vapor/agua para refrigeración en uso de petróleo como combustible, tiempo inadecuado de encendido, alto número de partidas/apagados, ciclos de carga irregulares: rechazos y saltos de carga, refrigeración por aire en uso de gas como combustible, trips.
	Abolladuras	El trabajo continuo con altas

		horas de operación produce erosión o abolladuras, presencia de elementos externos dañinos en el combustible, ingreso de elementos externos dañinos en la entrada de aire o inyección de agua.
	Obstrucción de vías de refrigeración	Presencia de elementos externos dañinos en el combustible (tanto en el gas como en el petróleo), ingreso de elementos externos dañinos en la entrada de aire o inyección de agua.

Tabla 3.28: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe fijo de 2° etapa SI1.

Funcionalidad	*Modos de falla*	*Causas*
Redireccionar de manera adecuada el flujo de gases calientes provenientes de la 1° etapa de trabajo hacia la 2° etapa.	Pérdida de recubrimiento	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Reducción de pared	Uso de petróleo como combustible, contaminantes dañinos externos en el combustible gas, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Grietas	Tipo de trabajo continuo, altas temperaturas de quemado con gas, usar vapor/agua para refrigeración en uso de petróleo como combustible, tiempo inadecuado de encendido, alto número de partidas/apagados, ciclos de carga irregulares: rechazos y saltos de carga, refrigeración

		por aire en uso de gas como combustible, trips
	Oxidación por alta temperatura	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible
	Abolladuras	El trabajo continuo con altas horas de operación produce erosión o abolladuras, presencia de elementos externos dañinos en el combustible, ingreso de elementos externos dañinos en la entrada de aire o inyección de agua.

Tabla 3.29: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para camara de combustion SI2.

Funcionalidad	*Modos de falla*	*Causas*
Soportar y crear un ambiente adecuado para la correcta combustión, asegurando que los flujos de aire y combustible se mezclen adecuadamente, conteniendo y soportando las altas temperaturas de los gases calientes.	Pérdida de recubrimiento	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Reducción de pared	Uso de petróleo como combustible, contaminantes dañinos externos en el combustible gas, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Pérdida de material	Contaminantes dañinos externos en el combustible gas, altas temperaturas de quemado con gas
	Grietas	Tipo de trabajo continuo, altas temperaturas de quemado con gas, usar vapor/agua para refrigeración en uso de petróleo como combustible, tiempo

		inadecuado de encendido, alto número de partidas/apagados, ciclos de carga irregulares: rechazos y saltos de carga, refrigeración por aire en uso de gas como combustible, trips.
	Oxidación por alta temperatura	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible
	Deformación	Tipo de trabajo cíclico, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación

Tabla 3.30: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para tobera piloto petróleo SI2.

Funcionalidad	*Modos de falla*	*Causas*
Inyectar el combustible de forma apropiada para su correcta combustión y en los caudales necesarios.	Deformación	Tipo de trabajo cíclico, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación

Tabla 3.31: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para pieza de transición SI2.

Funcionalidad	*Modos de falla*	*Causas*
Dirigir los gases de combustión a alta temperatura adecuadamente hacia la sección de turbina	Pérdida de recubrimiento	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Pérdida de material	Contaminantes dañinos externos en el combustible gas, altas temperaturas de quemado con gas
	Grietas	Tipo de trabajo continuo, altas temperaturas de

		quemado con gas, usar vapor/agua para refrigeración en uso de petróleo como combustible, tiempo inadecuado de encendido, alto número de partidas/apagados, ciclos de carga irregulares: rechazos y saltos de carga, refrigeración por aire en uso de gas como combustible, trips.

Tabla 3.32: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe fijo de 1° etapa SI2.

Funcionalidad	*Modos de falla*	*Causas*
Direccionar adecuadamente el flujo de gases calientes provenientes de la sección de combustión hacia el alabe móvil de 1° etapa.	Pérdida de recubrimiento	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Reducción de pared	Uso de petróleo como combustible, contaminantes dañinos externos en el combustible gas, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Pérdida de material	Contaminantes dañinos externos en el combustible gas, altas temperaturas de quemado con gas
	Grietas	Tipo de trabajo continuo, altas temperaturas de quemado con gas, usar vapor/agua para refrigeración en uso de petróleo como combustible, tiempo inadecuado de encendido, alto número de partidas/apagados, ciclos de carga irregulares: rechazos y saltos de carga, refrigeración

		por aire en uso de gas como combustible, trips.
	Oxidación por alta temperatura	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible
	Obstrucción de vías de refrigeración	Presencia de elementos externos dañinos en el combustible (tanto en el gas como en el petróleo), ingreso de elementos externos dañinos en la entrada de aire o inyección de agua.

Tabla 3.33: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe móvil de 1° etapa SI2.

Funcionalidad	*Modos de falla*	*Causas*
Recibir el flujo de gases calientes direccionado por el alabe fijo de 1° etapa y ser la primera etapa en producir trabajo en el eje.	Pérdida de recubrimiento	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación
	Obstrucción de vías de refrigeración	Presencia de elementos externos dañinos en el combustible (tanto en el gas como en el petróleo), ingreso de elementos externos dañinos en la entrada de aire o inyección de agua.
	Abolladuras	El trabajo continuo con altas horas de operación produce erosión o abolladuras, presencia de elementos externos dañinos en el combustible, ingreso de elementos externos dañinos en la entrada de aire o inyección de agua.

Tabla 3.34: Funcionalidad-Modos de fallo-Causas para alabe móvil de 2° etapa SI2.

Funcionalidad	*Modos de falla*	*Causas*
Recibir el flujo de gases calientes direccionado por el alabe fijo de 2° etapa y ser la segunda etapa en producir trabajo en el eje.	Perdida de recubrimiento	Tipo de trabajo continuo, uso de petróleo como combustible, altas temperaturas de quemado con petróleo, inadecuado proceso de fabricación y/o reparación

3.5 Análisis de regresión múltiple

Se realizara el análisis de regresión múltiple para cada componente expuesto a alta temperatura contemplados en este estudio y para ambas unidades generadoras.

3.5.1 Turbina a gas San Isidro 1 (SI1)

3.5.1.1 Tobera piloto principal

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: Se observa en la Figura 3.19 los diferentes gráficos de dispersión entre la variable dependiente *Componentes inaceptables* y las diferentes variables independientes operacionales (*Horas operación gas, Horas operación petróleo, Cantidad partidas, Cantidad trips*), en estos gráficos no se observan relaciones lineales o de otro tipo, esto se ratifica con los coeficientes de correlación lineal de Pearson en la Tabla 3.35, donde no se alcanza un grado de linealidad aceptable en ningún caso. Al no cumplir el supuesto de linealidad, y no presentar ningún tipo de relación entre la variable estudiada *Componentes inaceptables* y las variables operacionales, no es recomendable obtener un modelo que permita predecir la variable estudiada.

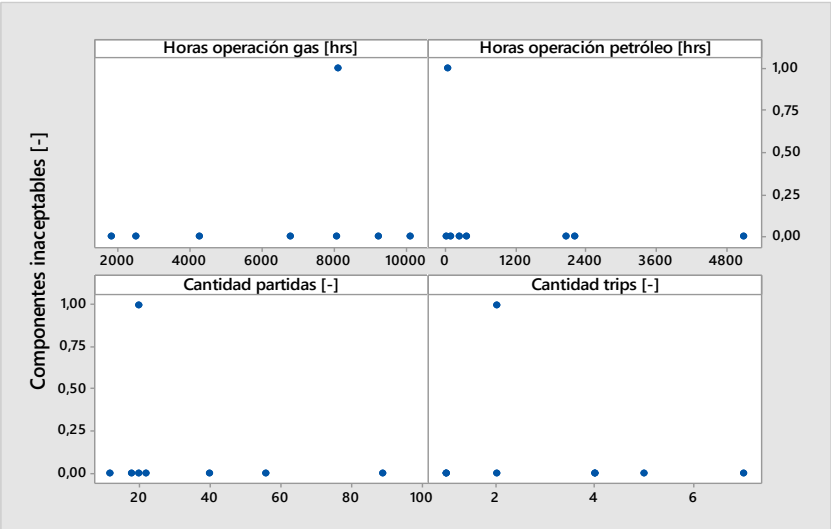


Figura 3.19: Gráficos de dispersión, datos tobera piloto principal SI1.

Tabla 3.35: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables Componentes inaceptables y variables operacionales, tobera piloto principal SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	0,227	0,589
Horas operación petróleo	-0,277	0,506
Cantidad partidas	-0,225	0,592
Cantidad trips	-0,238	0,570

3.5.1.2 Tobera piloto gas y tobera piloto petróleo

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: en la Figura 3.20 se presentan los diferentes gráficos de dispersión en donde no se observan relaciones (lineales o no) entre la variable dependiente y las independientes, lo anterior se ratifica con los coeficientes de correlación lineal presentados en la Tabla 3.36,

donde no se alcanza un grado de linealidad aceptable en ningún caso. Por lo tanto al no cumplir el supuesto de linealidad, y no presentar ningún tipo de relación entre la variable estudiada *Componentes inaceptables* y las variables operacionales, no es recomendable obtener un modelo que permita predecir la variable estudiada.

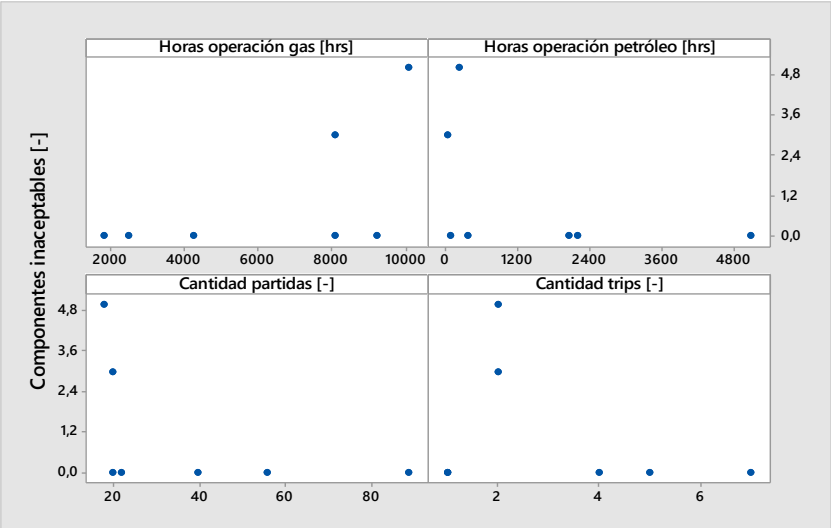


Figura 3.20: Gráficos de dispersión datos tobera piloto gas y tobera piloto petróleo SI1.

Tabla 3.36: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, tobera piloto gas y tobera piloto petroleo SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	0,594	0,160
Horas operación petróleo	-0,451	0,310
Cantidad partidas	-0,471	0,286
Cantidad trips	-0,330	0,470

3.5.1.3 Cámara de combustión

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: En la Figura 3.21 se observa en el gráfico de dispersión una posible relación entre la variable dependiente (*Componentes inaceptables*) y la variable independiente *Horas operación petróleo*.

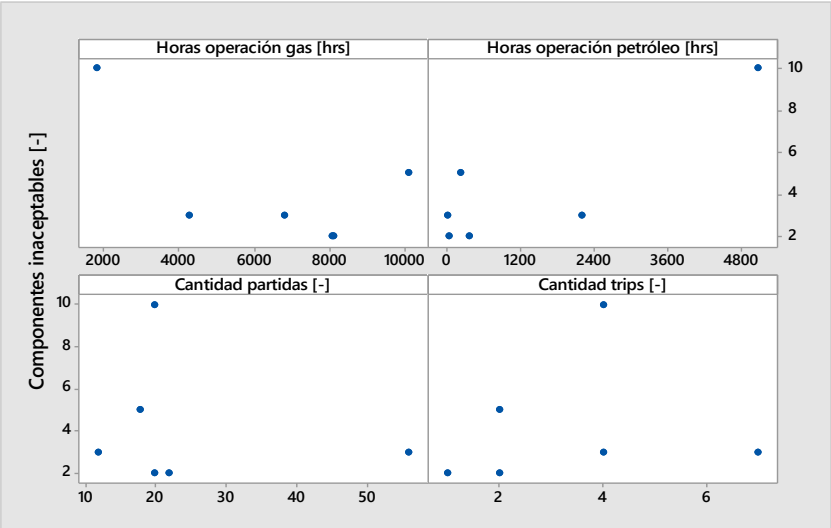


Figura 3.21: Gráficos de dispersión, datos cámara combustión SI1.

La relación entre ambas variables se verifica con el coeficiente de correlación de Pearson (Tabla 3.37) en donde se observa una alta correlación lineal entre las variables *Componentes inaceptables* y *Horas operación petróleo* (0,854) además de un nivel de significancia aceptable expresado en un valor *p* de 0,030. Las demás variables independientes, tal como se observa en la Figura 3.21, poseen una pobre relación con la variable dependiente *Componentes inaceptables*.

Tabla 3.37: Coeficiente de correlación de Pearson entre variables, cámara de combustión SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	-0,631	0,179
Horas operación petróleo	0,854	0,030

Cantidad partidas	-0,161	0,761
Cantidad trips	0,171	0,745

Normalidad: para corroborar si los datos cumplen con el supuesto de normalidad se evalúa la prueba de Anderson-Darling (AD) y se construye el grafico de probabilidad normal para las variables involucradas, los cuales se muestran en la Figura 3.22. Se observa en estos gráficos que el estadístico AD no alcanza el nivel exacto de significancia esperado (0,05) para ambas variables estudiadas, por lo que no se puede aceptar la hipótesis de distribución normal. La forma de los datos en el gráfico (un arco por encima de la diagonal) indica que los datos de ambas variables siguen una distribución asimétrica positiva, para la cual se recomienda una transformación a los datos de forma logarítmica para alcanzar normalidad. A estas variables transformadas se les aplica nuevamente la prueba AD y se obtiene los gráficos de probabilidad normal, los que se observan en la Figura 3.23.

En la Figura 3.23 se observa que el estadístico AD alcanza niveles exactos de significancia de *0,262* y *0,768*, por lo cual se puede aceptar la hipótesis que para ambas variables transformadas en forma logarítmica los datos siguen una distribución normal.

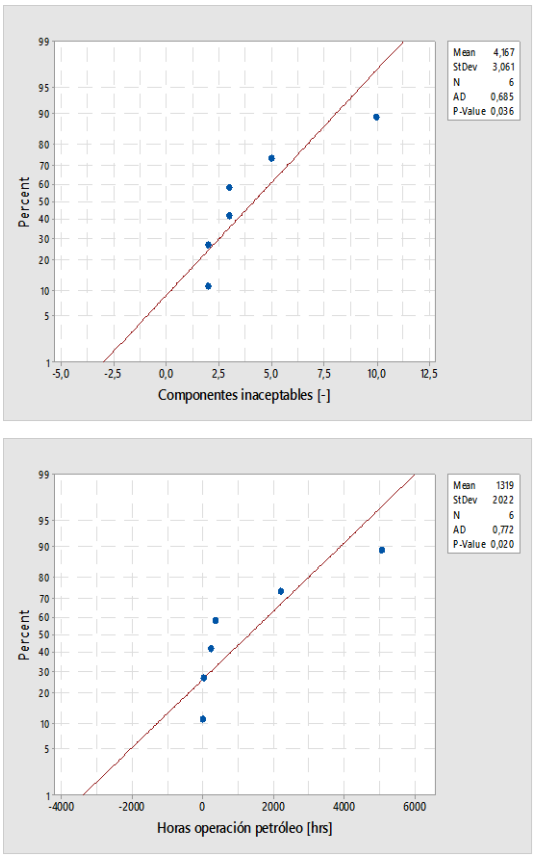


Figura 3.22: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Componentes inaceptables (izquierda), y Horas operación petróleo (derecha), cámara de combustión SI1.

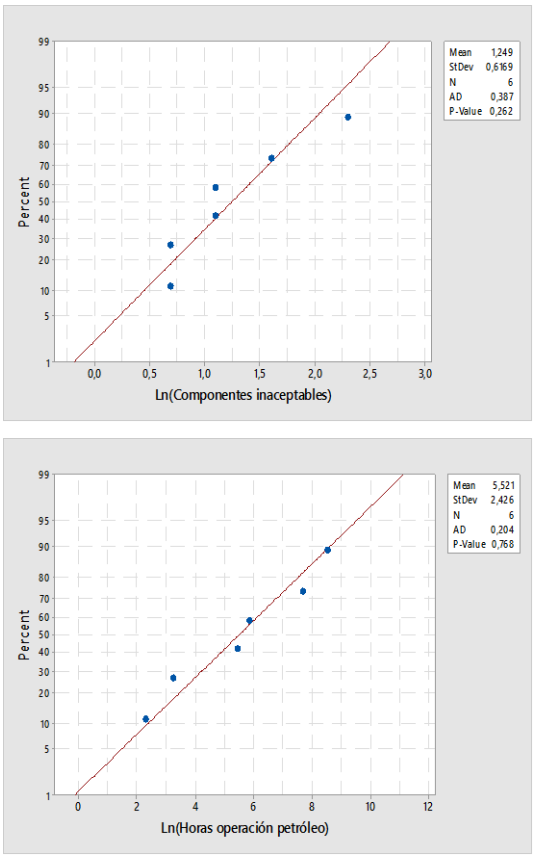


Figura 3.23: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Ln(Componentes inaceptables) (izquierda), y Ln(Horas operación petróleo) (derecha), cámara de combustión SI1.

- *Estimación del modelo de regresión*

Al ser solo dos variables involucradas en el modelo de regresión se trata entonces de una regresión simple para lo cual no es necesario elegir algún método para obtener el modelo. El programa Minitab arroja entonces los resultados presentados en el anexo A-9.

Se obtiene la siguiente ecuación de regresión:

$$Ln(Componentes\ inaceptables) = 0{,}432 + 0{,}148Ln(Horas\ operación\ petróleo) \qquad (3.1)$$

- *Valoración del modelo de regresión*

El modelo planteado no cumple con las expectativas. El valor exacto de significancia de los coeficientes esta sobre el valor esperado de 0,05, además la variación explicada por el modelo es solo de un 17,41%. Tal como se observa en el anexo A-9. Por lo tanto se rechaza el modelo propuesto.

3.5.1.4 Pieza de transición

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: en la Figura 3.24 se observa una relación no lineal entre la variable dependiente (*Componentes inaceptables*) y la variable independiente *Horas operación gas*. Para cumplir con el supuesto de linealidad entre las variables involucradas se realiza una transformación logarítmica de la variable dependiente ya que se observa que la relación no lineal posee una forma aproximada a una función exponencial. En la Tabla 3.38 se observa que el coeficiente de correlación lineal es levemente más alto entre las variables *Ln(Componentes inaceptables)/Horas operación gas* que entre las variables, por lo que se toma la decisión de obtener un modelo con estas primeras variables. No se observan otras relaciones significativas con la variable dependiente.

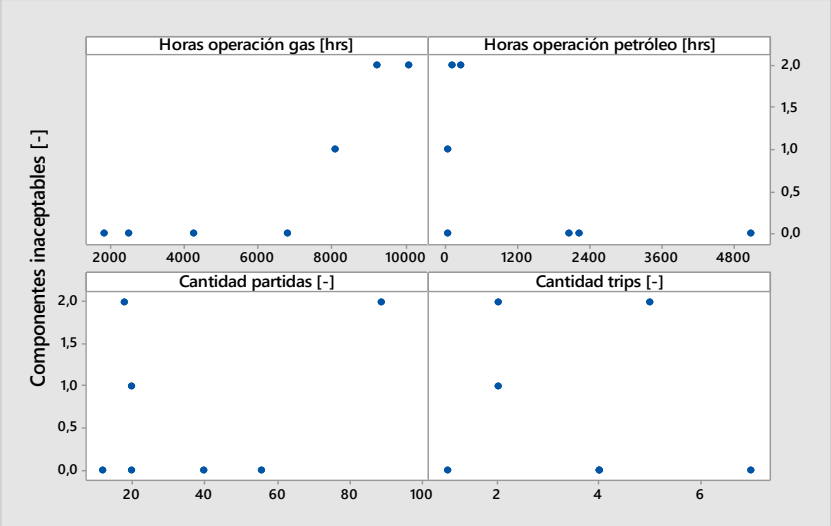


Figura 3.24: Gráficos de dispersión, datos pieza de transición SI1.

Tabla 3.38: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, y variable Ln(Componentes inaceptables) y variables operacionales, pieza de transición SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p	Ln(Componentes inaceptables)	Valor p
Horas operación gas	0,861	0,013	0,873	0,010
Horas operación petróleo	-0,579	0,173	-0,601	0,154
Cantidad partidas	0,327	0,474	0,294	0,522
Cantidad trips	-0,157	0,736	-0,188	0,686

Normalidad: en la Figura 3.25 se observa los gráficos de probabilidad normal, junto con el estadístico AD y su nivel exacto de significancia para las variables *Ln(Componentes inaceptables)* y *Horas operación gas.* Se puede observar que la variable operacional cumple con el nivel mínimo de significancia requerido con un *valor p* de *0,052*, sin embargo la variable dependiente no cumple con el nivel mínimo de significancia estadística con un *valor p* de *0,011* (recordemos que el nivel mínimo exacto de significancia requerido es de *0,050)*.

Se podría pensar que mediante una transformación a los datos de esta variable podría cambiar el escenario, sin embargo esto no es posible ya que más de la mitad de los datos es un mismo valor por lo que dificulta que el estadístico AD alcance valores más grandes que el requerido, por lo tanto no es posible aceptar la hipótesis de normalidad en esta variable, y finalmente no es posible proponer un modelo que posea una significancia estadística adecuada.

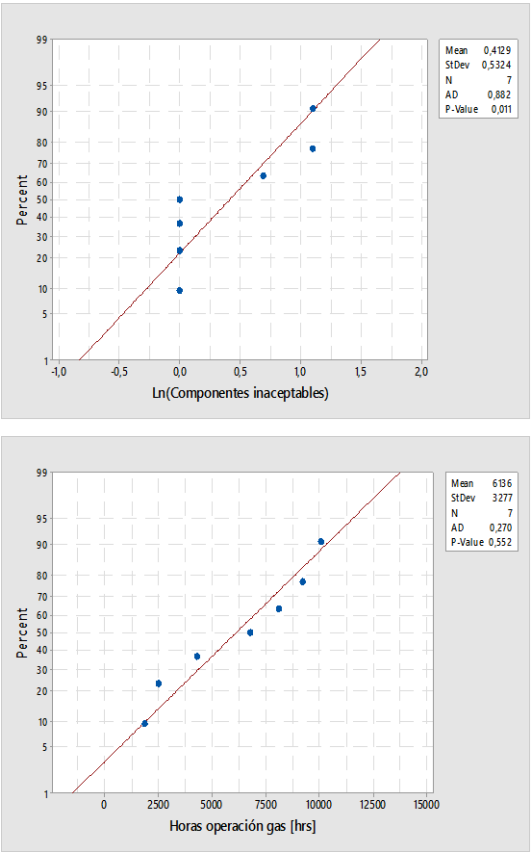


Figura 3.25: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Ln(Componentes inaceptables) (izquierda), y Horas operación gas (derecha), pieza de transición SI1.

3.5.1.5 Alabe fijo de 1° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: como se observa en la *Figura 28* existe una relación no lineal entre las variables *Componente inaceptable* y *Horas operación gas*. No se observan otras relaciones entre la variable dependiente y las demás variables operacionales independientes. Como la relación encontrada es no lineal y su forma aparente es exponencial, se realiza una transformación logarítmica de los datos de la variable *Componentes inaceptables*. Los resultados de los coeficientes de correlación lineal se muestran en la *Tabla 29*, ratificando la alta linealidad entre las variables *Ln(Componentes inaceptables+1)* y *Horas operación gas*, alcanzando un coeficiente de Pearson de *0,938* con un valor exacto de significancia de *0,006.*

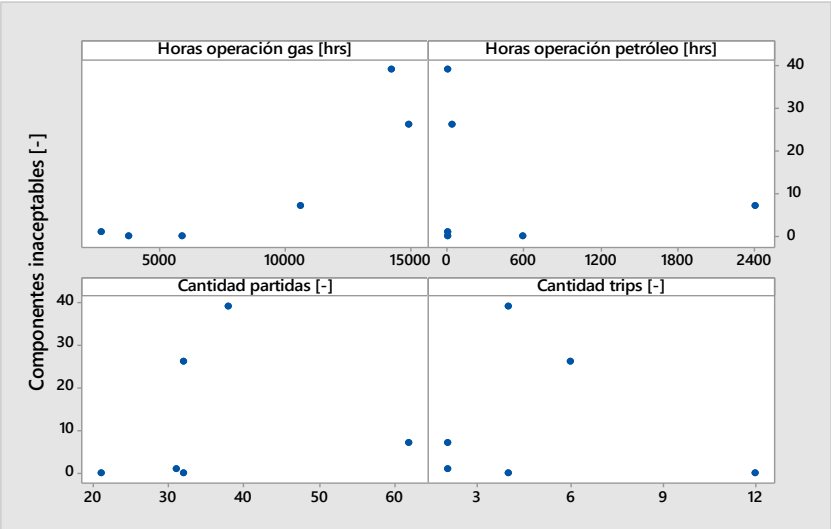


Figura 3.26: Gráficos de dispersión datos alabe fijo de 1° etapa SI1.

Tabla 3.39: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, y variable Ln(Componentes inaceptables) y variables operacionales, alabe fijo de 1° etapa SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p	Ln(Componentes inaceptables+1)	Valor p
Horas operación gas	0,880	0,021	0,938	0,006
Horas operación petróleo	-0,242	0,644	0,024	0,964

Cantidad partidas	0,132	0,803	0,394	0,439
Cantidad trips	-0,120	0,821	-0,284	0,585

Normalidad: en la *Figura 29* se encuentran los gráficos de probabilidad normal, valor de la prueba de Anderson-Darling (AD) y su nivel exacto de significancia para ambas variables con las cuales se desea construir el modelo de regresión. Se observa que se cumple con la hipótesis de normalidad ya que el valor exacto de significancia de la prueba estadística está por sobre el 0,05 en ambas variables: *0,298* y *0,391*.

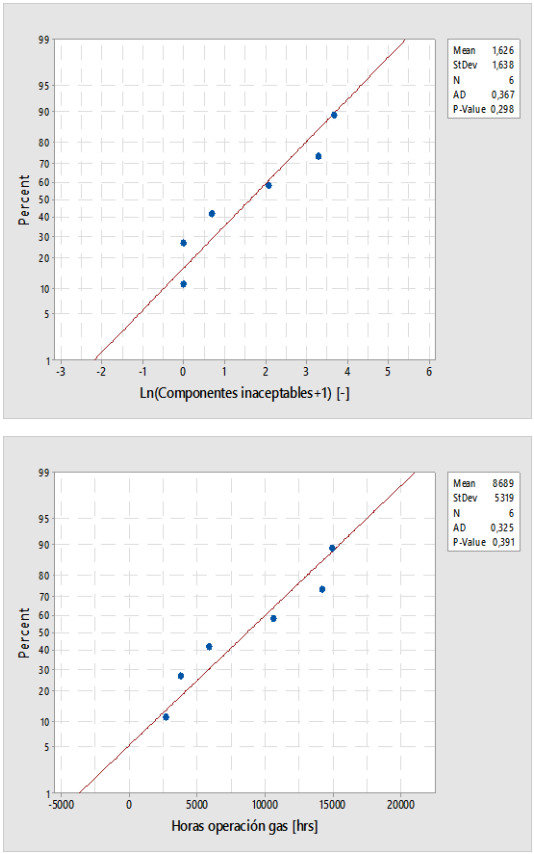


Figura 3.27: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Ln(Componentes inaceptables) (izquierda), y Horas operación gas (derecha), alabe fijo de 1° etapa SI1.

Cabe destacar que los supuestos de homocedasticidad y ausencia de errores correlacionados se analizaran una vez obtenido el modelo de regresión.

- *Estimación del modelo de regresión*

Al estimar el modelo Minitab arroja los resultados entregados en el anexo A-10. Siendo la ecuación de regresión la siguiente:

$$Ln(Componentes\ inaceptables + 1) = 0{,}000211(Horas\ operación\ gas) \qquad (3.2)$$

- *Valoración del modelo de regresión*

En el *Análisis de la varianza* del anexo A-10 se aprecia que la variación explicada por el modelo de regresión, en este caso por la variable independiente *Horas operación gas*, es bastante alta, con un SCP de la variable de *26,5504* y para el error un SCP de *0,5449*, además el estadístico F posee un valor exacto de significancia de *0,001* (menor al recomendado de *0,050*) por lo que la variable *Horas operación gas* tiene bastante influencia lineal sobre la variable dependiente.

En el *Resumen del modelo* del anexo A-10 se puede observar que R^2 *ajustada* tiene un valor de *88,83%* el cual es bastante bueno y nos dice que el *88,83%* de la variación en la variable dependiente esta explicada por el modelo, es decir, por la variable independiente *Horas operación gas.*

En *Coeficientes* del anexo A-10 se advierte que el coeficiente que acompaña a la variable *Horas operación gas* es estadísticamente significativo ya que posee un *valor p* de *0,006*.

Para evaluar el supuesto de homocedasticidad (varianza constante) se obtiene el grafico *Residuos v/s Valor teórico o ajustado*, obtenidos del modelo (Gráfico 3.1), donde no se

observa un patrón que nos permita dudar de la varianza constante, por lo tanto se cumple el supuesto de homocedasticidad.

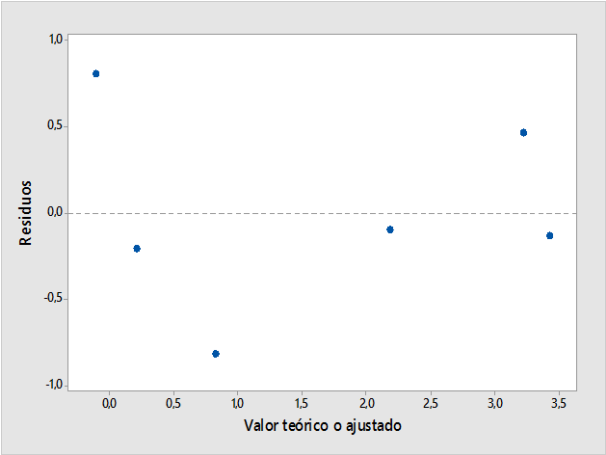


Gráfico 3.1: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, alabe fijo de 1° etapa SI1.

Para evaluar el supuesto de ausencia de errores correlacionados se obtiene el estadístico Durbin-Watson del modelo propuesto, alcanzando un valor de *2,55336*, buscando los valores en la tabla *Estadístico d de Durbin-Watson para un nivel de significancia de 0,05* (anexo A-4) se obtienen lo siguiente: $d_L = 0{,}610$ y $d_U = 1{,}400$. Luego el estadístico d obtenido se encuentra en el intervalo $d_U < d < 4 - d_U$, es decir, $1{,}400 < 2{,}55336 < 2{,}600$, por lo tanto se acepta la hipótesis de ausencia de errores o residuos correlacionados.

- *Predicción con el modelo de regresión*

Para el modelo propuesto se tiene que la varianza estimada de las perturbaciones es la siguiente:

$$\hat{\sigma}^2 = 0{,}6811$$

Luego con este valor se puede obtener la varianza ($Var(Y_0 - \hat{Y}_0)$) y el error estándar del modelo ($ee(Y_0 - \hat{Y}_0)$), y usando la *tabla de distribución t* para un gl de 4 ($gl = n - k$) para un nivel de significancia de 0,20 (20%) se tienen los valores de componentes inaceptables presentados en la Tabla 3.40.

Tabla 3.40: Límites para intervalos de predicción de componentes inaceptables (con un nivel de significancia de 0,20), alabe fijo de 1° etapa SI1.

$Horas\ operación\ gas\ [hrs]$	$Ln(Componentes\ inaceptables + 1)$		$Componentes\ inaceptables$	
	LI	LS	LI	LS
5.000	0,0231	2,8668	0	17
7.500	0,7951	3,5399	2	34
10.000	1,5163	4,2637	4	Max(40)
12.500	2,1871	5,0379	8	Max(40)
15.000	2,7881	5,8240	16	Max(40)

3.5.1.6 Alabe fijo de 2° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: en la Figura 3.28 se observa en los gráficos de dispersión una relación entre la variable dependiente *Componentes inaceptables* y dos variables operacionales independientes: *Horas operación gas* y *Cantidad de partidas.* Sin embargo la relación entre las variables *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas* tiene forma no lineal, aproximadamente exponencial, por lo que para alcanzar un mayor grado de linealidad entre las variables se realiza una transformación logarítmica de la variable *Componentes inaceptables.* Los coeficientes de correlación lineal entre la variable dependiente y las variables operacionales, así como también entre la variable dependiente transformada y las variables operacionales, se entregan en la Tabla 3.41. En esta tabla se ve que con la

transformación logarítmica de la variable *Componentes inaceptables*, el coeficiente de correlación aumenta para la variable *Horas operación gas*, sin embargo disminuye y se hace estadísticamente no significativa para la variable *Cantidad partidas*.

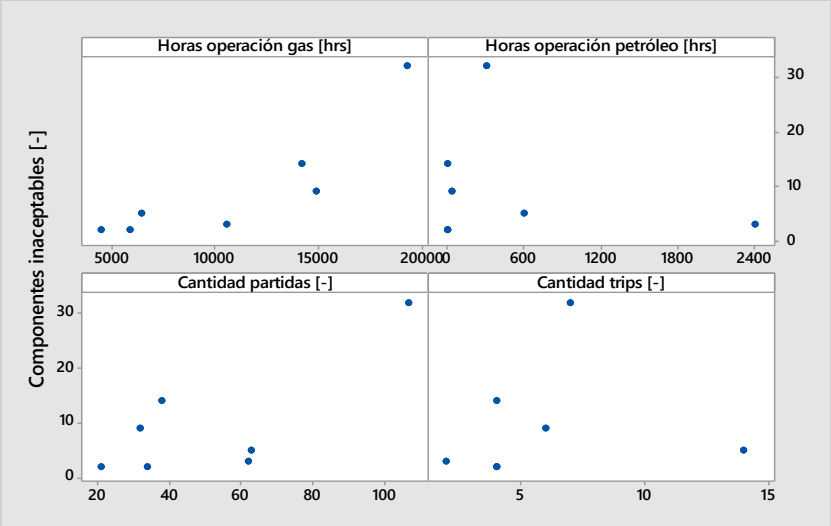


Figura 3.28: Gráficos de dispersión datos alabe fijo de 2° etapa SI1.

Tabla 3.41: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, y variable Ln(Componentes inaceptables) y variables operacionales, alabe fijo de 2° etapa SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p	Ln(Componentes inaceptables)	Valor p
Horas operación gas	0,862	0,013	0,920	0,003
Horas operación petróleo	-0,203	0,663	-0,212	0,649
Cantidad partidas	0,759	0,048	0,635	0,125
Cantidad trips	0,132	0,779	0,229	0,622

Normalidad: los gráficos de probabilidad normal y valores del estadístico AD para las variables *Ln(Componentes inaceptables)* y *Horas operación gas*, se encuentran en la Figura 3.29, en donde se observa que ambas cumplen con la hipótesis de normalidad, alcanzando valores exactos de significancia del estadistico AD de *0,595* y *0,520*, respectivamente.

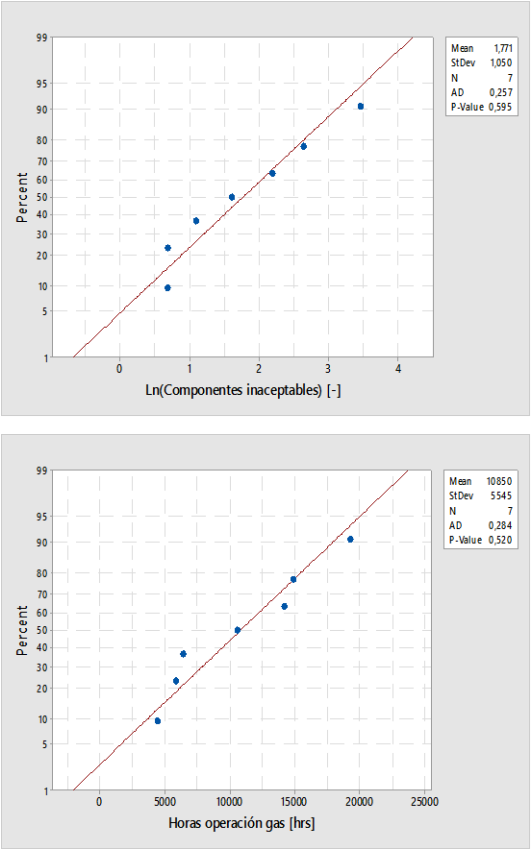


Figura 3.29: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para la variable Ln(Componentes inaceptable) (derecha) y Horas operación gas (izquierda), alabe fijo de 2° etapa SI1.

Cabe destacar que los supuestos de homocedasticidad y ausencia de errores correlacionados se analizaran una vez obtenido el modelo de regresión.

- *Estimación del modelo de regresión*

Al estimar el modelo Minitab arroja los resultados presentados en el anexo A-11. Siendo la ecuación de regresión la siguiente

$$Ln(Componentes\ inaceptables) = 0{,}000165(Horas\ operación\ gas) \qquad (3.3)$$

- *Valoración del modelo de regresión*

En el *Análisis de la varianza* del anexo A-11 se aprecia que la variación explicada por el modelo de regresión, en este caso por la variable independiente *Horas operación gas*, es alta, con un SCP de la variable de *27,526* y para el error un SCP de *0,1727*, además el estadístico F posee un valor exacto de significancia de *0,000* (menor al recomendado de *0,05*) por lo que la variable *Horas operación gas* tiene bastante influencia lineal sobre la variable dependiente.

En el *Resumen del modelo* del anexo A-11 se puede observar que R^2 *ajustada* tiene un valor de *95,77%* el cual es bastante bueno y nos dice que el *95,77%* de la variación en la variable dependiente esta explicada por el modelo, es decir, por la variable independiente *Horas operación gas.*

En *Coeficientes* del anexo A-11 se tiene que el coeficiente que acompaña a la variable *Horas operación gas* es estadísticamente significativo con un *valor p* muy pequeño de *0,000.*

Para evaluar el supuesto de homocedasticidad se obtiene el grafico de *residuos v/s valor teórico o ajustado* del modelo (Gráfico 3.2) y no se advierte ningún patrón que permita rechazar la hipótesis de varianza constante.

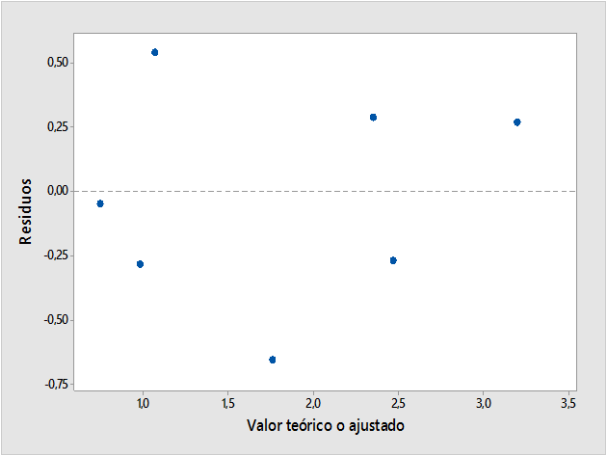


Gráfico 3.2: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, alabe fijo de 2° etapa SI1.

Para evaluar el supuesto de ausencia de errores o residuos correlacionados se obtiene el estadístico Durbin-Watson del modelo, que alcanza un valor de *2,24328*, buscando los valores en la tabla *Estadístico d de Durbin-Watson para un nivel de significancia de 0,05* (anexo A-4) se obtienen lo siguiente: $d_L = 0{,}700$ y $d_U = 1{,}356$. Luego el estadístico d obtenido se encuentra en el intervalo $d_U < d < 4 - d_U$, es decir, $1{,}400 < 2{,}24328 < 2{,}644$, por lo tanto se acepta la hipótesis de ausencia de errores o residuos correlacionados.

- *Predicción con el modelo de regresión*

Para el modelo propuesto se tiene que la varianza estimada de las perturbaciones es la siguiente:

$$\hat{\sigma}^2 = 0{,}2072$$

Luego con este valor se puede obtener la varianza ($Var(Y_0 - \hat{Y}_0)$) y el error estándar del modelo ($ee(Y_0 - \hat{Y}_0)$), y usando la *tabla de distribución t* para un gl de 5 ($gl = n - k$) para un nivel de significancia de 0,10 (10%) se tienen los valores de componentes inaceptables presentados en la Tabla 3.42.

Tabla 3.42: Límites para intervalos de predicción de componentes inaceptables (con un nivel de significancia de 0,20), alabe fijo de 2° etapa SI1.

$Horas\ operación\ gas\ [hrs]$	$Ln(Componentes\ inaceptables + 1)$		$Componentes\ inaceptables$	
	LI	LS	LI	LS
5.000	-0,2322	1,8822	1	7
7.500	0,2311	2,2439	2	10
10.000	0,6677	2,6323	2	14
12.500	1,0756	3,0494	3	22
15.000	1,4551	3,4949	5	Max(32)
17.500	1,8089	3,9661	7	Max(32)
19.300	2,0499	4,3191	8	Max(32)

3.5.1.7 Alabe fijo de 3° etapa

Por la poca cantidad de datos (solo 3 inspecciones han sido realizadas a este componente) no se puede realizar un análisis estadístico confiable.

3.5.1.8 Alabe fijo de 4° etapa

Por la poca cantidad de datos (solo 2 inspecciones han sido realizadas a este componente) no se puede realizar un análisis estadístico confiable.

3.5.1.9 Alabe móvil de 1° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: como se advierte en la Figura 3.30 en los diferentes gráficos de dispersión, no existe una relación entre la variable dependiente *Componentes inaceptables* y las variables operacionales independientes estudiadas, por lo que no se puede realizar un análisis de regresión adecuado. Lo anterior se ratifica con los bajos coeficientes de correlación lineal presentados en la Tabla 3.43.

Figura 3.30: Gráficos de dispersión de datos, alabe móvil de 1° etapa SI1.

Tabla 3.43: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, alabe móvil de 1° etapa SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	0,218	0,782
Horas operación petróleo	-0,285	0,715
Cantidad partidas	0,009	0,991
Cantidad trips	-0,717	0,283

3.5.1.10 Alabe móvil de 2° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: en la Figura 3.31 se aprecia que la variable dependiente *Componentes inaceptables* tiene una relación no lineal con la variable independiente *Horas operación gas*. No se advierte relación de ningún tipo con las demás variables independientes. Como la relación encontrada es no lineal y aproximadamente de forma exponencial, se le aplica una transformación logarítmica a la variable dependiente *Componentes inaceptables.* Los coeficientes de correlación lineal se presentan en la Tabla 3.44, donde se observa que a pesar de transformar la variable dependiente no se encuentran buenos valores de correlación lineal y que sean estadísticamente significativos, por lo tanto la posible relación encontrada no cumple con el supuesto de linealidad. Luego, no es estadísticamente valido obtener un modelo de estos datos.

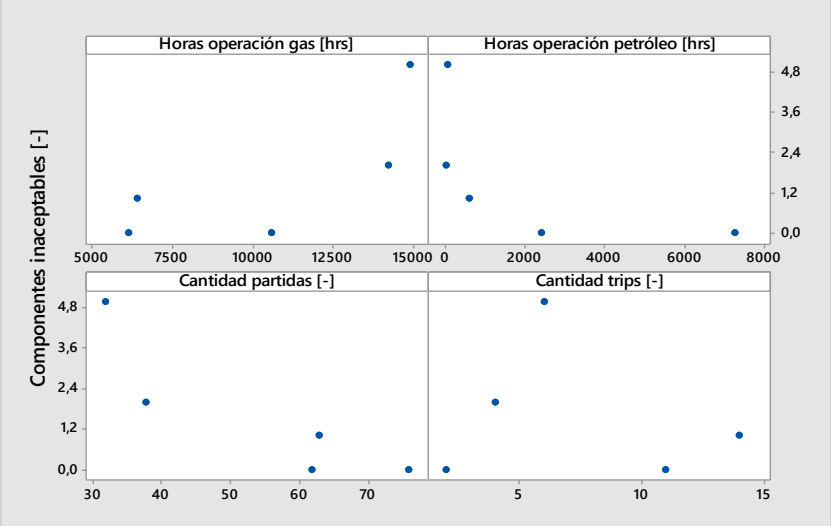


Figura 3.31: Gráficos de dispersión datos alabe móvil de 2° etapa SI1.

Tabla 3.44: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables operacionales, y variable Ln(Componentes inaceptables) y variables operacionales, alabe móvil de 2° etapa SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p	Ln(Componentes inaceptables+1)	Valor p
Horas operación gas	0,749	0,145	0,736	0,156
Horas operación petróleo	-0,616	0,268	-0,737	0,156
Cantidad partidas	-0,877	0,051	-0,912	0,031
Cantidad trips	-0,174	0,779	-0,110	0,860

3.5.1.11 Alabe móvil de 3° etapa SI1

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: como se advierte en la Figura 3.32 en los diferentes gráficos de dispersión, existe una relación entre la variable dependiente *Componentes inaceptables* y la variable independiente *Horas operación gas*, no existiendo relación con las demás variables operacionales, esto se ratifica con la Tabla 3.45 donde se entregan los coeficientes de correlación lineal de Pearson, en la cual se observa que la variable *Horas operación gas* posee el mayor coeficiente de Pearson y además es estadísticamente significativo (*0,003*), no así con las demás variables independientes.

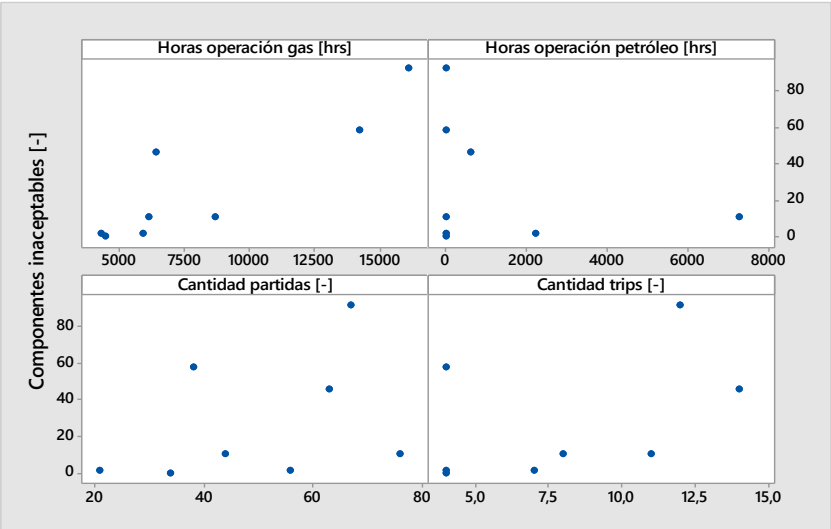


Figura 3.32: Gráficos de dispersión datos alabe móvil de 3° etapa SI1.

Tabla 3.45: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variable Componentes inaceptables y variables independientes, alabe móvil de 3° etapa SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	0,890	0,003
Horas operación petróleo	-0,282	0,499
Cantidad partidas	0,373	0,363
Cantidad trips	0,460	0,251

Normalidad: obtenemos los gráficos de probabilidad y el estadístico Anderson-Darling para las variables *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas*, en la Figura 3.33 se muestran estos resultados, en donde se aprecia que ambas variables no cumplen con el valor exacto de significancia de *0,05*0: *0,040* y *0,045*, respectivamente, por lo que no cumplen con la hipótesis de normalidad. Es necesario aplicar alguna transformación a los datos de las variables para alcanzar la normalidad.

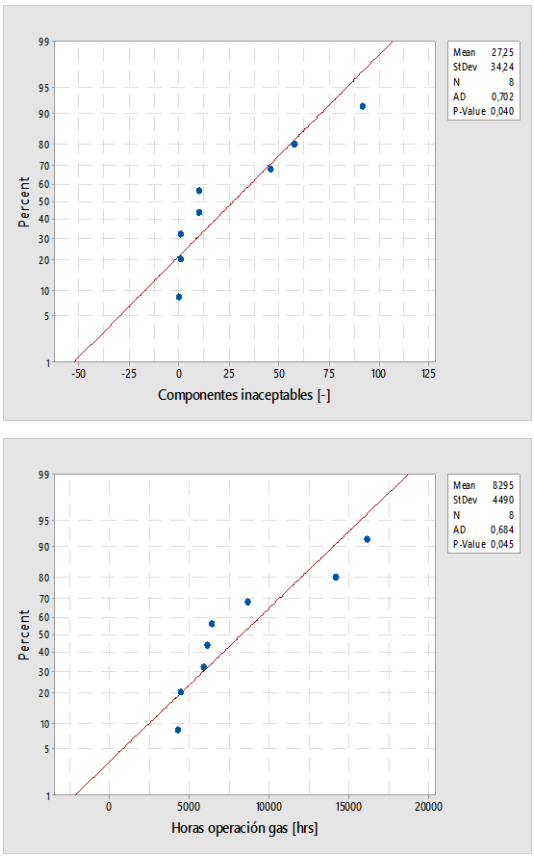


Figura 3.33: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptable (izquierda), y Horas operación gas (derecha), alabe móvil de 3° etapa SI1.

Se advierte en la Figura 3.33 que la variable dependiente *Componentes inaceptables* sigue una distribución asimétrica positiva (por la tendencia de los puntos) por lo cual se recomienda una transformación logarítmica para alcanzar la normalidad, para la variable independiente *Horas operación gas* se observa que sigue una distribución más bien plana por lo que se recomienda la transformación inversa para alcanzar normalidad, los gráficos de probabilidad normal y el respectivo estadístico AD de las variables transformadas se muestran en la Figura 3.34.

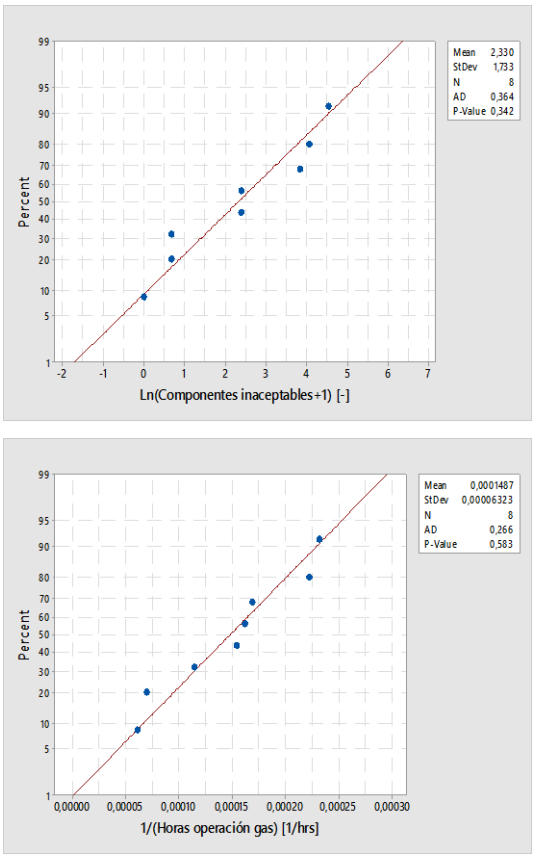


Figura 3.34: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptable transformada (izquierda), y Horas operación gas transformada (derecha), alabe móvil de 3° etapa SI1.

Se observa que en ambas variables los puntos están más cerca de la diagonal y que el estadístico AD está por sobre lo esperado (*0,05*), por lo tanto ambas variables cumplen el supuesto de normalidad. Se obtiene el coeficiente de correlación lineal de Pearson para las variables transformadas (*Componentes inaceptables*, *Horas operación gas*) y las demás variables, los valores se encuentran en la Tabla 3.46.

Tabla 3.46: Coeficientes de correlación de Pearson para las variables transformadas y otras variables, alabe móvil de 3° etapa SI1.

Variables independiente	Ln(Componentes inaceptables+1)	Valor p
1/Horas operación gas	-0,866	0,005
Horas operación petróleo	-0,072	0,866
Cantidad partidas	0,496	0,211
Cantidad trips	0,596	0,119

Se observa en la Tabla 3.46 que el coeficiente con mayor correlación lineal con un valor exacto de significancia estadística bajo *0,050* es entre las variables transformadas *Ln(Componentes inaceptables+1)* y *1/Horas operación gas*, tal como se esperaba.

Por lo tanto se cumplen los supuestos de linealidad y normalidad para las variables que incluiremos en el modelo: *Ln(Componentes inaceptables+1)* y *1/Horas operación gas.* Los supuestos de homocedasticidad y ausencia de errores correlacionados se evalúan una vez obtenido el modelo.

- *Estimación del modelo de regresión*

Al estimar el modelo Minitab arroja los resultados presentados en el anexo A-12. La ecuación se regresión es la siguiente:

$$Ln(Componentes\ inaceptables + 1) = 5{,}859 - 23733/(Horas\ operación\ gas) \qquad (3.4)$$

- *Valoración del modelo de regresión*

En el análisis de la varianza del anexo A-12 se observa que la variación explicada por el modelo de regresión, en este caso por la variable independiente 1/*Horas operación gas*, es alta, con un SCP de la variable de 15,7625 y para el error un SCP de 0,8751, además el

estadístico F posee un valor exacto de significancia de 0,005 (menor al recomendado de 0,05) por lo que la variable 1/*Horas operación gas* tiene bastante influencia lineal sobre la variable dependiente.

En el resumen del modelo del anexo A-12 se puede observar que R^2 *ajustada* tiene un valor de 70,85% el cual es bastante bueno y nos dice que el 70,85% de la variación en la variable dependiente esta explicada por el modelo, es decir, por la variable independiente 1/*Horas operación gas.*

En coeficiente del anexo A-12 se tiene que tanto el coeficiente constante como el coeficiente de la variable *1/Horas operación gas* son estadísticamente significativos por lo que su permanencia en el modelo esta validada.

Analizaremos si el modelo cumple con los supuestos de homocedasticidad y ausencia de errores correlacionados. Para estudiar la homocedasticidad o constancia en la variabilidad se obtiene el gráficos de *residuos v/s valor teórico o ajustado modelo obtenido* (Gráfico 3.3) y se comparan con los patrones de la Figura 1.4, se advierte en el Gráfico 3.3 que no existe algún patrón que nos indique que no cumple homocedasticidad, por lo que se asume que cumple con el supuesto.

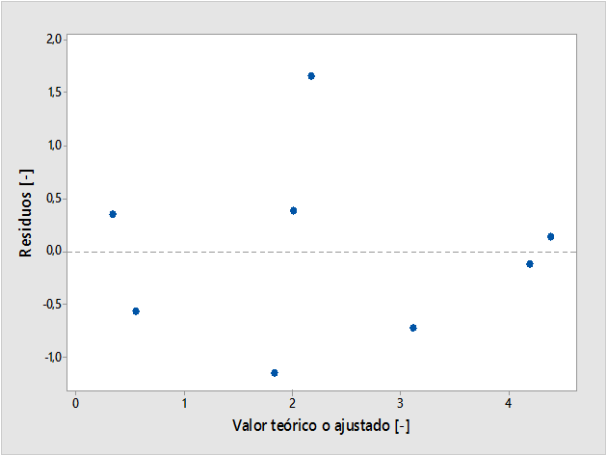


Gráfico 3.3: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo obtenido, alabe móvil de 3° etapa SI1.

Para evaluar el supuesto de ausencia de errores correlacionados se obtiene el estadístico *d* de Durbin-Watson, que para este caso es de *1,44583*, usando la tabla del anexo A-4 se encuentran valores de $d_L = 0{,}763$ y $d_U = 1{,}332$, para $n = 8$ y $k = 1$(variables predictoras en el modelo), según los intervalos propuestos en el capítulo 1.7.1.4 se cumple con el supuesto. Además se corrobora este resultado con el Gráfico 3.4 en donde se observa que no existe un patrón en los residuos estandarizados del modelo en el orden de observación:

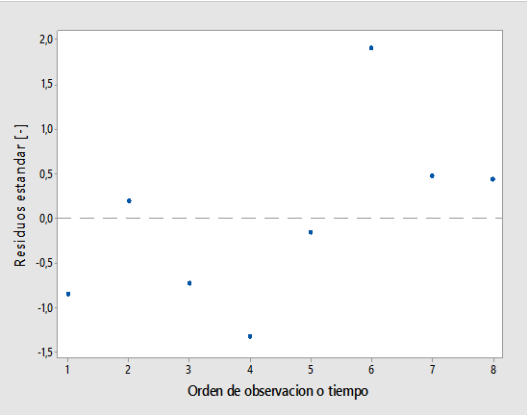


Gráfico 3.4: Residuos estándar v/s orden de observación, alabe móvil de 3° etapa SI1.

- *Predicción con el modelo de regresión*

Se tiene que la varianza estimada de las perturbaciones es la siguiente:

$$\hat{\sigma}^2 = 0{,}8751$$

Luego con este valor se puede obtener la varianza ($Var(Y_0 - \hat{Y}_0)$) y el error estándar del modelo ($ee(Y_0 - \hat{Y}_0)$), y usando la *tabla de distribución t* para un gl de 6 ($gl = n - k$) para un nivel de significancia de 0,50 (50%) se tienen los siguientes valores de componentes inaceptables

Tabla 3.47: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,50), alabe móvil de 3° etapa SI1.

$Horas\ operación\ gas\ [hrs]$	$Ln(Componentes\ inaceptables + 1)$		$Componentes\ inaceptables$	
	LI	LS	LI	LS
5.000	0,37	1,85	0	6
7.500	1,97	3,41	7	30
10.000	2,75	4,22	15	68
12.500	3,20	4,72	24	111

15.000	3,49	5,06	32	Max(112)

3.5.1.12 Alabe móvil de 4° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: se observa en la Figura 3.35, en los diferentes gráficos de dispersión, la gran variación de los datos de las variables independientes con respecto a la variable dependiente *Componentes inaceptables*. Analizando sin embargo la tabla de coeficientes de correlación lineal de Pearson (Tabla 3.48) se observa que la variable *Cantidad partidas* posee un alto grado de correlación lineal con la variable dependiente y una significancia estadística esperada (bajo *0,05*), y además las variables *Horas operación petróleo* y *Cantidad trips* poseen también un grado avanzado de correlación lineal con la variable dependiente, y valores de significancia, si bien superior a *0,05*, están muy cercanos a este valor por lo que bien podrían ser incluidas en el modelo. Por lo tanto, se intenta estimar un modelo con estas 3 variables independientes: *Cantidad partidas, Horas operación petróleo* y *Cantidad trips*, las que cumplen parcialmente el supuesto de linealidad

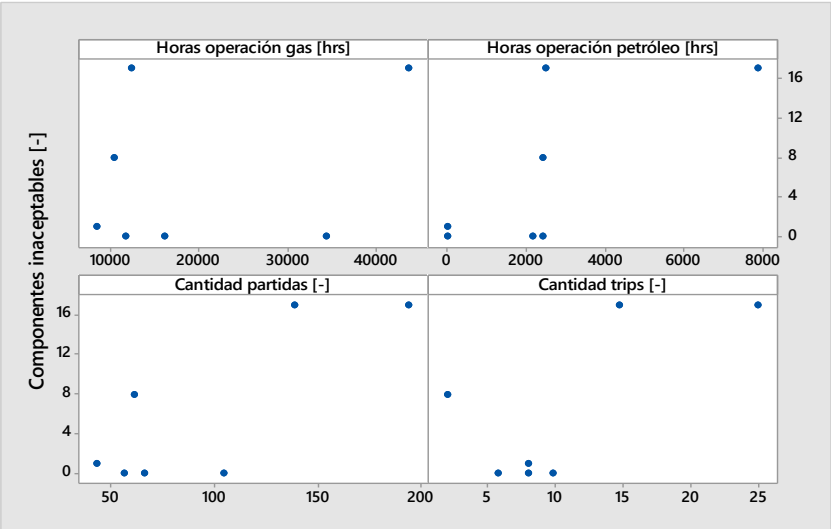


Figura 3.35: Gráficos de dispersión datos alabe móvil de 4° etapa SI1.

Tabla 3.48: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables independientes y variable dependiente Componentes inaceptables, alabe móvil de 4° etapa SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	0,309	0,500
Horas operación petróleo	0,709	0,074
Cantidad partidas	0,808	0,028
Cantidad trips	0,700	0,080

Normalidad: se evalúa entonces el supuesto de normalidad de estas variables independientes y además de la variable dependiente *Componentes inaceptables* con los gráficos de probabilidad normal y prueba Anderson-Darling (AD) presentes en la Figura 3.36 y Figura 3.37. Se observa en estos grafico que la variable dependiente *Componentes inaceptables* y la variable independiente *Horas operación petróleo* no cumplen con el nivel mínimo de significancia de *0,05* por lo que se rechaza la hipótesis de normalidad para estas variables.

Por otro lado se observa que las variables *Cantidad partidas* y *Cantidad trips* si cumplen con el nivel mínimo de significancia estadística por lo que se acepta la hipótesis de normalidad.

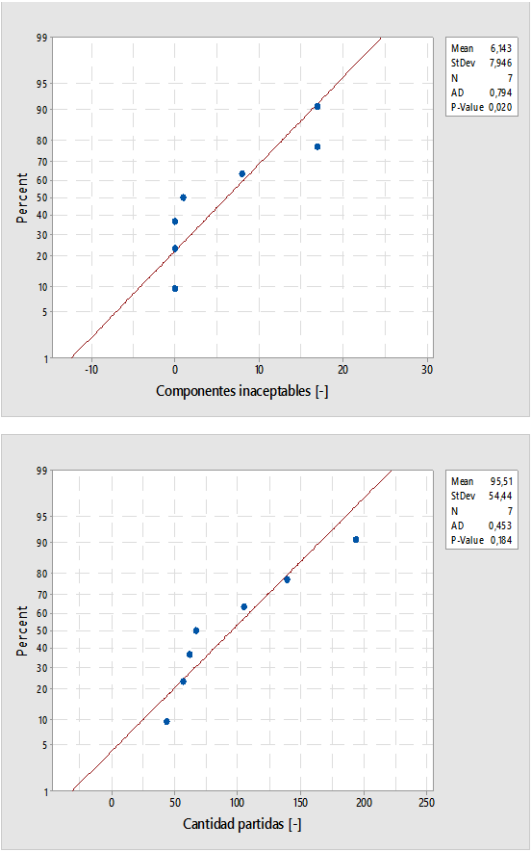


Figura 3.36: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Componentes inaceptables (izquierda), y Cantidad partidas (derecha), alabe móvil de 4° etapa SI1.

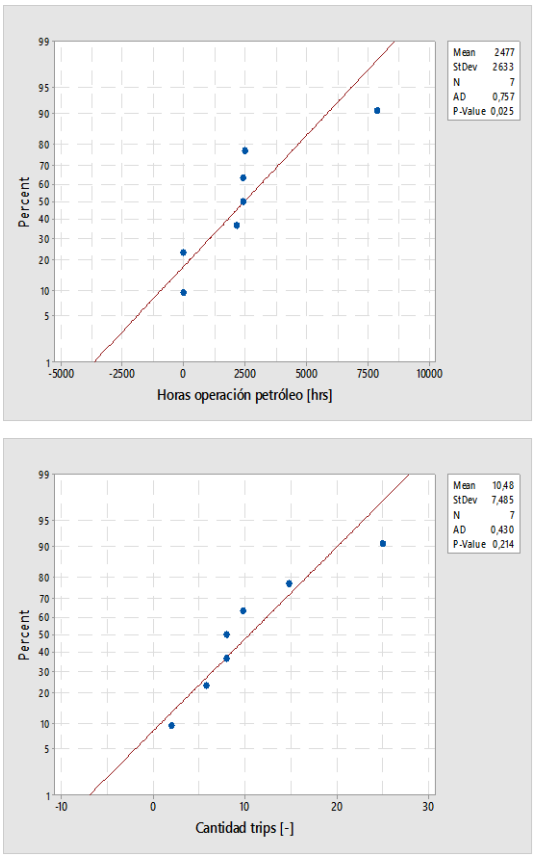


Figura 3.37: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Horas operación petróleo (izquierda) y Cantidad trips (derecha), alabe móvil de 4° etapa SI1.

Luego se aplican las transformaciones necesarias para aceptar la hipótesis de normalidad en las variables que no la cumplen, se ocupa la raíz cuadrada para transformar las variables, la Figura 3.38 presenta los resultados, donde se observa que las variables *Componentes inaceptables* y *Horas operación petróleo* ahora alcanzan el nivel de significancia requerido para aceptar la hipótesis de normalidad.

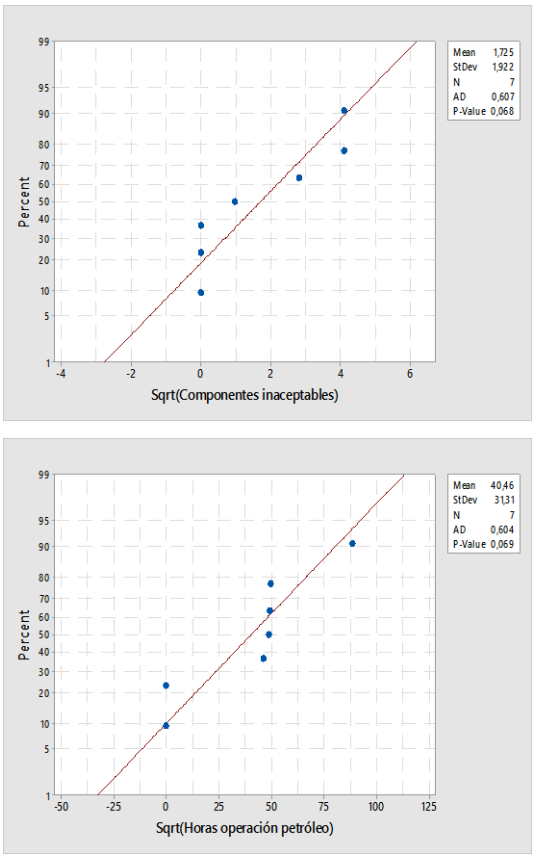


Figura 3.38: Gráfico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Componentes inaceptables transformada (izquierda), y Horas operación petróleo transformada (derecha), alabe móvil de 4° etapa SI1.

Para corroborar que mediante las transformaciones no se ha violado el supuesto de linealidad se obtiene nuevamente el coeficiente de correlación lineal de Pearson con las variables transformadas, las que se muestran en la siguiente Tabla 3.49: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables transformadas, alabe móvil de 4° etapa SI1.

Tabla 3.49: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables transformadas, alabe móvil de 4° etapa SI1.

Variables independiente	Sqrt(Componentes inaceptables)	Valor p
Horas operación gas	0,205	0,659
Sqrt(Horas operación petróleo)	0,615	0,142
Cantidad partidas	0,701	0,080
Cantidad trips	0,593	0,161

Se advierte en la Tabla 3.49 que los coeficientes de correlación lineal disminuyen por la transformación de la variable dependiente *Componentes inaceptables*, obteniéndose una correlación lineal y una significancia estadística aceptable para la variable *Cantidad partidas*, por lo que se construye el modelo de regresión solo con las variables: *Sqrt(Componentes inaceptables)* y *Cantidad partidas.*

- *Estimación del modelo de regresión*

Al estimar el modelo Minitab arroja los resultados presentados en el anexo A-13. La ecuación de regresión es la siguiente:

$$Sqrt(Componentes\ inaceptables) = 0{,}01952(Cantidad\ partidas) \qquad (3.5)$$

- *Valoración del modelo de regresión*

En el *Análisis de la varianza* del anexo A-13 se aprecia que la variación explicada por el modelo de regresión, en este caso por la variable independiente *Cantidad partidas*, es alta en comparación la variabilidad explicada por el error, alcanzando un valor de SCP de *31,090* y el error alcanza un valor de SCP de *1,985*, luego la variable independiente tiene una alta

influencia lineal en la variable dependiente, además el estadístico *F* del valor de SCP es estadísticamente significativo.

En el *Resumen del modelo* del anexo A-13 se puede observar que R^2 *ajustada* tiene un valor de 67,69% el cual es aceptable, y nos dice que el 67,69% de la variación en la variable dependiente esta explicada por el modelo.

En *Coeficientes* del anexo A-13 se tiene que el coeficiente de la variable *Cantidad partidas* es estadísticamente significativo, alcanzo un *valor p* de 0,007.

Para evaluar el supuesto de homocedasticidad o varianza constante se obtiene el grafico de *residuos v/s valor teórico o ajustado* del modelo, presentado en el Gráfico 3.5, donde no se advierte ningún patrón que nos haga dudar de la aleatoriedad de los residuos, por lo tanto se puede afirmar que se cumple el supuesto de varianza constante en el modelo.

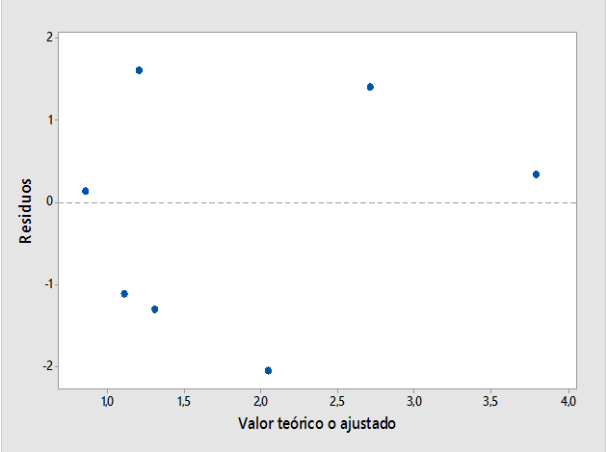


Gráfico 3.5: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, alabe móvil de 4° etapa SI1.

Para evaluar el supuesto de ausencia de errores correlacionados se obtiene el estadístico Durbin-Watson, el cual alcanza un valor para el modelo de *1,91490*, luego sacamos los

valores para construir el intervalo de aceptación de la tabla *Estadístico d de Durbin-Watson para un nivel de significancia de 0,05* (anexo A-4), donde se obtiene $d_L = 0{,}700$ y $d_U = 1{,}356$, donde el intervalo de confianza es igual a $d_U < d < 4 - d_U$, es decir $1{,}356 < d < 2{,}644$, por lo tanto el estadístico Durbin-Watson del modelo cae en la zona de aceptación de la hipótesis de ausencia de errores correlacionados.

- *Predicción con el modelo de regresión*

Para el modelo propuesto se tiene que la varianza estimada de las perturbaciones es la siguiente:

$$\hat{\sigma}^2 = 2{,}3819$$

Luego con este valor se puede obtener la varianza ($Var(Y_0 - \hat{Y}_0)$) y el error estándar del modelo ($ee(Y_0 - \hat{Y}_0)$), y usando la *tabla de distribución t* para un gl de 5 ($gl = n - k$) para un nivel de significancia de 0,10 (10%) se tienen los valores de componentes inaceptables presentados en la Tabla 3.50.

Tabla 3.50: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,10), alabe móvil de 4° etapa SI1.

Cantidad partidas	*Sqrt(Componentes inaceptables)*		*Componentes inaceptables*	
	LI	LS	LI	LS
50	-2,5138	4,4658	7	20
75	-1,8948	4,8228	4	24
100	-1,3742	5,2782	2	28
125	-0,9549	5,8349	1	34
150	-0,6312	6,4872	1	42
194	-0,2540	7,8278	1	62

3.5.1.13 Ring segment de 1° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: se advierte en *Figura 41*, en los diferentes gráficos de dispersión, poca relación lineal o no lineal entre las variables independientes y la variable dependiente *Componentes inaceptables*, esto se corrobora con la *Tabla 48* que entrega los coeficientes de correlación lineal los que son muy bajos o negativos y con poca significancia estadística, por lo que los datos no son útiles para obtener un modelo de regresión adecuado.

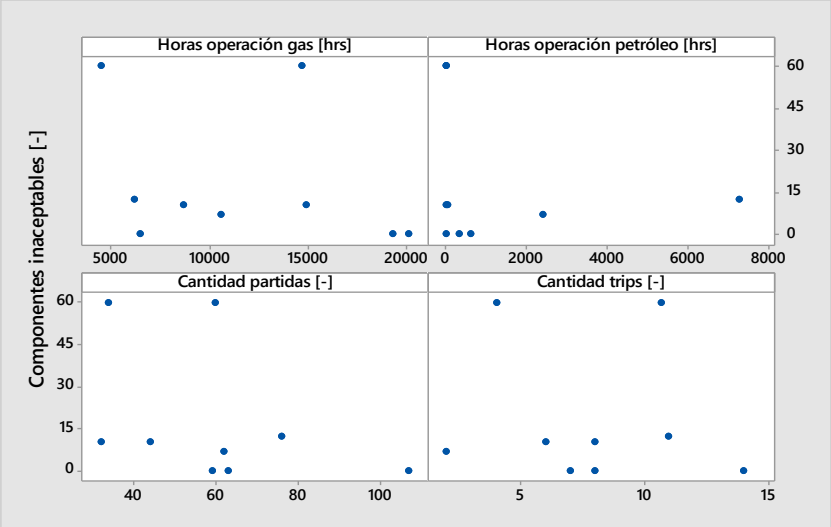


Figura 3.39: Gráficos de dispersión datos ring segment de 1° etapa SI1.

Tabla 3.51: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, ring segment de 1° etapa SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	-0,289	0,450
Horas operación petróleo	-0,176	0,651
Cantidad partidas	-0,392	0,297

Cantidad trips	-0,114	0,770

3.5.1.14 Ring segment de 2° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: se aprecia en la Figura 3.40 que existe una relación entre la variable dependiente *Componentes inaceptables* y la variable independiente *Horas operación petróleo*. No se observan otras relaciones con la variable dependiente. Esta relación existente se corrobora con el coeficiente de correlación lineal de Pearson en la Tabla 3.52, cumpliendo esta relación encontrada el supuesto de linealidad.

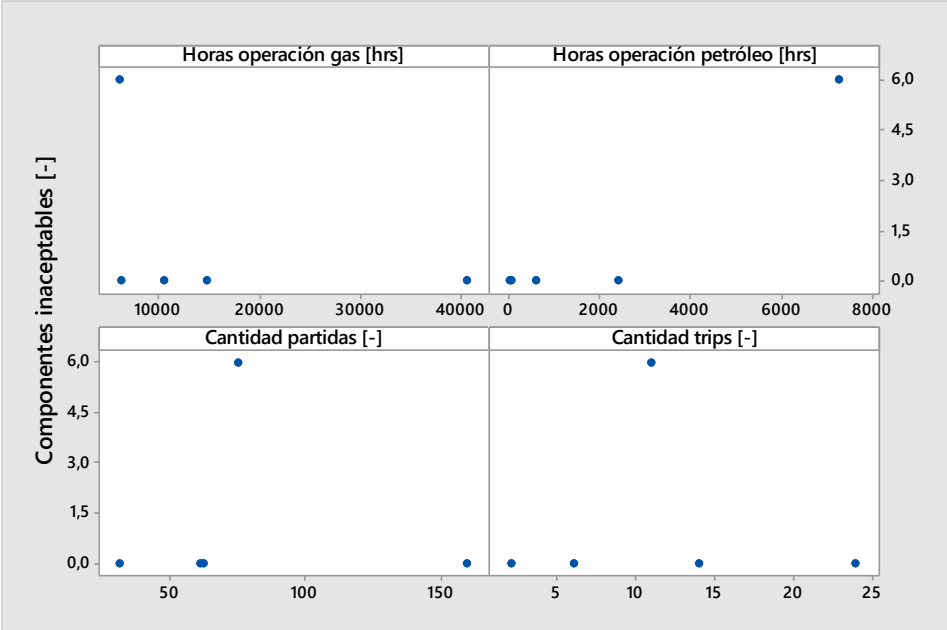


Figura 3.40: Gráficos de dispersión datos ring segment de 2° etapa SI1.

Tabla 3.52: Coeficiente de correlación lineal de Pearson entre variables, ring segment de 2° etapa SI1.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	-0,373	0,536
Horas operación petróleo	0,948	0,014
Cantidad partidas	-0,030	0,962
Cantidad trips	-0,027	0,966

Normalidad: el supuesto de normalidad se evalúa en la siguiente Figura 3.41, en donde se observa que la variable dependiente Componentes inaceptables no cumple con el mínimo de significancia estadística requerido (0,05) y la variable independiente Horas de operación petróleo cumple. Sin embargo por la naturaleza de los datos de la variable dependiente no es posible realizar una transformación para cumplir con el supuesto de normalidad, por lo que el modelo que se pueda construir con estas variables carece de significancia estadística y por lo tanto no es representativo para la población.

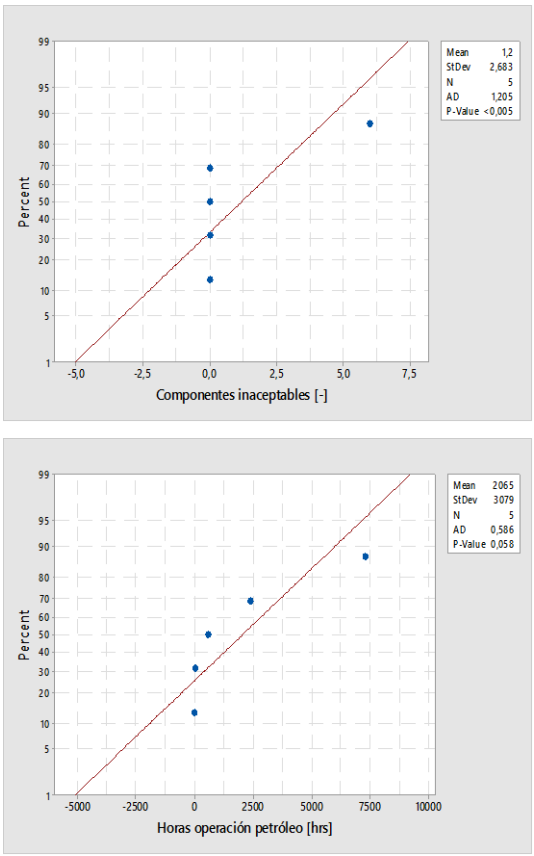


Figura 3.41: Grafico de probabilidad normal y estadístico AD para variable Componentes inaceptables (izquierda), y Horas operación petróleo (derecha), ring segment de 2° etapa SI1.

3.5.1.15 Ring segment de 3° etapa

Por la baja cantidad de datos y la naturaleza de estos no es posible construir un modelo de regresión valido.

3.5.1.16 Ring segment de 4° etapa

Por la baja cantidad de datos de este componente no es posible construir un modelo de regresión valido.

3.5.2 Turbina a gas San Isidro 2 (SI2)

3.5.2.1 Tobera piloto principal

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: se aprecia en la Figura 3.42 que existe baja relación lineal (o no lineal) entre la variable dependiente *Componentes inaceptables* y las variables operacionales, siendo la relación más fuerte entre la variable dependiente y la variable *Horas operación gas.* Lo anterior se puede corroborar con los coeficientes de correlación lineal en la Tabla 3.53 en donde se advierte que la relación lineal solo se cumple para las variables anteriormente nombradas, siendo esta relación estadísticamente significativa.

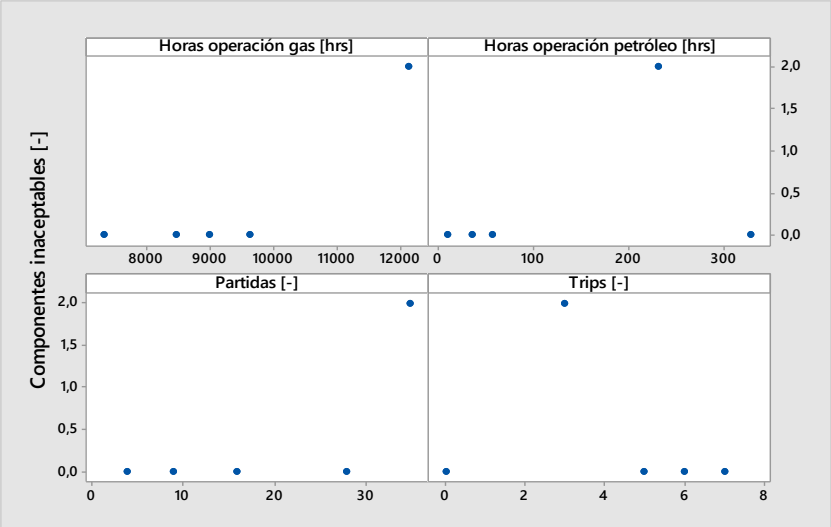


Figura 3.42: Gráficos de dispersión tobera piloto principal SI2.

Tabla 3.53: Coeficiente de correlación lineal de Pearson entre variables, tobera piloto principal SI2.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	0,882	0,048
Horas operación petróleo	0,393	0,513
Cantidad partidas	0,717	0,172
Cantidad trips	-0,242	0,695

Normalidad: se evalúa la normalidad de las posibles variables que entraran al modelo con gráficos de probabilidad normal y prueba de Anderson-Darling. Sin embargo como se aprecia en el Gráfico 3.6 los datos de la variable *Componentes inaceptables* no cumplen gráficamente con la normalidad, y el estadístico AD está muy por debajo de lo esperado para ser estadísticamente significativo, se podría realizar alguna transformación a la variable para alcanzar la normalidad, sin embargo esto es imposible ya que la naturaleza de los datos (repetidos valores nulos) hace que no sea posible alcanzar el supuesto de normalidad para esta variable. Como no es posible asegurar normalidad no es recomendable establecer un modelo con estos datos.

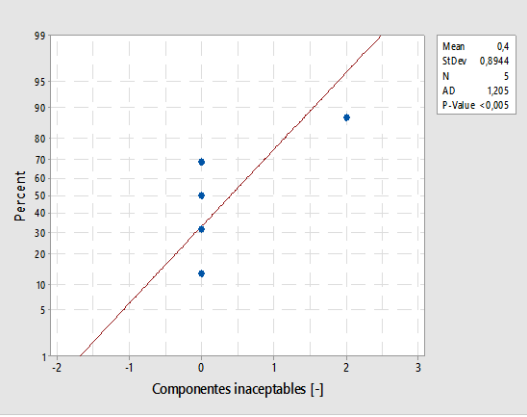


Gráfico 3.6: Probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptables, tobera piloto principal SI2.

3.5.2.2 Tobera piloto gas

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: como se advierte en la Figura 3.43 existe una relación entre la variable dependiente *Componentes inaceptables* y la variable *Horas operación gas*. Además se puede suponer una relación no lineal entre la variable dependiente y la variable *Cantidad partidas*, si suponemos esta relación como aproximadamente exponencial, y luego transformamos la variable dependiente para cumplir linealidad, se puede apreciar en la Tabla 3.54 que esta transformación (logarítmica) no es útil, por lo que la linealidad se cumple con la variable dependiente (no transformada) y la variable *Horas operación gas*, que a pesar no cumple con el valor esperado de significancia estadística (*0,050)*, el *valor p* está cercano al esperado *(0,070).*

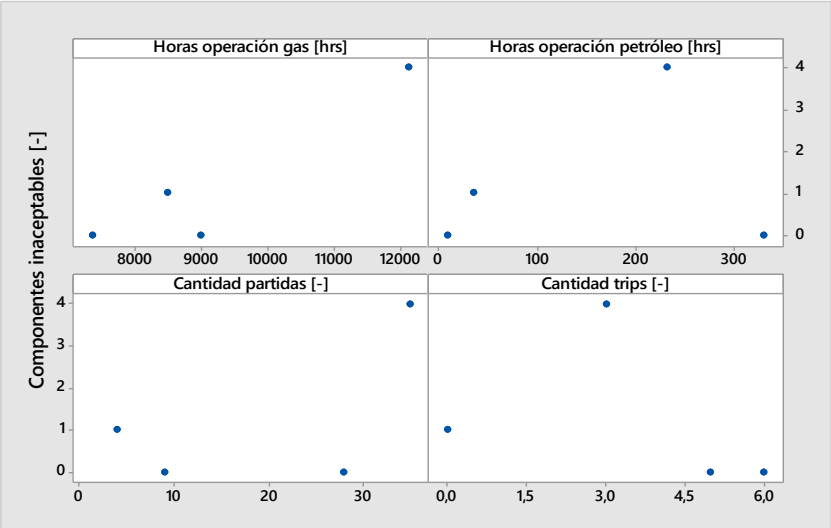


Figura 3.43: Gráficos de dispersión tobera piloto gas SI2.

Tabla 3.54: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, tobera piloto gas SI2.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p	Ln(Componentes inaceptables+1)	Valor p
Horas operación gas	0,930	0,070	0,882	0,118
Horas operación petróleo	0,232	0,768	0,136	0,864
Cantidad partidas	0,581	0,419	0,452	0,548
Cantidad trips	-0,366	0,634	-0,534	0,466

Normalidad: se evalúa el supuesto de normalidad con los gráficos de probabilidad normal y estadístico AD (Figura 3.44) y se aprecia que ambas variables cumplen con el supuesto de normalidad ya que cumplen con el valor mínimo esperado de significancia estadística para el estadístico AD: *0,092* y *0,315*.

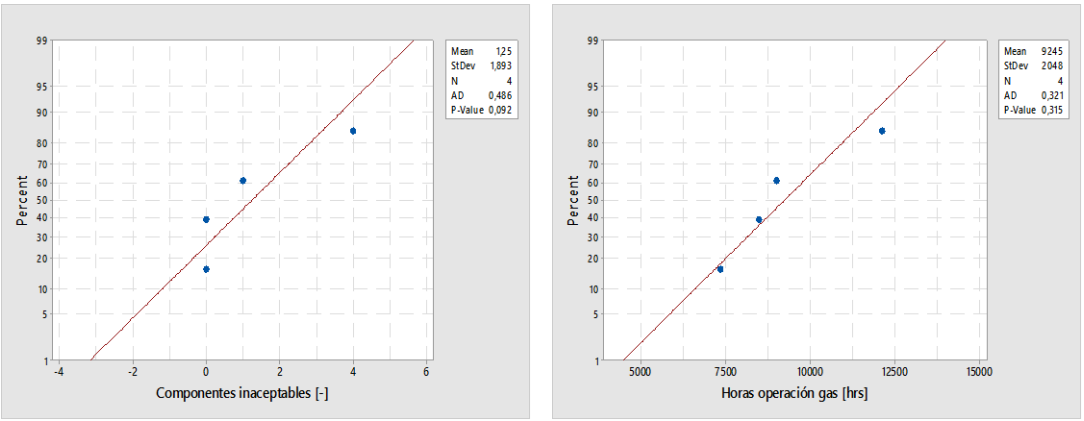


Figura 3.44: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para las variables Componentes inaceptables (izquierda) y Horas operación gas (derecha), tobera piloto gas SI2.

- *Estimación del modelo de regresión*

Estimando el modelo con el programa *Minitab* se obtienen los resultados presentados en el anexo A-14. La ecuación de regresión es la siguiente:

$$Componentes\ inaceptables = -6{,}70 + 0{,}000860\ Horas\ operacion\ gas \qquad (3.6)$$

- *Valoración del modelo de regresión*

En el *Análisis de la varianza* del anexo A-14 se aprecia que la variación explicada por el modelo de regresión, en este caso por la variable independiente *Horas operación gas*, es aceptable, con un SCP de la variable de *9,2993* y para el error un SCP de *0,7253*, a pesar que el estadístico F posee un valor exacto de significancia de *0,070*, este valor es solo un poco mayor al recomendado de *0,050*, por lo que la variable *Horas operación gas* tiene influencia lineal sobre la variable dependiente.

En el *Resumen del modelo* del anexo A-14 se puede observar que R^2 *ajustada* tiene un valor de *79,76%* el cual es bastante bueno y nos dice que el *79,76%* de la variación en la variable dependiente esta explicada por el modelo, es decir, por la variable independiente *Horas operación gas.*

En *Coeficientes* del anexo A-14 se advierte que el coeficiente constante y el coeficiente que acompaña a la variable independiente no son estadísticamente significativos, sin embargo están cercanos al valor esperado de *0,050* por lo que se suponen aceptables.

Para evaluar el supuesto de homocedasticidad o varianza constante se obtiene el grafico de *residuos v/s valor teórico o ajustado* del modelo, presentado en el Gráfico 3.7. A pesar de los pocos datos que existen se puede concluir que el gráfico no sigue algún patrón identificado en el capítulo 1.7.1.3 por lo cual cumple con el supuesto de varianza constante.

Para evaluar el supuesto de ausencia de errores correlacionados no se puede estimar con el estadístico de Durbin-Watson por el pequeño tamaño muestral de los datos. La tabla

Estadístico d de Durbin-Watson para un nivel de significancia de 0,050 en el anexo A-4 inicia sus valores para *n=6* y para este caso tenemos *n=4.* Por lo que se realiza una evaluación gráfica del supuesto y se compara el Gráfico 3.8 con los gráficos del capítulo 1.7.1.4 y no se encuentran patrones similares que insinúen una violación del supuesto, por lo que se acepta la ausencia de errores correlacionados para los datos de este componente.

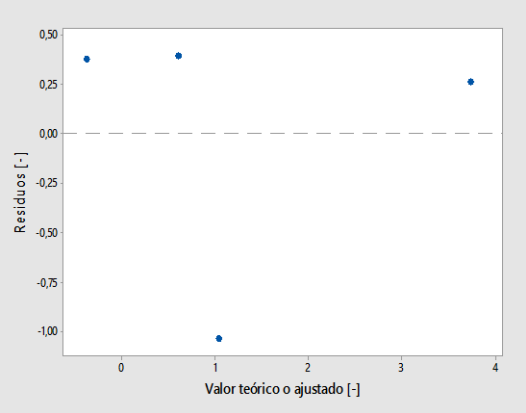


Gráfico 3.7: Grafico de residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, tobera piloto gas SI2.

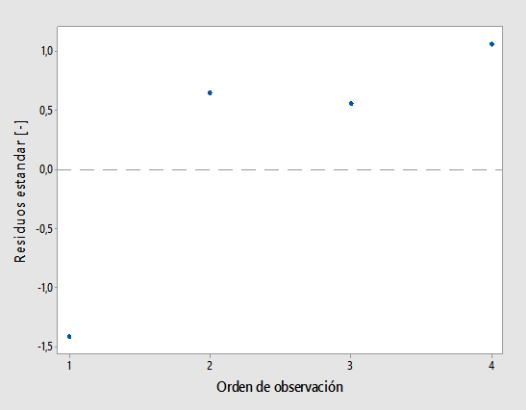


Gráfico 3.8: Orden de observación v/s residuos estándar, tobera piloto gas SI2.

- *Predicción con el modelo de regresión*

Para el modelo propuesto se tiene que la varianza estimada de las perturbaciones o residuos es la siguiente:

$$\hat{\sigma}^2 = 0{,}7253$$

Luego con este valor se puede obtener la varianza ($Var(Y_0 - \hat{Y}_0)$) y el error estándar del modelo ($ee(Y_0 - \hat{Y}_0)$), y usando la *Tabla de distribución t* (anexo A-5) para un gl de 2 ($gl = n - k$) y para un nivel de significancia de 0,10 (10%) se tienen los siguientes valores de componentes inaceptables presentados en la Tabla 3.55.

Tabla 3.55: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,10), tobera piloto gas SI2.

Horas operación gas	*Componentes inaceptables*	
	LI	LS
2500	0	1
5000	0	2
7500	0	3
10000	0	5
12100	1	8

3.5.2.3 Tobera piloto petróleo

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: se advierte en la Figura 3.45 que existe una relación entre las variables *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas*, y entre la variable dependiente y *Cantidad partidas*. Sin embargo estas relaciones no son lineales y no existe una transformación a mano para cumplir con el supuesto debido a la repetición en la muestra

de datos de solo un valor en la variable *Componentes inaceptables* (en este caso cero), a pesar de esto en la Tabla 3.56 se observa que existe una relación lineal estadísticamente significativa entre la variable dependiente y *Horas operación gas.*

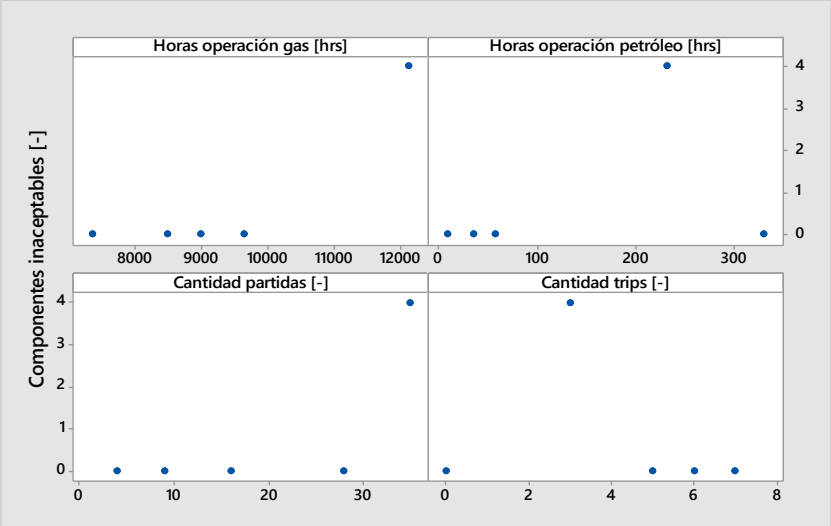


Figura 3.45: Gráficos de dispersión tobera piloto petróleo SI2.

Tabla 3.56: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, tobera piloto petróleo SI2.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	0,882	0,048
Horas operación petróleo	0,393	0,513
Cantidad partidas	0,717	0,172
Cantidad trips	-0,242	0,695

Normalidad: como se aprecia en los gráficos de probabilidad normal de la Figura 3.46, la variable dependiente no cumple con el supuesto de normalidad mientras que la variable independiente *Horas operación gas* si cumple. Cuando no se cumple con normalidad en los

datos existen transformaciones de estos que logran satisfacer el supuesto, sin embargo en este caso es imposible transformar los datos de la variable *Componentes inaceptables* y cumplir con la normalidad debido a la naturaleza de sus datos, donde existen datos repetitivos y de valor cero. Por lo tanto no es recomendable obtener un modelo en base a estos datos.

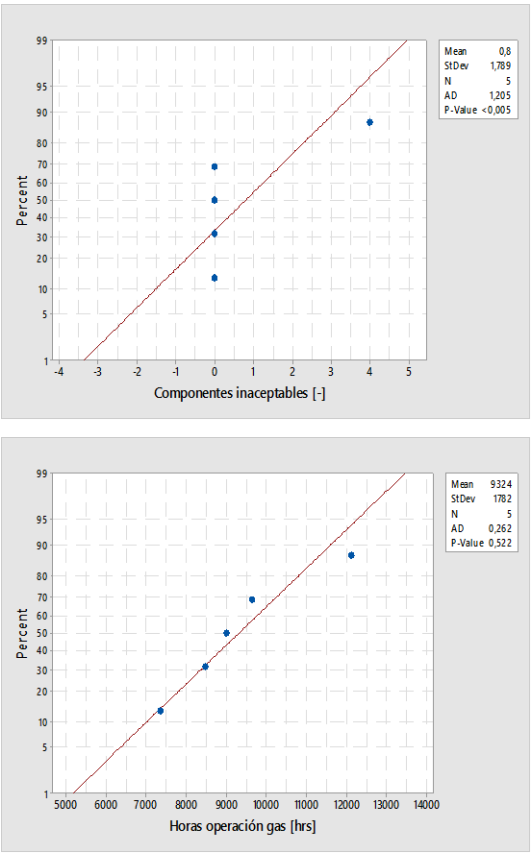


Figura 3.46: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptables (izquierda) y Horas operación gas (derecha), tobera piloto petróleo SI2.

3.5.2.4 Cámara de combustión

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: como se advierte en los gráficos de dispersión de la Figura 3.47 existe relación entre la variable dependiente y la variable operacional *Horas operación gas*, y posiblemente también con las variables *Horas operación petróleo* y *Cantidad partidas.* Sin embargo se observa que la relación entre la variable dependiente versus *Horas operación gas* y versus *Horas operación petróleo* son no lineales, siendo la relación de forma logarítmica, por lo que se aplica una transformación a estas últimas variables. Los resultados de los coeficientes de correlación lineal se observan en la Tabla 3.57, donde se aprecia que mediante la transformación logarítmica de los datos de las variables operacionales nombradas con anterioridad el coeficiente de linealidad aumenta, llegando a un valor alto y estadísticamente significativo para la variable *Horas operación gas*, sin embargo la variable *Horas operación petróleo* alcanza un valor alto del coeficiente de Pearson pero no se alcanza significancia estadística. Esto último sucede también para el resto de las variables.

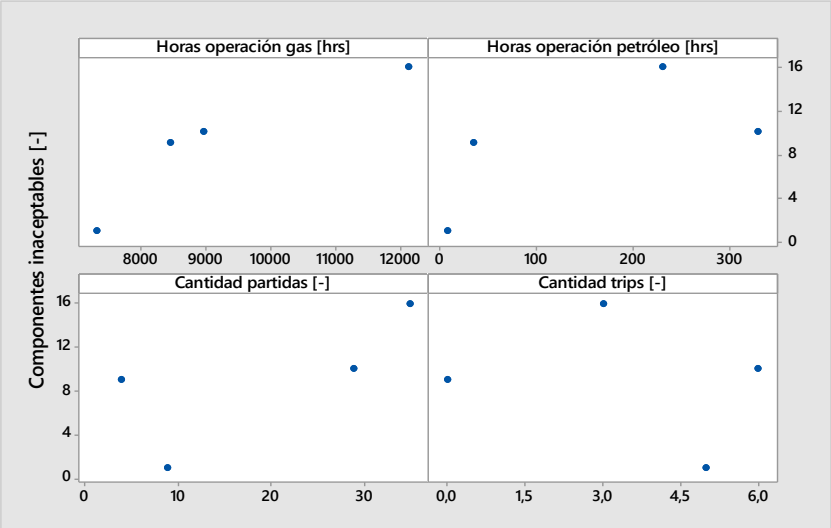


Figura 3.47: Gráficos de dispersión, cámara de combustión SI2.

Tabla 3.57: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, cámara de combustión SI2.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	0,928	0,072
Ln(Horas operación gas)	0,952	0,048
Horas operación petróleo	0,658	0,342
Ln(Horas operación petróleo)	0,855	0,145
Cantidad partidas	0,725	0,275
Cantidad trips	-0,266	0,734

Normalidad: como se observa en la Figura 3.48, las variables *Componentes inaceptables* y *Ln(Horas operación gas)* cumplen con el supuesto de normalidad, alcanzando el estadístico Anderson-Darling (AD) *0,536* y *0,476*, respectivamente.

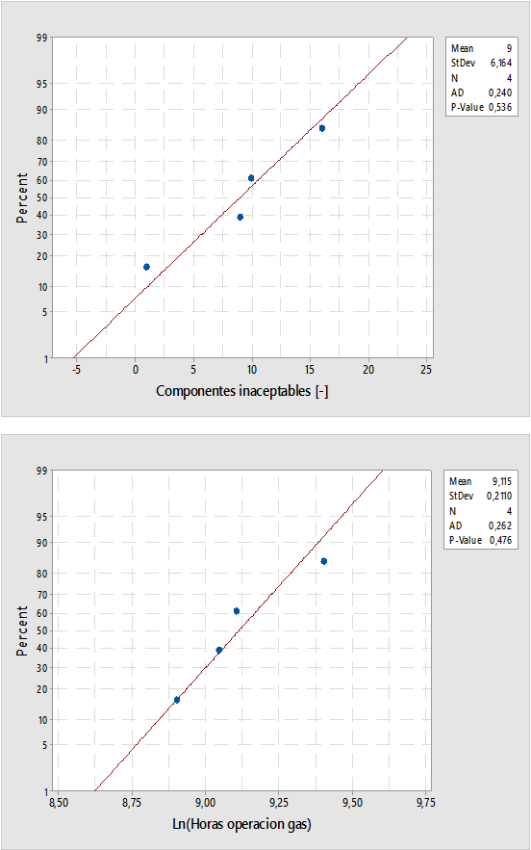


Figura 3.48: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptables (izquierda) y Ln(Horas operación gas) (derecha), cámara de combustión SI2.

- *Estimación del modelo de regresión*

Estimando el modelo con el programa *Minitab* se obtienen los resultados presentados en el anexo A-15. La ecuación de regresión es la siguiente:

$$Componentes\ inaceptables = -244{,}6 + 27{,}82\ Ln(Horas\ operacion\ gas) \qquad (3.7)$$

- *Valoración del modelo de regresión*

En el *Análisis de la varianza* del anexo A-15 se aprecia que la variación explicada por el modelo de regresión, en este caso por la variable independiente *Ln(Horas operación gas)*, es alta, con un SCP de la variable de *103,33* y para el error un SCP de *10,67*, además el estadístico F posee un valor exacto de significancia de *0,048*, por lo que la variable *Ln(Horas operación gas)* tiene influencia lineal sobre la variable dependiente.

En el *Resumen del modelo* en el anexo A-15 se puede observar que R^2 *ajustada* tiene un valor de *85,97%* el cual es bastante bueno y nos dice que el *85,97%* de la variación en la variable dependiente esta explicada por el modelo, es decir, por la variable independiente *Ln*(*Horas operación gas).*

En *Coeficientes* en el anexo A-15 se advierte que el coeficiente constante no es significativo, sin embargo está muy cerca: el *valor p* del coeficiente es de *0,051*, siendo lo recomendado *0,050*, por lo que es aceptable. Por otro lado, el coeficiente que acompaña a la variable independiente es estadísticamente significativos, con un valor exacto de significancia de *0,048.*

Para evaluar el supuesto de homocedasticidad o varianza constante se obtiene el grafico de *residuos v/s valor teórico o ajustado* del modelo, presentado en el *Gráfico 11*. A pesar de los pocos datos que existen se puede concluir que el gráfico no sigue algún patrón identificado en la sección *1.7.1.3 (Evaluación homocedasticidad)* por lo cual cumple con el supuesto de varianza constante.

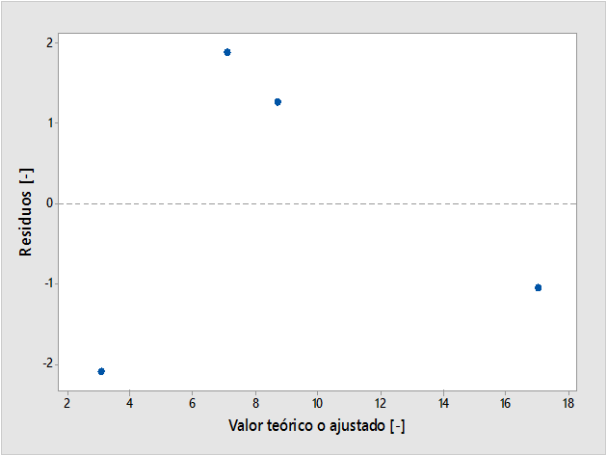


Gráfico 3.9: Residuos v/s valor teórico o ajustado, cámara de combustión SI2.

Para evaluar el supuesto de ausencia de errores correlacionados no se puede estimar con el estadístico de Durbin-Watson por el pequeño tamaño muestral de los datos. La tabla *Estadístico d de Durbin-Watson para un nivel de significancia de 0,050* en el anexo A-4 inicia sus valores para *n=6* y para este caso tenemos *n=4*. Por lo que se realiza una evaluación gráfica del supuesto y se compara el Gráfico 3.10 con los gráficos del capítulo 1.7.1.4 y no se encuentran patrones similares que insinúen una violación del supuesto, por lo que se acepta la ausencia de errores correlacionados para los datos de este componente.

Gráfico 3.10: Residuo estándar v/s orden de observación, cámara de combustión SI2.

- *Predicción con el modelo de regresión*

Para el modelo propuesto se tiene que la varianza estimada de las perturbaciones es la siguiente:

$$\hat{\sigma}^2 = 5{,}3351$$

Luego con este valor se puede obtener la varianza ($Var(Y_0 - \hat{Y}_0)$) y el error estándar del modelo ($ee(Y_0 - \hat{Y}_0)$), y usando la *Tabla de distribución t* (anexo A-5) para un gl de 2 ($gl = n - k$) y para un nivel de significancia de 0,20 (20%) se tienen los siguientes valores de componentes inaceptables presentados en la Tabla 3.58.

Tabla 3.58: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,20), cámara de combustión SI2.

Horas operación gas	*Componentes inaceptables*	
	LI	LS
2500	0	0

5000	0	0
7500	0	9
10000	7	17
12100	11	20

3.5.2.5 Pieza de transición

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: se advierte en la Figura 3.49 una relación de tipo exponencial entre las variables *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas*. Al realizar la transformación para linealizar esta relación y obteniendo los coeficientes de correlación lineal de Pearson (Tabla 3.59) se obtienen coeficientes estadísticamente no significativos, por lo que la relación no cumple con el supuesto de linealidad, luego no es posible lograr un modelo de regresión válido.

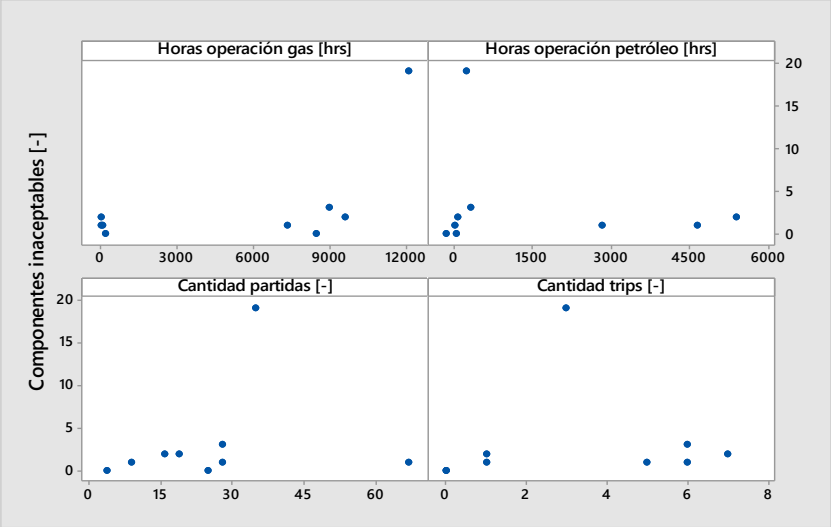


Figura 3.49: Gráficos de dispersión, pieza de transición SI2.

Tabla 3.59: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, pieza de transición SI2.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p	Ln(Componentes inaceptables)	Valor p
Horas operación gas	0,552	0,124	0,539	0,134
Horas operación petróleo	-0,183	0,638	-0,035	0,930
Cantidad partidas	0,203	0,600	0,243	0,528
Cantidad trips	0,071	0,857	0,322	0,398

3.5.2.6 Alabe fijo de 1° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: como se advierte en la Figura 3.50 existen relaciones aproximadamente lineales entre la variable *Componentes inaceptables* y las variables operacionales *Horas operación petróleo* y *Cantidad partidas*, sin embargo como se aprecia en la Tabla 3.60 los coeficientes de correlación lineal entre estas variables no son estadísticamente significativas, siendo el *valor p* más cercano a *0,050* el de la relación entre las variables *Componentes inaceptables* y *Cantidad partidas: 0,096*, el cual es aceptable para construir un modelo de regresión.

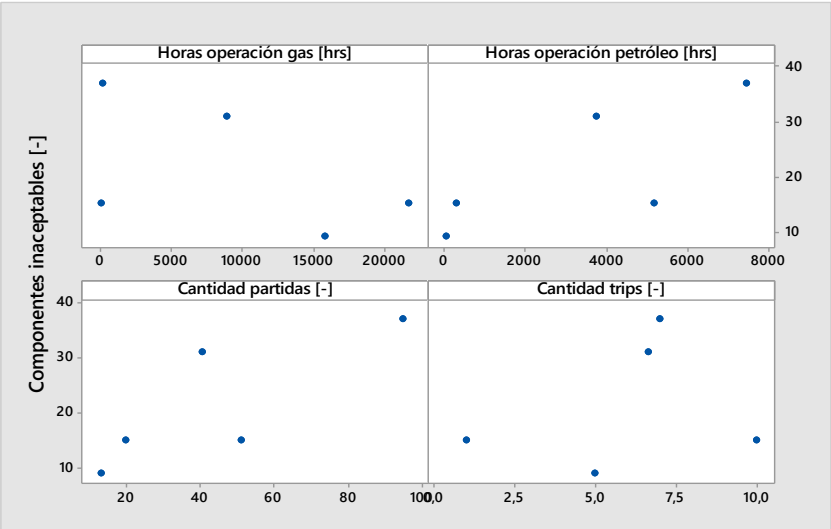


Figura 3.50: Gráficos de dispersión alabe fijo de 1° etapa SI2.

Tabla 3.60: Coeficientes de correlación lineal entre variables, alabe fijo de 1° etapa SI2.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	-0,542	0,346
Horas operación petróleo	0,766	0,131
Cantidad partidas	0,810	0,096
Cantidad trips	0,257	0,677

Normalidad: como se observa en la Figura 3.51 las variables *Componentes inaceptables* y *Cantidad partidas* cumplen con el supuesto de normalidad, ya que el valor exacto de significancia del estadístico Anderson-Darling está por sobre lo esperado: *0,250* y *0,464*, respectivamente.

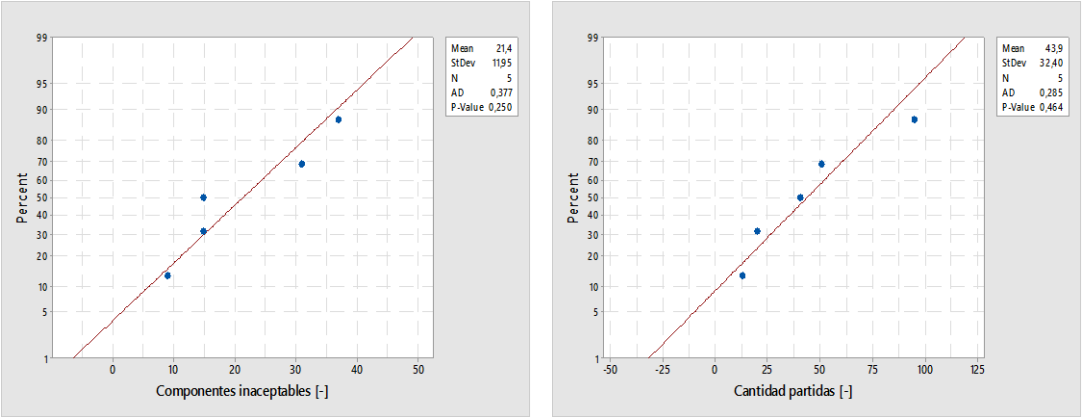


Figura 3.51: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptables (izquierda) y Cantidad partidas (derecha), alabe fijo de 1° etapa SI2.

- *Estimación del modelo de regresión*

Estimando el modelo con el programa *Minitab* se obtienen los resultados presentados en el anexo A-16. Siendo la ecuación de regresión de regresión:

$$Componentes\ inaceptables = 0{,}4302\ Cantidad\ partidas \qquad (3.8)$$

- *Valoración del modelo de regresión*

En el *Análisis de la varianza* en el anexo A-16 se aprecia que la variación explicada por el modelo de regresión, en este caso por la variable independiente *Cantidad partidas*, es alta, con un SCP de la variable de *2561,01* y para el error un SCP de *75,00*, además el estadístico F posee un valor exacto de significancia de *0,004*, por lo que la variable *Cantidad partidas* tiene alta influencia lineal sobre la variable dependiente.

En el *Resumen del modelo* en el anexo A-16 se puede observar que R^2 *ajustada* tiene un valor de *86,89%* el cual es bastante bueno y nos dice que el *86,89%* de la variación en la

variable dependiente esta explicada por el modelo, es decir, por la variable independiente *Cantidad partidas.*

En *Coeficientes* en el anexo A-16 se advierte que el coeficiente que acompaña a la variable independiente es estadísticamente significativos, con un valor exacto de significancia de *0,004.*

Para evaluar el supuesto de homocedasticidad o varianza constante se obtiene el grafico de *residuos v/s valor teórico o ajustado* del modelo, presentado en el Gráfico 3.11. Se puede concluir que el gráfico no sigue algún patrón identificado en el capítulo 1.7.1.3 *(Evaluación homocedasticidad)* por lo cual cumple con el supuesto de varianza constante.

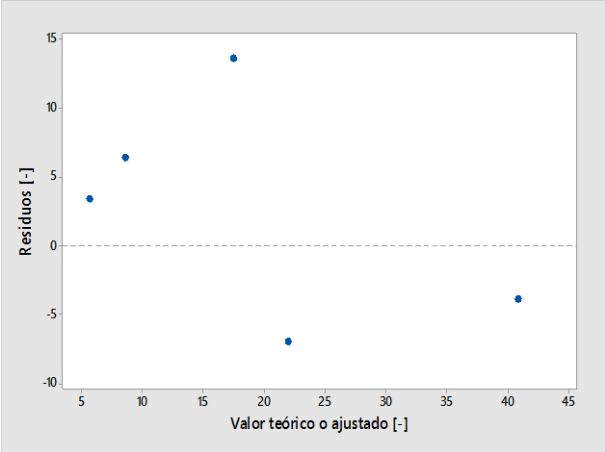


Gráfico 3.11: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, alabe fijo de 1° etapa SI2.

Para evaluar el supuesto de ausencia de errores correlacionados no se puede estimar con el estadístico de Durbin-Watson por el pequeño tamaño muestral de los datos. La tabla *Estadístico d de Durbin-Watson para un nivel de significancia de 0,050* en el anexo A-4 inicia sus valores para *n=6* y para este caso tenemos *n=5.* Por lo que se realiza una evaluación gráfica del supuesto, comparando el Gráfico 3.12 con los gráficos del capítulo

1.7.1.4 y no se encuentran patrones similares que insinúen una violación del supuesto, por lo que se acepta la ausencia de errores correlacionados para los datos de este componente.

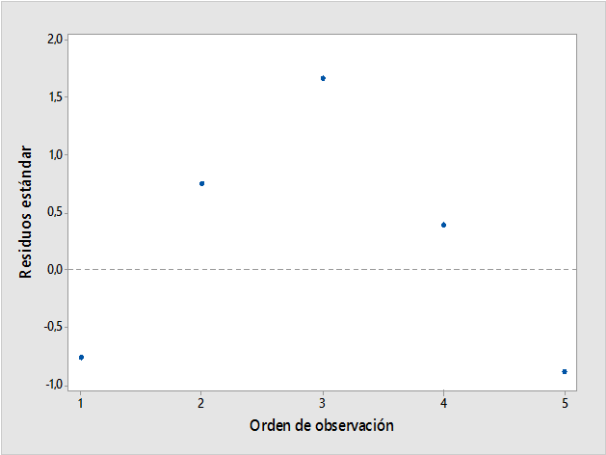


Gráfico 3.12: Residuos estándar v/s orden de observación, alabe fijo de 1° etapa SI2.

- *Predicción con el modelo de regresión*

Para el modelo propuesto se tiene que la varianza estimada de las perturbaciones es la siguiente:

$$\hat{\sigma}^2 = 0{,}6811$$

Luego con este valor se puede obtener la varianza ($Var(Y_0 - \hat{Y}_0)$) y el error estándar del modelo ($ee(Y_0 - \hat{Y}_0)$), y usando la *Tabla de distribución t* (anexo A-5) para un gl de 3 ($gl = n - k$) y para un nivel de significancia de 0,20 (20%) se tienen las siguientes cantidades de componentes inaceptables presentados en la Tabla 3.61.

Tabla 3.61: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,20), alabe fijo de 1° etapa SI2.

Cantidad partidas	*Componentes inaceptables*	
	LI	LS
20	0	28
40	0	35
60	8	40
80	15	40
90	18	40

3.5.2.7 Alabe fijo de 2° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: como se advierte en la Figura 3.52 no existen relaciones observables entre la variable dependiente *Componentes inaceptables* y las variables operacionales. Lo anterior se corrobora con los coeficientes de correlación lineal de Pearson presentados en la Tabla 3.62, donde se observa que no existe ningún coeficiente de correlación lineal alto y estadísticamente significativo. Luego no es recomendable obtener un modelo de regresión que no cumple el supuesto de linealidad.

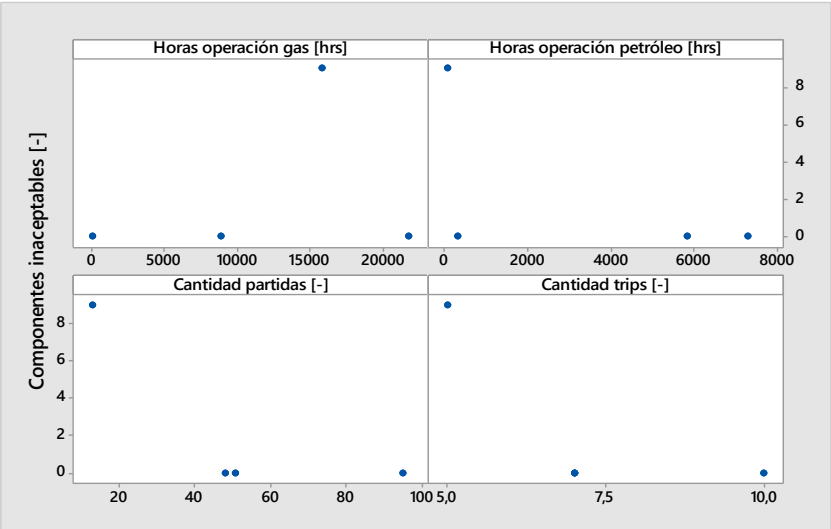


Figura 3.52: Gráficos de dispersión, alabe fijo de 2° etapa SI2.

Tabla 3.62: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, alabe fijo de 2° etapa SI2.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	0,299	0,701
Horas operación petróleo	-0,591	0,409
Cantidad partidas	-0,769	0,231
Cantidad trips	-0,728	0,272

3.5.2.8 Alabe fijo de 3° etapa

Debido a la baja cantidad de datos en este componente no es posible construir un modelo de regresión valido.

3.5.2.9 Alabe fijo de 4° etapa

Debido a la baja cantidad de datos en este componente no es posible construir un modelo de regresión valido.

3.5.2.10 Alabe móvil de 1° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: como se aprecia en la Figura 3.53 existe una relación lineal entre la variable dependiente *Componentes inaceptables* y la variable independiente *Horas operación gas.* Con las demás variables operacionales existe relación lineal negativa o relación lineal no significativa. Lo anterior se ratifica en la Tabla 3.63.

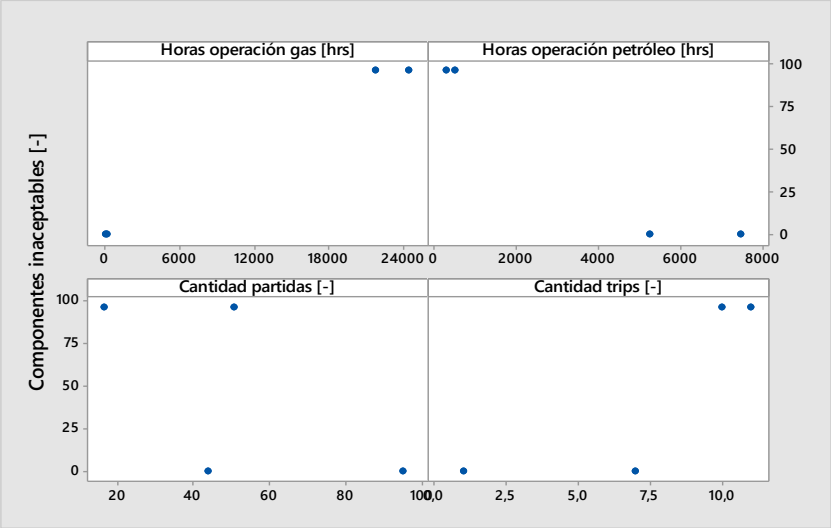


Figura 3.53: Gráficos de dispersión, alabe móvil de 1° etapa SI2.

Tabla 3.63: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables, alabe móvil de 1° etapa SI2.

Variables independiente	Componentes inaceptables	Valor p
Horas operación gas	0,996	0,004
Horas operación petróleo	-0,966	0,034
Cantidad partidas	-0,634	0,366
Cantidad trips	0,834	0,166

Normalidad: se advierte en la Figura 3.54 que la variable dependiente posee un valor exacto de significancia del estadístico Anderson-Darling(AD) de *0,047*, el cual es levemente más bajo que lo recomendado (*0,050),* sin embargo se acepta. Cabe destacar que no es posible transformar los datos de esta variable para alcanzar mayor valor de significancia (y luego de normalidad), debido a la naturaleza de estos datos (tamaña muestral bajo, valores repetitivos). Por otro lado, la variable *Horas operación gas* posee un valor exacto de significancia un poco mayor que el recomendado, pero si a los datos de esta variable se le aplica una transformación logarítmica se obtienen valores mayores de significancia, tal como se observa en el Gráfico 3.13, donde se obtiene un *valor p* del estadístico AD de *0,119* (mayor al valor recomendado). Además, al realizar la transformación, el coeficiente de correlación lineal de Pearson obtenido en la Tabla 3.63, disminuye a un valor de *0,993* con un valor exacto de significancia de *0,007*, es decir se ve muy poco afectada la linealidad en la relación *Componentes inaceptables-Horas operación gas.*

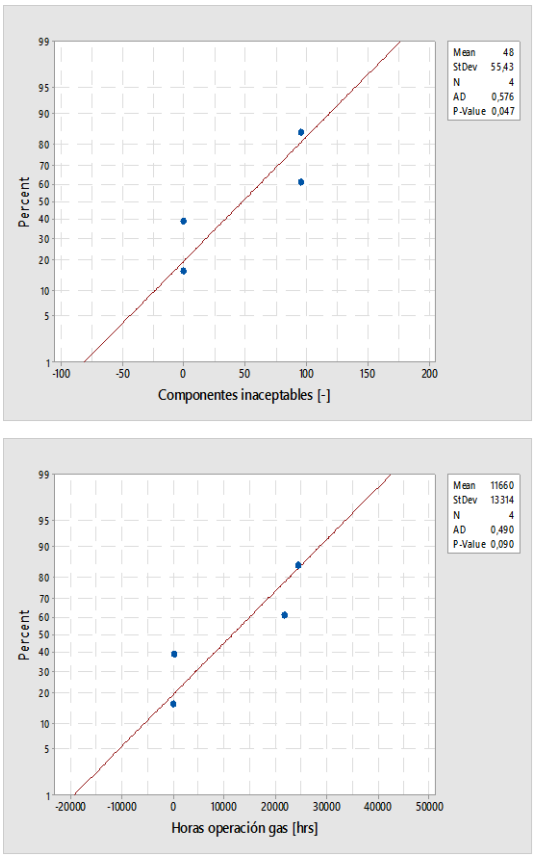


Figura 3.54: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para Componentes inaceptables (izquierda) y Horas operación gas (derecha), alabe móvil de 1° etapa SI2.

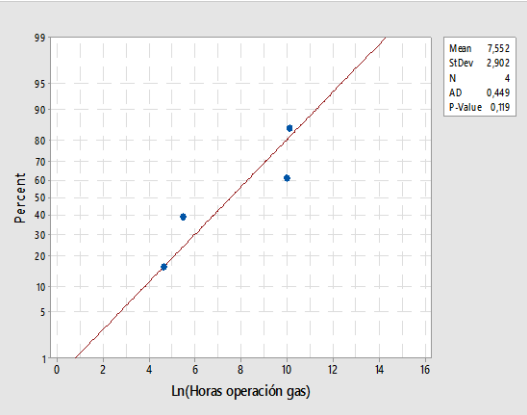


Gráfico 3.13: Grafico de probabilidad normal para variable Ln(Horas operación gas), alabe móvil de 1° etapa SI2.

- *Estimación del modelo de regresión*

Estimando el modelo con el programa *Minitab* se obtienen los resultados presentados en el anexo A-17. La ecuación de regresión es la siguiente:

$$Componentes\ inaceptables = -95{,}2 + 18{,}96\ Ln(Horas\ operación\ gas) \qquad (3.9)$$

- *Valoración del modelo de regresión*

En el *Análisis de la varianza* del anexo A-17 se aprecia que la variación explicada por el modelo de regresión, en este caso por la variable independiente *Ln(Horas operación gas)*, es alta, alcanzando un valor de SCP de *9089,63* y para el error un SCP de *126,4*, además el estadístico F posee un valor exacto de significancia de *0,007*, por lo que la variable operacional tiene alta influencia lineal sobre la variable dependiente.

En el *Resumen del modelo* en la anexo A-17 se puede observar que R^2 *ajustada* tiene un valor de *97,94%* el cual es bastante alto, y nos dice que el *97,94%* de la variación en la

variable dependiente esta explicada por el modelo, y particularmente, por la variable independiente *Cantidad partidas.*

En *Coeficientes* en el anexo A-17 se advierte que tanto el término constante como el que acompaña a la variable independiente son estadísticamente significativos, con un valor exacto de significancia de *0,017* y *0,007*, respectivamente.

Para evaluar el supuesto de homocedasticidad o varianza constante se obtiene el grafico de *residuos v/s valor teórico o ajustado* del modelo, presentado en el Gráfico 3.14. Se puede concluir que el gráfico no sigue algún patrón identificado en la sección 1.7.1.3 *(Evaluación homocedasticidad)* por lo cual podemos suponer que cumple con el supuesto de varianza constante.

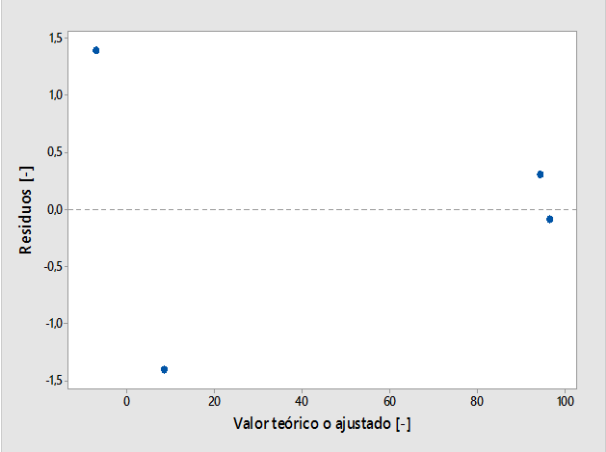


Gráfico 3.14: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, alabe móvil de 1° etapa SI2.

Para evaluar el supuesto de ausencia de errores correlacionados no se puede estimar con el estadístico de Durbin-Watson por el pequeño tamaño muestral de los datos. Por lo que se realiza una evaluación gráfica del supuesto, comparando el Gráfico 3.15 (*residuos v/s orden de observación estándar*) con los gráficos del capítulo 1.7.1.4 y no se encuentran patrones

similares que insinúen una violación del supuesto, por lo que se acepta la hipótesis de ausencia de errores correlacionados para los datos de este componente.

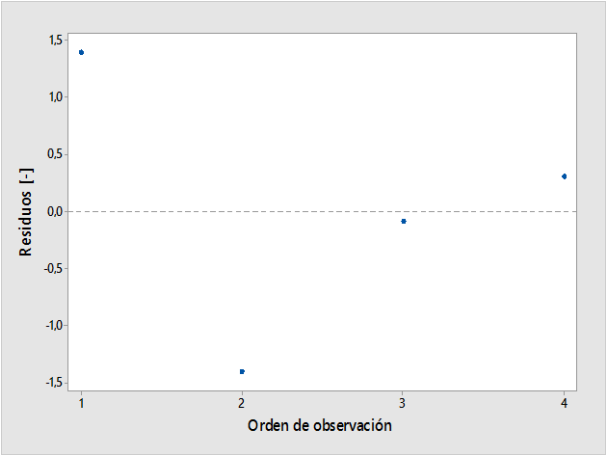


Gráfico 3.15: Grafico de residuos estándar v/s orden de observación, alabe móvil de 1° etapa SI2.

- *Predicción con el modelo de regresión*

Para el modelo propuesto se tiene que la varianza estimada de las perturbaciones es la siguiente:

$$\hat{\sigma}^2 = 12{,}6367$$

Luego con este valor se puede obtener la varianza ($Var(Y_0 - \hat{Y}_0)$) y el error estándar del modelo ($ee(Y_0 - \hat{Y}_0)$), y usando la *Tabla de distribución t* (anexo A-5) para un gl de 2 ($gl = n - k$= *4 - 2*) y para un nivel de significancia de 0,20 (20%) se tienen los siguientes valores de componentes inaceptables presentados en la Tabla 3.64.

Tabla 3.64: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,20), alabe móvil de 1° etapa SI1.

$Ln(Horas\ operación\ gas)$	$Componentes\ inaceptables$	
	LI	LS
5000	58	73
10000	71	87
15000	79	95
20000	84	96
24500	88	96

3.5.2.11 Alabe móvil de 2° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: en la Figura 3.55 se aprecia que no existen relaciones lineales positivas significativas, esto se verifica en la Tabla 3.65, donde se observa que no hay significancia estadística en los coeficientes de correlación lineal. Ya que no es posible aceptar la hipótesis de linealidad, entonces no es recomendable construir un modelo de regresión con estos datos.

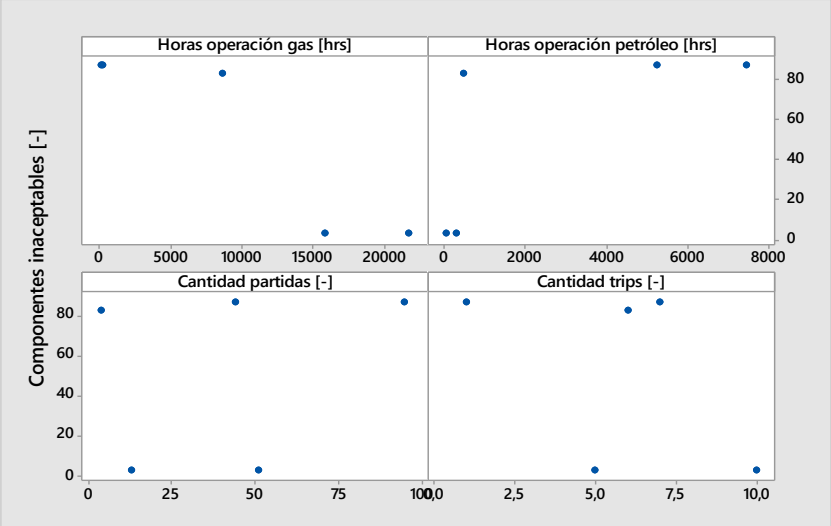


Figura 3.55: Gráficos de dispersión, alabe móvil de 2° etapa SI2.

Tabla 3.65: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables Componentes inaceptables y variables operacionales, alabe móvil de 2° etapa SI2.

Variables independiente	Coeficiente	Valor p
Horas operación gas	-0,918	0,028
Horas operación petróleo	0,699	0,189
Cantidad partidas	0,265	0,666
Cantidad trips	-0,483	-0,410

3.5.2.12 Alabe móvil de 3° etapa

Debido a la baja cantidad de datos en este componente no es posible construir un modelo de regresión válido.

3.5.2.13 Alabe móvil de 4° etapa

Debido a la baja cantidad de datos en este componente no es posible construir un modelo de regresión válido.

3.5.2.14 Ring segment de 1° etapa

- *Supuestos del análisis de regresión*

Linealidad: se observa en la Figura 3.56 existe una relación entre la variable de interés con *Horas operación gas*; en particular esta relación tiene forma exponencial, por lo que se aplica la transformación pertinente para linealizar la relación, lo anterior se aprecia en la Tabla 3.66, donde el coeficiente de correlación lineal entre estas dos variables aumenta y la significancia estadística también. No se observa otro tipo de relación significativa entre la variable de interés y las demás variables operacionales.

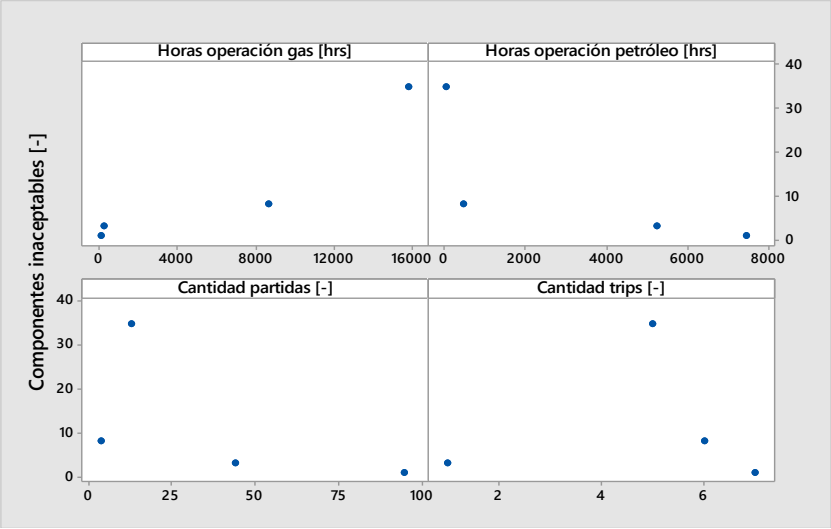


Figura 3.56: Gráficos de dispersión, ring segment de 1° etapa SI2.

Tabla 3.66: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre variables Componentes inaceptables y Ln(Componentes inaceptables) y variables operacionales, ring segment de 1° etapa SI2.

Variables independiente	Coeficiente	Valor p	Coeficiente con Ln(Componentes inaceptables)	Valor p
Horas operación gas	0,928	0,072	0,956	0,044
Horas operación petróleo	-0,736	0,264	-0,932	0,068
Cantidad partidas	-0,576	0,424	-0,859	0,141
Cantidad trips	0,078	0,922	-0,053	0,947

Normalidad: en la Figura 3.57 se advierte que tanto la variable *Ln(Componentes inaceptables)* como la variable operacional *Horas operación gas* cumplen con el supuesto de normalidad, ya que el estadistico Anderson-Darling (AD) tiene valores estadísticamente significativos en ambas: *0,849* y *0,273*, respectivamente.

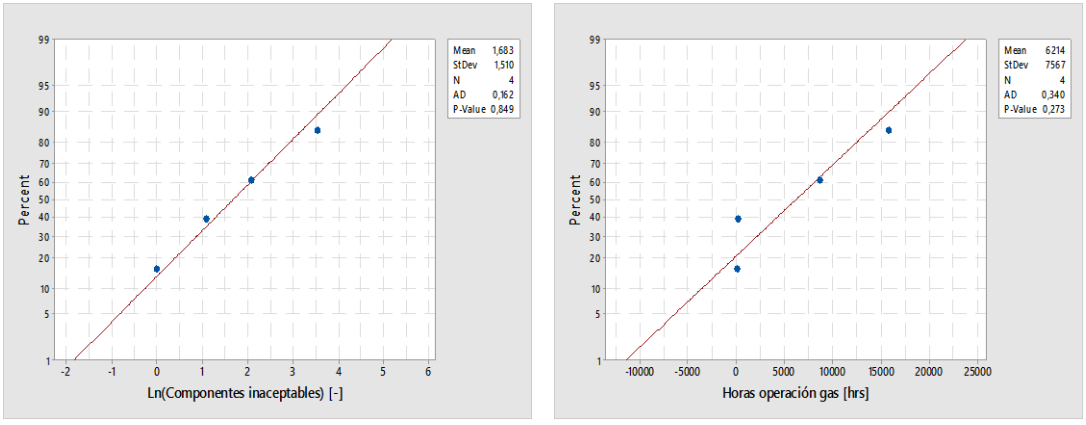


Figura 3.57: Gráficos de probabilidad normal y estadístico AD para variables Ln(componentes inaceptables) (izquierda) y Horas operación gas (derecha), ring segment de 1° etapa SI2.

- *Estimación del modelo de regresión*

Estimando el modelo con el programa *Minitab* se obtienen los resultados presentados en el anexo A-18. La ecuación de regresión obtenida es:

$$Ln(Componentes\ inaceptables) = 0{,}000229\ Horas\ operación\ gas \qquad (3.10)$$

- *Valoración del modelo de regresión*

En el *Análisis de la varianza* del anexo A-18 se aprecia que la variación explicada por el modelo de regresión, en este caso por la variable independiente *Horas operación gas*, es alta, alcanzando un valor de SCP de *17,0665* y para el error un SCP de *0,3683*, además el estadístico F posee un valor exacto de significancia de *0,006*, por lo que la variable operacional tiene alta influencia lineal sobre la variable dependiente.

En el *Resumen del modelo* del anexo A-18 se puede observar que R^2 *ajustada* tiene un valor de *91,89%* el cual es bastante alto, y nos dice que el *91,89%* de la variación en la variable dependiente esta explicada por el modelo, y particularmente, por la variable independiente *Horas operación gas.*

En *Coeficientes* en el anexo A-18 se advierte que el término que acompaña a la variable independiente es estadísticamente significativo, con un valor exacto de significancia de *0,006.*

Para evaluar el supuesto de homocedasticidad o varianza constante se obtiene el grafico de *residuos v/s valor teórico o ajustado* del modelo, presentado en el Gráfico 3.16. Se puede concluir que el gráfico no sigue algún patrón identificado en el capitulo 1.7.1.3 *(Evaluación homocedasticidad)* por lo cual podemos suponer que cumple con el supuesto de varianza constante.

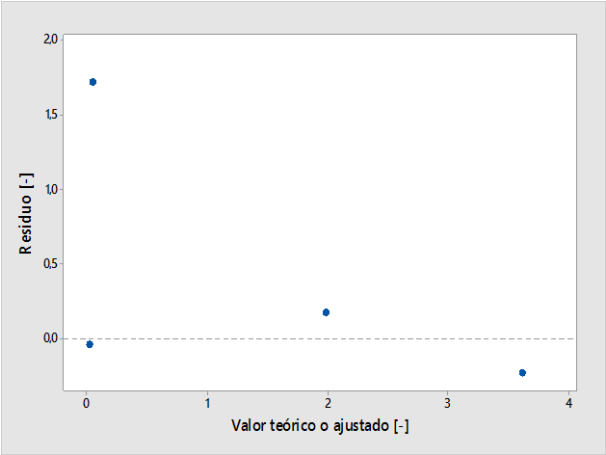


Gráfico 3.16: Residuos v/s valor teórico o ajustado del modelo, ring segment de 1° etapa SI2.

Para evaluar el supuesto de ausencia de errores correlacionados como no se puede estimar el estadístico de Durbin-Watson debido al pequeño tamaño muestral de los datos, se realiza una evaluación gráfica del supuesto, comparando el Gráfico 3.17 (*residuo estándar v/s orden de observación estándar*) con los gráficos del capítulo 1.7.1.4 y no se encuentran patrones similares que insinúen una violación del supuesto, por lo que se acepta la hipótesis de ausencia de errores correlacionados para los datos de este componente.

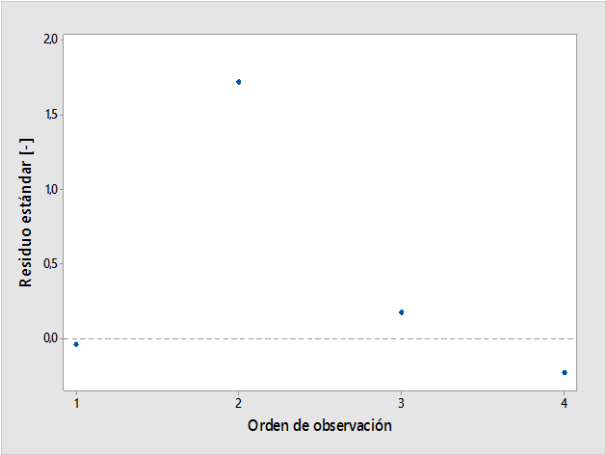


Gráfico 3.17: Gráfico de residuo estándar v/s orden de observación, ring segment de 1° etapa SI2.

- *Predicción con el modelo de regresión*

Para el modelo propuesto se tiene que la varianza estimada de las perturbaciones es la siguiente:

$$\hat{\sigma}^2 = 0{,}5525$$

Luego con este valor se puede obtener la varianza ($Var(Y_0 - \hat{Y}_0)$) y el error estándar del modelo ($ee(Y_0 - \hat{Y}_0)$), y usando la *Tabla de distribución t* (anexo A-5) para un gl de 2 ($gl = n - k$= *4 - 2*) y para un nivel de significancia de 0,20 (20%) se tienen los siguientes valores de componentes inaceptables presentados en la Tabla 3.67.

Tabla 3.67: Límites para intervalo de predicción de componentes inaceptables (nivel de significancia de 0,20), ring segment de 1° etapa SI2.

$Horas\ operación$	$Ln(Componentes\ inaceptables)$		$Componentes\ inaceptables$	
gas	LI	LS	LI	LS

5000	-0,4277	2,7177	1	15
7500	0,1441	3,2909	2	27
10000	0,6712	3,9009	2	50
12500	1,1570	4,5679	3	60
15800	1,7453	5,4911	6	60

3.5.2.15 Ring segment de 2° etapa

Debido a la naturaleza y baja cantidad de datos en este componente no es posible construir un modelo de regresión válido.

3.5.2.16 Ring segment de 3° etapa

Debido a la baja cantidad de datos en este componente no es posible construir un modelo de regresión válido.

3.5.2.17 Ring segment de 4° etapa

Debido a la baja cantidad de datos en este componente no es posible construir un modelo de regresión válido.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se realizara en base a los objetivos específicos planteados en una primera instancia:

- Analizar la situación actual de funcionamiento del mantenimiento de la turbina a gas, incluyendo diagrama de flujo del proceso; descripción general del equipo; descripción de los diferentes componentes.

Uno de los objetivos principales de analizar la situación actual de funcionamiento del mantenimiento de las turbinas a gas, además de interiorizarse en el proceso de mantención particular de esta máquina en esta planta, es conocer en forma general el comportamiento operacional de cada turbina estudiada.

Podemos observar las *horas equivalentes de operación* promedio entre cada intervención para cada turbina, siendo *9.121 [eoh]* para SI1, y *8.138 [eoh]* para SI2, con una desviación estándar de *2.719 [eoh]* y *3.118 [eoh]*, respectivamente. Se debe recordar que *horas equivalentes de operación* es una variable que intenta combinar de una forma adecuada las variables operacionales conocidas ponderándolas en un solo valor, por lo que si esta variable es más o menos cercana entre ambas unidades, tal como aquí sucede, se puede suponer un comportamiento similar en las variables operacionales para cada turbina.

- Análisis y depuración de la calidad de la información histórica existente.

Se debe hacer énfasis en que la información utilizada es obtenida de las diferentes inspecciones realizadas a las turbinas a gas desde el comienzo de operación de cada una: agosto de 1998 para SI1, y febrero 2007 para SI2. El resultado del análisis y depuración de la información se resumen en los anexos A-7 y A-8, para la unidad SI1 y SI2 respectivamente.

Se puede apreciar en los anexos mencionados que la principal causa de desviación en los datos son las diferencias de diseño en un mismo componente, lo que trae como consecuencia apartar del análisis, y apartar del tamaño muestral final, una gran cantidad de datos. Por ejemplo: el cambio de diseño en las cámaras de combustión SI1 y SI2 en las inspecciones realizadas en 2006 y 2009 respectivamente. Esto hace resaltar el peso que tienen los componentes más importantes o *críticos*, como son: sección de combustión (toberas piloto, cámaras de combustión, pieza de transición) en ambas unidades, tanto SI1 como SI2; y los alabes de fijos y móviles de 1° etapa, y solo fijos de 2°etapa en SI1 (y solo en esta unidad, ya que todos estos cambios de diseño se realizan con fecha anterior al inicio de operación de SI2, donde se presupone que los alabes nombrados rediseñados inician operación). Lo anterior hace referencia al interés que suscitan en el fabricante, encargado de la realización de

la mantención de las turbinas, estos componentes nombrados, y que finalmente servirá como argumento para clasificar a estos componentes como críticos en este estudio. Además, debido a rediseños y cambios constructivos de los componentes, intentando mejorar la calidad en estos, existe gran variabilidad entre los datos de las inspecciones, ya que los componentes tienden a ser diferentes entre cada intervención, lo que afecta los análisis de regresión más adelante descritos.

Otra causa de desviación en los datos son las diferencias en la calidad constructiva, lo que produce datos atípicos. En donde se destaca la *menor calidad constructiva* como el argumento físico más frecuente para apoyar el dato como atípico, siendo considerado datos atípicos en 11 componentes de 34 analizados.

Un factor importante a la hora de realizar cualquier análisis estadístico, y en particular un análisis de regresión, es el tamaño de la muestra *N*. En este caso el promedio del tamaño muestral en los componentes antes de realizar el análisis y depuración de la información es de *9,5* y *4,4*, para las unidades SI1 y SI2 respectivamente, y luego de realizado la depuración estos promedios bajan a valores de *5,6* y *3,5*, respectivamente. Estos ultimo valores toman gran relevancia a la hora de realizar los análisis de regresión, ya que a mayor tamaño muestral los análisis son más fidedignos y representativos de la población, por lo que un bajo tamaño muestral trae consigo consecuencias problemáticas, tal como veremos más adelante.

- Realizar un análisis de criticidad a los componentes expuestos a altas temperaturas en la turbina a gas.

El *análisis de criticidad AC* realizado en el capítulo 3.3, arroja 12 componentes con *criticidad alta*, grupo donde se observa gran presencia de componentes de la sección de combustión en ambas unidades analizadas: cámara de combustión, tobera piloto gas y tobera piloto petróleo en SI1; cámara de combustión, tobera piloto petróleo y pieza de transición en SI2, estos no indica la importancia de las inspecciones de combustión (IC) las cuales son las más frecuentes dentro de las intervenciones realizadas a la TG.

Además el *AC* arroja también como componentes con *criticidad alta* en ambas turbinas a las primeras etapas de alabes: alabe fijo de 1° etapa, alabe móvil de 1° etapa y alabe fijo de 2° etapa en SI1; alabe fijo de 1° etapa, alabe móvil de 1° etapa y alabe móvil de 2° etapa en SI2. Tal como se observa en la Tabla 3.19 del capítulo 3.3.

Resultados que se anunciaban luego del análisis y depuración de la información, descritos en el objetivo anterior, donde se observa gran variación de la información consecuencia de los cambios de diseño y constructivos, con la clara intención del fabricante (encargado del mantenimiento), de mejorar la calidad de estos componentes.

En la Tabla 3.19 también se aprecia que los componentes de *criticidad media* arrojados por el *AC* pertenecen a los componentes de la sección de combustión que no clasificaron en *criticidad alta*, ring segmente de 1° etapa, alabe móvil de 3° etapa, y alabes fijos de 2°, 3° y 4° etapa.

Los componentes de *criticidad baja* son los ring segment de 2°, 3° y 4° etapa, alabe móvil de 4° etapa, y dos componentes inusuales: alabe móvil de 2° etapa en SI1, y alabe fijo de 3° etapa en SI2, que se esperaría fueran de criticidad al menos media.

Como se observa, en general, no existen mayores diferencias en los resultados del *AC* para ambas turbinas, sugiriendo un comportamiento más o menos similar para ambas maquinas. Sin embargo, si realizamos un análisis más particular y detallado del *AC*, podemos advertir que los valores de criticidad para un mismo componente cambian entre turbinas, y por lo cual el *orden de criticidad* es diferente entre la unidad SI1 y SI2.

Así, solo los siguientes componentes comparten el mismo orden de criticidad en ambos *AC* realizados: cámara de combustión (1°), alabe móvil de 1° etapa (5°), tobera piloto principal (10°), ring segment de 2° etapa (15°), ring segment de 3° etapa (16°) y ring segment de 4° etapa (17°), tal como se observa en la Tabla 3.20 del capítulo 3.3.3. Es decir solo 6

componentes de 17 comparten el mismo *orden de criticidad*. Sugiriendo un comportamiento de inaceptabilidad diferente entre ambas unidades.

Lo anterior se explica por la variación del factor *frecuencia (F)* entre turbinas para el cálculo de la *criticidad (C)*. El factor *impacto (I)* se valoriza de igual manera para cada componente expuesto a alta temperatura, siendo este de la unidad SI1 o SI2, por lo que no tiene efecto en la variabilidad de la *criticidad* obtenida entre componentes de diferentes turbinas. Además, se recomienda para análisis de criticidad futuros tomar en cuenta en mayor medida el factor *impacto,* introduciendo nuevas características de evaluación como podría ser el *impacto por daños en la instalación al producirse un componente inaceptable,* ya que este factor solo se evaluó en dos características, *impacto en el medio ambiente* e *impacto en costos de reparación*, ya que otros impactos se anularon por diversas razones (el *impacto en seguridad* es nulo ya que no existe riesgo que los modos de falla analizados produzcan daños a algún operario o persona; el *impacto en la producción* también es nulo ya que los componentes son reemplazados en inspecciones programadas, por lo que no hay un disminución de la disponibilidad esperada de la máquina) por lo que es probable que la valoración del factor impacto no sea del todo adecuada.

Luego, si bien un análisis general arroja que ambas turbinas tienen un comportamiento de inaceptabilidad o falla más o menos similar, un análisis más particular y detallado demuestra variaciones que pueden ser explicadas debido a las mismas variaciones en las condiciones operacionales para cada máquina, o por otras razones no previstas en este estudio.

El componente con un valor de criticidad más alto en el *AC* es la cámara de combustión, tanto en SI1 como en SI2. Por lo que se recomienda su constante seguimiento en operación y en las diferentes inspecciones a realizar.

- Determinación de los modos de falla que afectan a los diferentes componentes críticos expuestos a altas temperaturas en la máquina, así como también determinar las posibles causas de estas fallas.

Se pudieron identificar 11 modos de fallo que afectan a los componentes críticos expuestos a altas temperaturas, sin embargo solo 8 de estos modos de fallo producen componentes inaceptables, por lo que se les debe prestar mayor atención, y en lo posible encontrar las causas. Estos son: *perdida de recubrimiento*, *reducción de pared*, *perdida de material*, *grietas*, *oxidación por alta temperatura*, *deformación*, *abolladuras y obstrucción de vías de refrigeración*.

En general, el modo de fallo más frecuente en los componentes críticos obtenidos en el *AC* es *grietas*, presente en 9 componentes de los 12 arrojados por el análisis de criticidad, luego de este *pérdida de recubrimiento* y *deformación* están presente en 6 componentes cada uno. Estos son los modos de fallo más comunes dentro de los componentes críticos, y de acuerdo al objetivo específico propuesto, se deben determinar las posibles causas de estos.

Siendo la cámara de combustión el componente de mayor criticidad arrojado por el modelo *AC*, conocer sus principales modos de fallo que provocan inaceptabilidad, y sus causas, alcanzan gran importancia. En este sentido, el modo de fallo más frecuente en este componente critico es *grietas*, tal como se puede apreciar en la Tabla 4.1, donde se observa los *componentes inaceptables promedios* por inspección analizada en cada modo de fallo (que produce inaceptabilidad) presente en la cámara de combustión de cada unidad.

Tabla 4.1: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, cámara de combustión.

Modos de fallo	SI1 [-]	SI2 [-]
Reducción de pared	0,5	2,5
Pérdida de material	0,3	3,3
Grietas	3,5	5,5
Oxidación alta temp.	0,8	2,8
Deformación	0,3	1,3

Tabla 4.2: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, cámara de combustión.

Variables operacionales	Promedio SI1	Promedio SI2	Porcentaje variación [%]
Horas equivalentes [eoh]	9386,1	10453,0	10
Horas operación [hrs]	7869,4	9394,8	16
Cantidad de trips [-]	3,3	3,5	6
Cantidad de partidas [-]	24,7	19,3	22
Horas operación petróleo [hrs]	1319,2	150,7	89
Horas operación gas [hrs]	6550,2	9244,2	29

En la Tabla 4.1 se puede advertir que existe un mayor número de *componentes inaceptables promedios* en cada modo de fallo en la cámara de combustión SI2, esto se puede explicar por la mayor temperatura de combustión alcanzada en este componente, siendo en SI2 de *1.417 [°C]*, mientras que para la cámara de combustión SI1 esta temperatura alcanza los *1.350 [°C]*. Sumado a lo anterior, se tiene la mayor cantidad de *horas de operación* promedio, y en particular *horas de operación gas* promedio en el componente SI2 como se observa en la Tabla 4.2, lo que causaría este comportamiento.

Se puede advertir además que a pesar del mayor promedio en las variables operacionales *Cantidad partidas* y *Horas operación petróleo* a favor de la cámara de combustión SI1, como se aprecia en la Tabla 4.2, estas no afectan en el comportamiento de inaceptabilidad de este componente en la magnitud que si lo hace la temperatura de combustión.

Un análisis idéntico puede realizarse para los componentes críticos que se repiten en ambas unidades: *alabes fijos de 1° etapa, alabes móviles de 1° etapa y tobera piloto petróleo.*

Para *alabes fijo de 1° etapa* se aprecia en la Tabla 4.3 que los modos de fallo difieren entre unidades, y en proporciones de estos, siendo similar en ambos componentes *oxidación por alta temperatura,* pero de muy baja presencia. Observando la Tabla 4.3 y Tabla 4.4, se puede

concluir que para este componente en particular los modos de fallo *reducción de pared y grietas* pueden ser influenciados por la variable operacional *horas operación petróleo*, ya que el alabe fijo de 1° etapa SI2 tiene presencia fuerte de estos modos de fallo y altas horas de operación con petróleo, en comparación a su homólogo en SI2.

Asimismo, se puede concluir que la *perdida de recubrimiento* en el alabe fijo de 1° etapa es influenciada por la variable operacional *cantidad de partidas*, ya que el alabe fijo de 1° etapa posee fuerte presencia de este modo de fallo y alta cantidad de partidas en comparación con su homólogo de SI2.

Tabla 4.3: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, alabe fijo de 1° etapa.

Modos de fallo	SI1 [-]	SI2 [-]
Pérdida de recubrimiento	9,8	2,6
Reducción de pared	3,0	10,0
Pérdida de material	-	5,0
Grietas	6,8	15,0
Oxidación alta temp.	0,8	0,4
Abolladuras	0,3	-
Obstrucción vías refrigeración	-	0,2

Tabla 4.4: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, alabe fijo de 1° etapa.

Variables operacionales	Promedio SI1	Promedio SI2	Porcentaje variación [%]
Horas equivalentes [eoh]	14690,4	15562,8	6
Horas operación [hrs]	11699,4	12678,6	8
Cantidad de trips [-]	5,8	5,9	2

Cantidad de partidas [-]	58	43,9	24
Horas operación petróleo [hrs]	2436,3	3349,3	27
Horas operación gas [hrs]	9263,1	9330,0	1

Para *alabes móviles de 1° etapa* se aprecia en la Tabla 4.5 que en ambas turbinas comparten los mismos modos de fallo presentes en sus componentes inaceptable: *perdida de recubrimiento* y *obstrucción de vías de refrigeración*, luego si observamos en la Tabla 4.6 el comportamiento operacional en ambas unidades es bastante similar, lo que explicaría el comportamiento similar de los modos de fallo.

Sin embargo no hay pistas cuantitativas para adjudicar una causa a estos modos de fallo, sin embargo este componente tiene un promedio de *horas de operación* más alto que los demás, por lo que esto podría influir en la gran presencia de ambos modos de fallo.

Tabla 4.5: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, alabe móvil de 1° etapa.

Modos de fallo	SI1 [-]	SI2 [-]
Pérdida de recubrimiento	33,0	41,0
Grietas	0,7	-
Abolladuras	0,3	0,3
Obstrucción vías refrigeración	36,7	48,0

Tabla 4.6: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, alabe móvil de 1° etapa.

Variables operacionales	Promedio SI1	Promedio SI2	Porcentaje variación [%]

Horas equivalentes [eoh]	17076,0	18311,0	7
Horas operación [hrs]	13814,3	15035,0	8
Cantidad de trips [-]	6,3	7,3	13
Cantidad de partidas [-]	56,7	51,8	9
Horas operación petróleo [hrs]	3243,5	3376,4	4
Horas operación gas [hrs]	10570,8	11659,5	9

Para *toberas piloto petróleo* se advierte en la Tabla 4.7 que presentan pocos modos de fallo y bajo promedio de componentes inaceptables en las inspecciones analizadas, por esto último no es posible asignarles una posible a causa, debido a su bajo valor de presencia en las toberas.

Tabla 4.7: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, tobera piloto petróleo.

Modos de fallo	SI1 [%]	SI2 [%]
Grietas	0,7	0,8
Deformación	0,4	-

Para los demás componentes con alta criticidad: *tobera piloto gas SI1, alabe fijo de 2° etapa SI1, pieza de transición SI2 y alabe móvil de 2° etapa*, se realizara un análisis individual.

Para *tobera piloto gas SI1,* al igual que a las *toberas piloto petróleo* no es posible asignarles una posible a causa debido a su baja presencia de los modos de fallo en las toberas, tal como se observa en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, tobera piloto gas SI1.

Modos de fallo	SI1 [%]
Grietas	0,7
Deformación	0,4

Para *alabe fijo de 2° etapa SI1,* en la Tabla 4.9 se observa gran presencia de *grietas,* además en la Tabla 4.10 se advierte un alto promedio en la cantidad de *horas de operación,* en particular *horas operación gas,* la cual podría ser la causa de este modo de fallo.

Tabla 4.9: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, alabe fijo de 2° etapa SI1.

Modos de fallo	SI1 [-]
Reducción de pared	2,3
Pérdida de recubrimiento	3,0
Grietas	10,7
Abolladuras	2,3
Obstrucción vías refrigeración	1,0

Tabla 4.10: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, alabe fijo de 2° etapa SI1.

Variables operacionales	Promedio SI1
Horas equivalentes [eoh]	18526,3

Horas operación [hrs]	15877,9
Cantidad de trips [-]	5,0
Cantidad de partidas [-]	67,0
Horas operación petróleo [hrs]	918,0
Horas operación gas [hrs]	14959,9

Para *pieza de transición SI2*, en la Tabla 4.11 se aprecia baja presencia de los modos de fallo, siendo *pérdida de material* el mayor, sin embargo no es posible encontrar alguna causa particular de esto, ya que las variables operacionales están dentro de los rangos comunes entre los componentes de la sección de combustión, tal como se observa en la Tabla 4.12.

Tabla 4.11: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, pieza de transición SI2.

Modos de fallo	SI2 [-]
Pérdida de recubrimiento	0,1
Pérdida de material	2,1
Grietas	1,0

Tabla 4.12: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, pieza de transición SI2.

Variables operacionales	Promedio SI2
Horas equivalentes [eoh]	8413,6
Horas operación [hrs]	6703,5
Cantidad de trips [-]	3,2
Cantidad de partidas [-]	25,7
Horas operación petróleo [hrs]	1485,7
Horas operación gas [hrs]	5217,8

Para *alabe móvil de 2° etapa SI2*, en la *Tabla X* se observa que los componentes inaceptables de este alabe presentan solo *perdida de recubrimiento*, al igual que los alabes móviles de 1° etapa, este componente tiene un promedio de cantidad de *horas operación* alto, en particular *horas operación gas* alto, por lo que podría ser la causa de la presencia de este modo de fallo.

Tabla 4.13: Componentes inaceptables promedio por inspección analizada en cada modo de fallo, alabe móvil de 2° etapa SI2.

Modos de fallo	SI2 [-]
Pérdida de recubrimiento	35,2

Tabla 4.14: Promedio variables operacionales de las inspecciones analizadas, alabe móvil de 2° etapa SI2.

Variables operacionales	Promedio SI2
Horas equivalentes [eoh]	14648,8
Horas operación [hrs]	12028,0
Cantidad de trips [-]	5,8
Cantidad de partidas [-]	41,4
Horas operación petróleo [hrs]	2701,12
Horas operación gas [hrs]	9327,6

A modo de resumen general, se pueden dividir los componentes con alta criticidad en *componentes de sección combustión, alabes fijo de 1° y 2° etapa*, y *alabes móviles de 1° y 2° etapa*, donde estos deben tener mayor importancia a la hora de planificar la mantención de las turbinas a gas.

- Análisis de cómo afectan las condiciones de operación en la vida útil de los componentes críticos, mediante la caracterización del estado de salida de cada componente crítico de la turbina.

Un factor importante a la hora de realizar un análisis estadístico, y en particular un análisis de regresión, es el tamaño muestral o cantidad de datos para realizar el análisis. Como se advierte en el *análisis y depuración de la información histórica*, los componentes críticos presentan mejoras en su diseño a lo largo del tiempo de operación de las turbinas, además de mejoras constructivas menores (como por ejemplo un mayor espesor de recubrimiento), lo que produce una gran variabilidad en los datos de estos componentes. Los componentes con gran variabilidad en los datos son los de la sección de combustión (*toberas piloto, cámaras de combustión y piezas de transición*) y primeras etapas (1° y 2°) de *alabes fijos y móviles*. Como consecuencia de lo anterior se quitan gran cantidad de datos lo que impacta en el tamaño muestral, y finalmente en el análisis de regresión final.

Además de lo anterior, existen algunos componentes que poseen una menor cantidad de datos, debido a la baja frecuencia de intervenciones en ellos. Son componentes fiables y de baja exigencia en la máquina, como lo son las últimas etapas (3° y 4°) de *alabes fijos* y *ring segment*.

Producto de lo anterior solo fue posible obtener un modelo de regresión para 10 componentes expuestos a altas temperaturas (de un total de 28 componentes). De estos 10 componentes solo 5 poseen criticidad alta (de un total de 12, según el modelo *AC)*, los cuales son los componentes que más interesa conocer su comportamiento de inaceptabilidad.

Cuando se tiene una baja cantidad de datos, el análisis puede no ser representativo de la población total, siendo acotado a cierto tipo de componentes, por lo que es recomendable a la hora de establecer conclusiones detallar las características del componente analizado. Particularmente, un bajo tamaño muestral afecta los intervalos de predicción, siendo estos más “anchos” o de menor precisión.

En la *sección de combustión* es posible obtener 3 modelos de regresión: *cámara de combustión SI1, cámara de combustión SI2* y *tobera piloto gas SI2*. Siendo las cámaras de combustión componentes donde es de gran interés conocer su comportamiento de inaceptabilidad debido a que son los elementos con la mayor criticidad según el modelo *AC* aplicado. Sin embargo, para la cámara de combustión SI1 se obtiene un modelo con R^2 *ajustada* de *17,41%*, es decir es un modelo con muy baja representatividad de la muestra, y por lo tanto de la población, por lo que no es válido. Para los demás componentes no nombrados de la *sección de combustión* no se encuentran relaciones entre *Componentes inaceptables* y variables operacionales debido a la variabilidad antes comentada.

Para la cámara de combustión SI2, componente con alta criticidad, se obtiene un modelo con una bondad de ajuste R^2 *ajustada* de *85,97%*, donde se encuentra una relación no lineal entre *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas* (ecuación 3.7), donde debido al tipo de relación es necesario transformar logarítmicamente la variable operacional para cumplir con el supuesto de linealidad. La curva obtenida es levemente cóncava hacia abajo, como se observa en el Gráfico 4.1, lo que trae como consecuencia un rápido crecimiento de la cantidad de componentes inaceptables, en comparación con una curva lineal o cóncava hacia arriba (convexa) para el mismo rango de valores de horas de operación. Además se observa que en el rango de horas de operación con gas estudiado (*7350-12100 [hrs]*) los componentes inaceptables aparecen después de las *7000 [hrs]* de operación con gas.

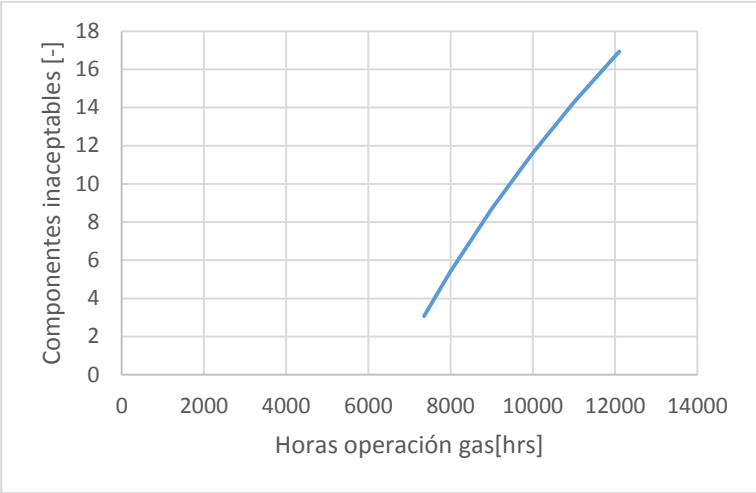


Gráfico 4.1: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, cámara de combustión SI2.

Para la tobera piloto gas SI2, componente de criticidad media, se obtiene un modelo con una bondad de ajuste R^2 *ajustada* de *79,76%,* donde se encuentra una relación lineal entre *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas* (ecuación 3.6). Como se observa en el Gráfico 4.2, la curva obtenida es lineal por lo que el crecimiento de la cantidad de componentes inaceptables es mayor que una curva cóncava hacia arriba, pero menor que una curva cóncava hacia abajo (como el caso de la cámara de combustión SI2), en los rangos de horas estudiados. Además, los componentes inaceptables aparecen cerca de las 9000 [hrs] de operación con gas.

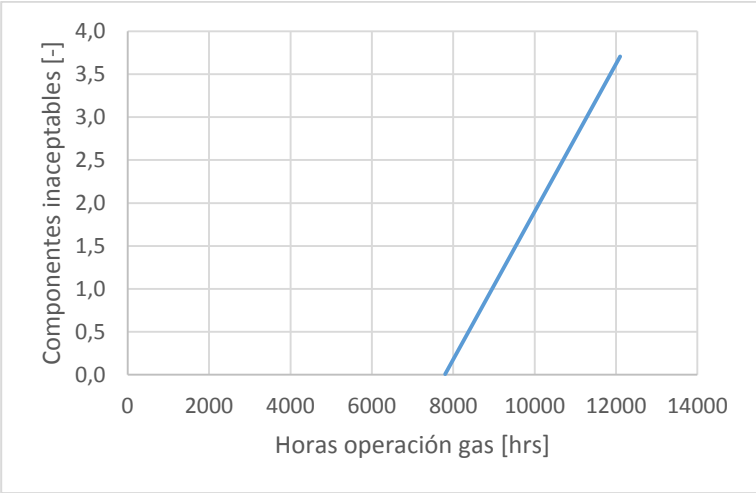


Gráfico 4.2: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, tobera piloto gas SI2.

Para *alabes fijos* se encuentran 3 modelos de regresión, *alabe fijo de 1° etapa SI1*, *alabe fijo de 1° etapa SI2* y *alabe fijo de 2° etapa SI1*. Siendo los alabes fijos de 1° etapa componentes con alta criticidad según el modelo *AC*.

Para el alabe fijo de 1° etapa SI1, componente de alta criticidad, se obtiene un modelo con una bondad de ajuste R^2 *ajustada* de *88,83%*, donde se encuentra una relación no lineal (aproximadamente exponencial) entre *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas* (ecuación 3.2), por lo que se aplica la transformación logarítmica a la variable dependiente. Como se observa en el Gráfico 4.3 la curva obtenida es cóncava hacia arriba o convexa, es decir el crecimiento de la cantidad de componentes inaceptables es lento a bajas horas de operación con gas, y luego es más rápido a altas horas. Los componentes inaceptables aparecen cerca de las *5000 [hrs]* de operación con gas.

Gráfico 4.3: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe fijo de 1° etapa SI1.

Para el alabe fijo de 1° etapa SI2, componente de alta criticidad, se obtiene un modelo con una bondad de ajuste R^2 *ajustada* de *86,89%*, donde se encuentra una relación lineal entre *Componentes inaceptables* y *Cantidad partidas* (ecuación 3.8). Como se observa en el Gráfico 4.4 la relación lineal permite una tasa de crecimiento constante tanto a baja cantidad de partidas como a alta cantidad.

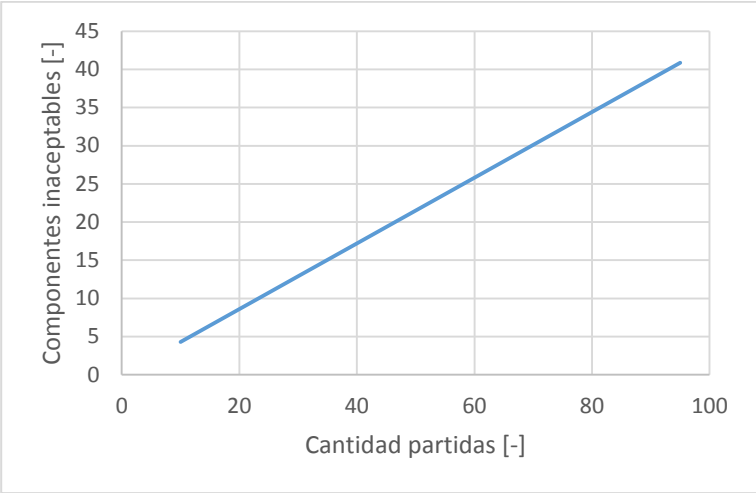


Gráfico 4.4: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe fijo de 1° etapa SI2.

Para el alabe fijo de 2° etapa SI1, componente de alta criticidad, se obtiene un modelo con una bondad de ajuste R^2 *ajustada* de *95,77%*, donde se encuentra una relación no lineal (aproximadamente exponencial) entre *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas* (ecuación 3.3), por lo que se aplica la transformación logarítmica a la variable dependiente. Como se observa en el Gráfico 4.5 la curva que se obtiene es convexa, lo que produce un crecimiento de la tasa de componentes inaceptables más lento a bajas horas de operación con gas que otros componentes, luego a altas horas de operación la tasa de componentes inaceptables aumenta.

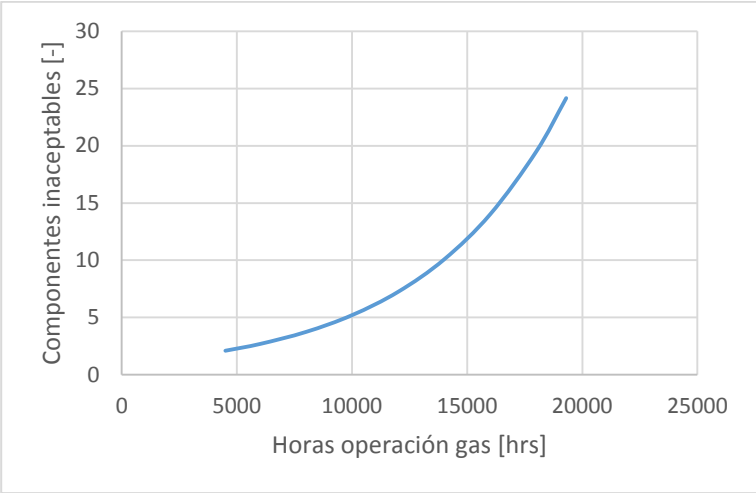


Gráfico 4.5: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe fijo de 2° etapa SI1.

Para *alabes móviles* es posible obtener 3 modelos de regresión más: *alabe móvil de 1° etapa SI2*, *alabe móvil de 3° etapa SI1* y *alabe móvil de 4° etapa SI1*, donde solo el primer componente nombrado pertenece a la lista de alta criticidad.

Para el alabe móvil de 1° etapa SI2, componente de alta criticidad, se obtiene un modelo con una bondad de ajuste R^2 *ajustada* de *97,94%*, donde se encuentra una relación entre *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas*, luego para cumplir con el supuesto de normalidad es necesario realizar una transformación logarítmica a la variable operacional (ecuación 3.9). Como se observa en el Gráfico 4.6 la curva que se obtiene es fuertemente cóncava hacia abajo, lo que produce un crecimiento acelerado de los componentes inaceptables a bajas horas de operación con gas, disminuyendo la tasa de crecimiento a medida que las horas de operación crecen.

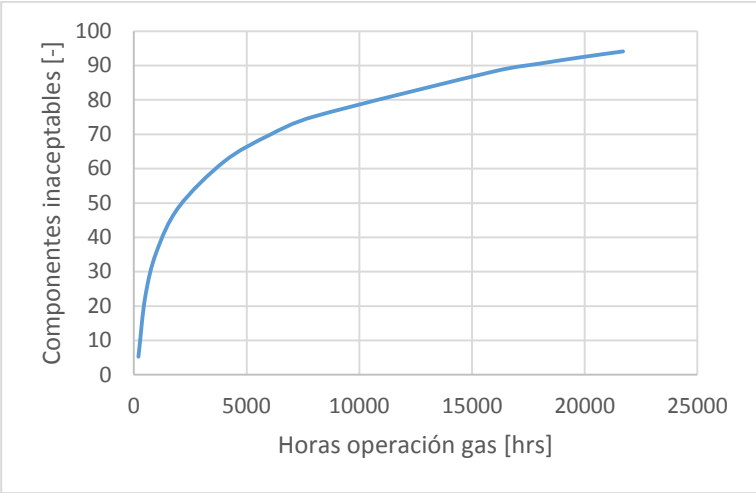


Gráfico 4.6: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe móvil de 1° etapa SI2.

Para el alabe móvil de 3° etapa SI1, componente de criticidad media, se obtiene un modelo con una bondad de ajuste R^2 *ajustada* de *70,85%*, donde se encuentra una relación entre *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas*, sin embargo para cumplir el supuesto de normalidad se realizan las transformaciones recomendadas para tal objetivo: a la variable *Componentes inaceptables* se le aplica una transformación logarítmica, y a la variable operacional *Horas operación gas* se le aplica una transformación inversa (ecuación 3.4). Como se observa en el Gráfico 4.7 la curva de inaceptabilidad es más bien cóncava hacia arriba en las primeras horas de operación con gas en el rango estudiado, luego se produce un punto de inflexión después de las 10000 [hrs], donde la curva es más bien cóncava hacia abajo, sin embargo esta concavidad no es notoria, asimilando más bien una curva lineal. Lo anterior muestra la variación del comportamiento de inaceptabilidad a lo largo del rango de horas de operación con gas estudiadas.

Gráfico 4.7: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe móvil de 3° etapa SI1.

Para el alabe móvil de 4° etapa SI1, componente de baja criticidad, se obtiene un modelo con una bondad de ajuste R^2 *ajustada* de *67,69%*, donde se encuentra una relación no lineal entre *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas* (ecuación 3.5). La curva de inaceptabilidad es cóncava hacia arriba o convexa, como se observa en el Gráfico 4.8, por lo que su comportamiento de inaceptabilidad es favorable, en comparación con otras curvas para un mismo rango de horas de operación.

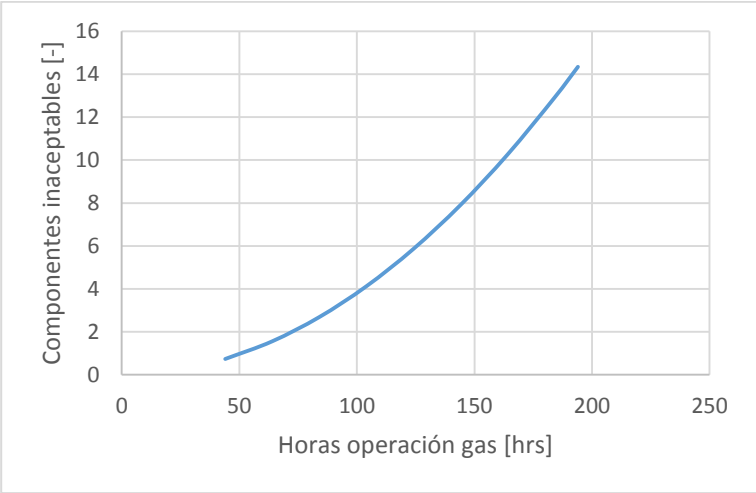


Gráfico 4.8: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, alabe móvil de 4° etapa SI1.

Finalmente, para *ring segment* fue posible obtener solo un modelo de regresión: *ring segment de 1° etapa SI2*, componente de baja criticidad, donde se obtiene un modelo con una bondad de ajuste R^2 *ajustada* de *91,89%*, donde se encuentra una relación no lineal (aproximadamente exponencial) entre *Componentes inaceptables* y *Horas operación gas* (ecuación 3.10), por lo que se aplica la transformación logarítmica a la variable dependiente. La curva de inaceptabilidad observada en el Gráfico 4.9 es cóncava hacia arriba o convexa, luego el comportamiento de inaceptabilidad es favorable, en comparación con otras curvas para un mismo rango de horas de operación.

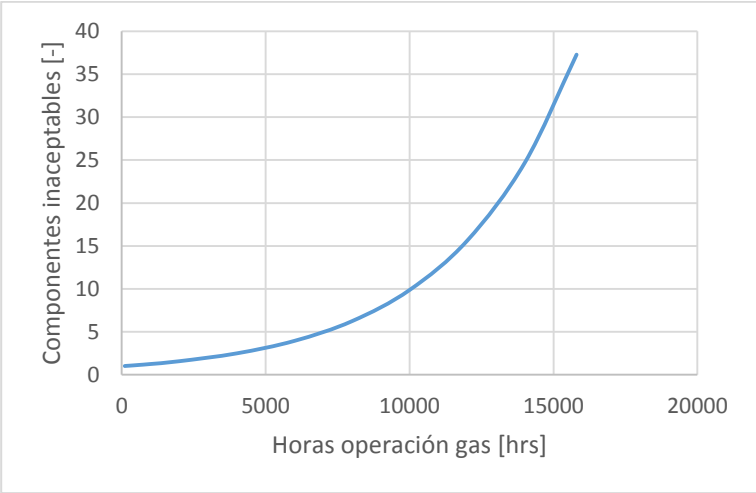


Gráfico 4.9: Curva teórica del modelo de regresión obtenido, ring segment de 1° etapa SI2.

En general se observa en los diferentes gráficos presentados que el comportamiento de inaceptabilidad, es decir la forma de las curvas obtenidas, es mayoritariamente cóncava hacia arriba o convexa. Este comportamiento es el esperado, ya que se obtienen pocos componentes inaceptables a bajas horas de operación (o a bajas cantidades de partidas) y a medida que la variable independiente aumenta, la cantidad de componentes inaceptables aumenta.

Sin embargo, para el *alabe móvil de 1° etapa SI2* se obtiene una curva fuertemente cóncava hacia abajo, es decir a valores bajos de la variable independiente la cantidad de componentes inaceptables aumenta de manera drástica, disminuyendo la tasa de crecimiento a mayores valores de la variable independiente u operacional. Lo anterior puede explicarse debido a la poca cantidad de datos disponible que posee este componente en particular, y además del gran espaciamiento de los datos, es decir datos al inicio de la variable operacional y al final de los valores de la variable operacional, dejando un gran espacio de incertidumbre entre estos valores mínimos y máximos.

CONCLUSIONES

Conclusiones generales

El análisis de criticidad arroja resultados similares para cada unidad: los componentes de combustión, siendo la cámara de combustión el componente de máxima criticidad en ambas turbinas; y las primeras etapas de alabes fijos y móviles (1° y 2° etapa). Lo anterior es explicado por ser los componentes sometidos a mayor exigencia y esfuerzos térmicos, ya que los gases producto de la combustión en esta parte de la turbina alcanzan las mayores temperaturas, por lo que se puede concluir que la temperatura de combustión alcanzada en la turbina es un factor decisivo para obtener componentes inaceptables.

Lo anterior se refuerza comparando ambas turbinas, donde la unidad SI1 alcanza una temperatura de combustión de *1.350 [°C]*, mientras que la unidad SI2 alcanza una temperatura de *1.417 [°C]*, lo que trae como consecuencia que la cantidad de componentes inaceptables promedios por cada modo de fallo para la *cámara de combustión* sea mayor en la unidad SI2. Esta tendencia también se observa en los *alabes fijos de 1° etapa, alabes móviles de 1° etapa y tobera piloto petróleo.*

Existen 8 modos de fallo que producen componentes inaceptables en los componentes expuestos a altas temperaturas críticos: *perdida de recubrimiento, reducción de pared, perdida de material, grietas, oxidación por alta temperatura, deformación, abolladuras y obstrucción de vías de refrigeración*. El más frecuente es *grietas*, presente en 9 componentes de los 12 arrojados por el análisis de criticidad.

Las variables operacionales: *cantidad de trips, cantidad de partidas, horas de operación con petróleo y horas de operación con gas*, fueron asumidas como las principales causas de componentes inaceptables, por lo tanto de los modos de fallo, al realizar este estudio. Sin embargo un análisis más detallado de los modos de fallo para los componentes críticos y el análisis de regresión para los componentes con data disponible para ello, arroja que solo

existe relación principalmente con las variables *cantidad de partidas* y *horas de operación con gas*, siendo esta última las causa más frecuente para explicar la cantidad de componentes inaceptables en los análisis de regresión realizados.

Para los análisis de regresión el principal problema que se presento fue la gran variabilidad de la información para los componentes estudiados. Esta variabilidad es causa de los diferentes cambios de diseño en algunos componentes críticos, como son los componentes de la sección de combustión, y algunas mejoras constructivas menores (por ejemplo, aumento en el espesor de recubrimiento) en varios componentes. Esta variabilidad trae como consecuencia eliminar del análisis gran cantidad de datos, lo que produce perdida de representatividad de la muestra en la población de datos.

Conclusiones específicas

El análisis de criticidad *AC* arroja resultados similares para ambas turbinas en forma general, sin embargo si se analiza de manera más específica se observan diferencias en el *orden de criticidad*, es decir que componente es más crítico que otro, donde solo 6 componentes de 17 comparten el mismo orden de criticidad, sugiriendo un comportamiento de inaceptabilidad diferente entre unidades generadoras.

Este comportamiento de inaceptabilidad diferente puede ser explicado debido a las fluctuaciones de las variables operacionales estudiadas en ambas turbinas, además de la diferencia de temperatura, y por ende de potencia, que poseen las unidades.

Asimismo, el AC arroja 12 componentes con criticidad alta, para los cuales es importante conocer sus modos de fallo, y causas que provocan estos, además de las causas que producen inaceptabilidad. Se logró obtener solo 5 modelos de regresión univariante para estos componentes críticos, los cuales refuerzan el análisis.

La *cámara de combustión* posee 5 modos de fallo recurrentes que provocan inaceptabilidad, estos son: *reducción de pared, perdida de material, oxidación a alta temperatura, deformación* y *grietas*, donde esta última es la más frecuente en los componentes inaceptables de la cámara de combustión. Al analizar las posibles causas de estos modos de fallo no se encuentran causas específicas para cada modo de fallo, pero si causas generales para estos. Se puede concluir que producto de la alta *temperatura de combustión*, sumado a las *horas de operación con gas*, se producen los diferentes modos de fallo nombrados.

Lo anterior se ratifica al obtener un modelo de regresión valido para la *cámara de combustión SI2*, donde se encuentra una ecuación univariante que relaciona la cantidad de *componentes inaceptables* con las *horas de operación con gas*.

Los *alabes fijos de 1° etapa* posen 4 modos de fallo recurrentes que provocan inaceptabilidad: *perdida de recubrimiento, reducción de pared, perdida de material* y *grietas*. Además algunos componentes inaceptables presentan *oxidación por alta temperatura, abolladuras* y *obstrucción de vías de refrigeración*, pero en menor proporción. Se concluye que las posible causa para los modos de fallo *reducción de pared* y *grietas* son las *horas de operación con petróleo*. Además, se deduce que la *perdida de recubrimiento* es influenciada por la variable operacional *cantidad de partidas.*

Es posible obtener modelos de regresión univariantes para este componente y para ambas unidades, en donde para el *alabe fijo de 1° etapa SI1* se encuentra una ecuación que relaciona la cantidad de *componentes inaceptables* con las *horas de operación con gas*; y para el *alabe fijo de 1° etapa SI2* se relaciona la cantidad de *componentes inaceptables* con la *cantidad de partidas*.

Para los *alabes móviles de 1° etapa* se encuentran dos modos de fallo recurrentes que producen inaceptabilidad: *perdida de recubrimiento* y *obstrucción de vías de refrigeración*, pero no es posible encontrar causas directas a estos modos de fallo.

Sin embargo, se obtiene un modelo de regresión univariante para el *alabe fijo de 1° etapa SI2*, donde se encuentra una ecuación que relaciona los *componentes inaceptables* con las *horas de operación con gas*. Por lo tanto es plausible concluir que esta variable operacional es la causa de *perdida de recubrimiento* y *obstrucción de vías de refrigeración* en este componente.

Para la *tobera piloto petróleo* se advierten dos modos de fallo: grietas y deformación, sin embargo poseen un bajo promedio de componentes inaceptables en las inspecciones analizadas, por esto último no es posible asignarles una posible a causa, debido a su baja presencia.

Para la *tobera piloto gas SI1*, posee dos modos de fallo: *grietas* y *deformación*, pero debido a su baja presencia no es posible asignarles una causa.

Para el *alabe fijo de 2° etapa SI1*, se observa gran presencia de *grietas* y es posible que la causa de esto sea la variable operacional *horas de operación con gas*, tal como el modelo de regresión univariante obtenido para este componente lo sugiere, donde se encuentra una ecuación que relaciona la cantidad de *componentes inaceptables* y las *horas de operación con gas*.

Para la *pieza de transición SI2* el modo de fallo más recurrente es *perdida de material*, sin embargo no es posible encontrar una causa específica para esto.

Para el *alabe móvil de 2° etapa SI2* el modo de fallo presente en los componentes inaceptables es *perdida de recubrimiento*, donde una de las causas de esto es las altas *horas de operación con gas*.

Además de los 5 componentes críticos donde se logró obtener un modelo de regresión valido, se obtuvo 4 modelos adicionales: tobera piloto gas SI2, alabe móvil de 3° etapa SI2, alabe móvil de 4° etapa SI1 y ring segment de 1° etapa SI2. Exceptuando el alabe móvil de 4° etapa

SI1, todos los modelos relacionan los componentes inaceptables con la cantidad de horas de operación con gas. Para el alabe móvil de 4° etapa SI1 se encontró una relación entre la cantidad de componentes inaceptables y cantidad de partidas.

Recomendaciones

- Debido a la variabilidad constructiva de los componentes, es necesario hacer énfasis en que las siguientes recomendaciones quedan supeditadas al idéntico diseño y calidad constructiva que posean los componentes. Es decir, los resultados obtenidos en este estudio son válidos para el tipo de componente en particular, en la turbina estudiada, con su respectivo diseño y calidad constructiva.
- En el Análisis de Criticidad (AC), para la evaluación del Impacto, se recomienda para un estudio más detallado y representativo, adicionar nuevos impactos que influyan en este factor, tales como el impacto por daños en la instalación al producirse un componente inaceptable.
- El componente con mayor criticidad en ambas turbinas estudiadas es la cámara de combustión, por lo que es recomendable asegurar un suministro de repuestos constante en el almacén, haciendo énfasis en las inspecciones.
- Otros componentes con alta criticidad compartidos por ambas turbinas son: tobera piloto petróleo, alabe fijo de 1° etapa y alabe móvil de 1° etapa. Al igual que la cámara de combustión es recomendable hacer énfasis en estos en las inspecciones.
- Al encontrarse la variable operacional Horas de operación con gas como la variable que causa los diferentes modos de fallo e inaceptabilidad en los componentes, siendo esta una variable que no se puede eliminar o disminuir, se recomienda el cuidado en la calidad de este combustible, siendo un factor importante las impurezas o elementos externos dañinos que pueda tener el gas natural.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

[1] Minitab versión de prueba gratis. http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/free-trial/

[2] Apunte Ingeniería de plantas industriales ICN-342, Políticas de mantenimiento, Mónica López Campos, 2° semestre 2014.

[3] Internet – AMFE: Analisis Modal de Fallos y Efectos. http://www.valoryempresa.com/archives/amfefmea.pdf

[4] Gujarati, Damodar; Porter, Dawn. Econometría. 5° ed. México: Mc Graw Hill Educacion, 2009. 921p.

[5] Norma ASTM. Standard Practice for Dealing With Outlying Observations. ASTM E178-08. Estados Unidos, 2008.

[6] Hair, Joseph; Anderson, Rolph; Tatham, Ronald; Black, William. Análisis Multivariante. 5° ed. Madrid: Prentice Hall Iberia, 1999. 832p.

[7] Internet- Portal Endesa chile Grupo Enel. http://www.endesa.cl/es/conocenos/nuestroNegocio/centrales/Paginas/centralsanisidro.aspx

[8] Internet- Portal Endesa Chile Grupo Enel. http://www.endesa.cl/es/conocenos/nuestroNegocio/centrales/Paginas/centralsanisidrosegundaunidad.aspx

[9] Informes de inspección turbina a gas M701F en central termoeléctrica San Isidro. Mitsubishi.

[10] Janawitz, Jamison; Masso, James; Childs, Christopher. Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations. Atlanta: GE Power and Water.

ANEXOS

A-1: Tabla valores críticos del estadístico T, norma ASTM E178-08.

TABLE 1 Critical Values for *T* (One-Sided Test) When Standard Deviation is Calculated from the Same Sample[A]

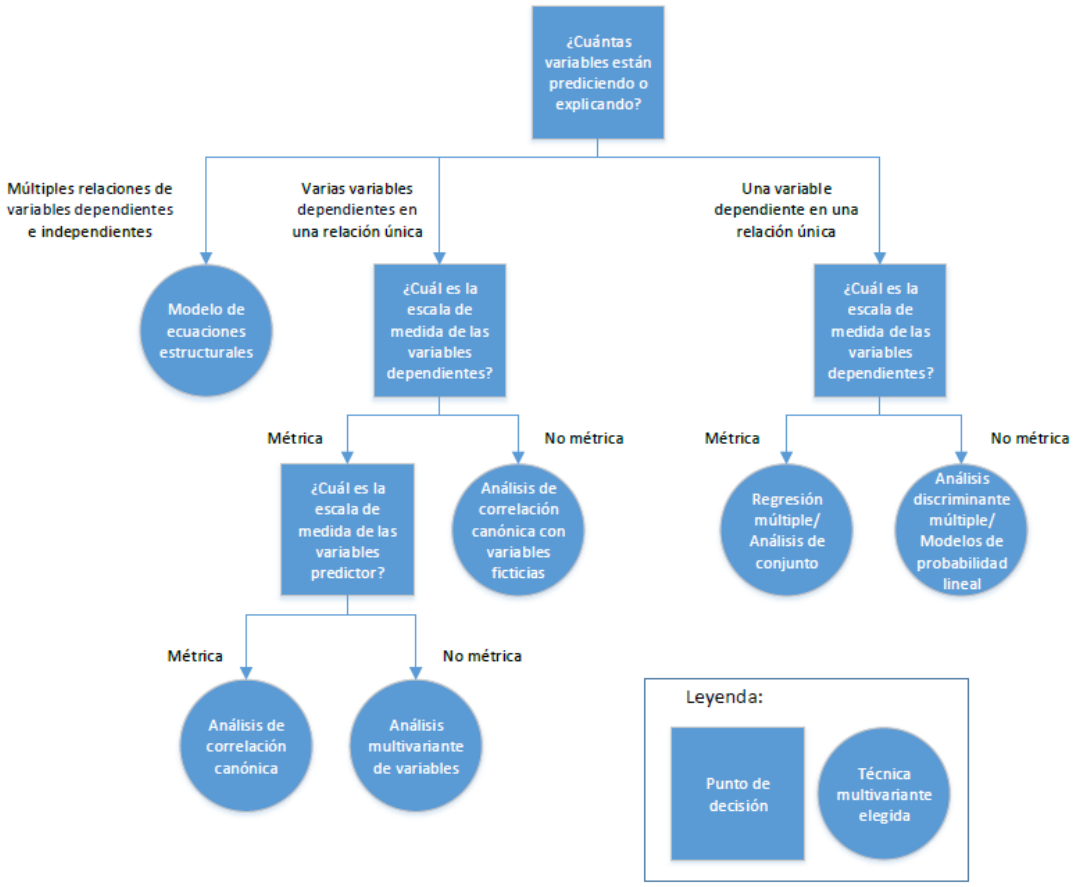
Number of Observations, *n*	Upper 0.1 % Significance Level	Upper 0.5 % Significance Level	Upper 1 % Significance Level	Upper 2.5 % Significance Level	Upper 5 % Significance Level	Upper 10 % Significance Level
3	1.155	1.155	1.155	1.155	1.153	1.148
4	1.499	1.496	1.492	1.481	1.463	1.425
5	1.780	1.764	1.749	1.715	1.672	1.602
6	2.011	1.973	1.944	1.887	1.822	1.729
7	2.201	2.139	2.097	2.020	1.938	1.828
8	2.358	2.274	2.221	2.126	2.032	1.909
9	2.492	2.387	2.323	2.215	2.110	1.977
10	2.606	2.482	2.410	2.290	2.176	2.036
11	2.705	2.564	2.485	2.355	2.234	2.088
12	2.791	2.636	2.550	2.412	2.285	2.134
13	2.867	2.699	2.607	2.462	2.331	2.175
14	2.935	2.755	2.659	2.507	2.371	2.213
15	2.997	2.806	2.705	2.549	2.409	2.247
16	3.052	2.852	2.747	2.585	2.443	2.279
17	3.103	2.894	2.785	2.620	2.475	2.309
18	3.149	2.932	2.821	2.651	2.504	2.335
19	3.191	2.968	2.854	2.681	2.532	2.361
20	3.230	3.001	2.884	2.709	2.557	2.385
21	3.266	3.031	2.912	2.733	2.580	2.408
22	3.300	3.060	2.939	2.758	2.603	2.429
23	3.332	3.087	2.963	2.781	2.624	2.448
24	3.362	3.112	2.987	2.802	2.644	2.467
25	3.389	3.135	3.009	2.822	2.663	2.486
26	3.415	3.157	3.029	2.841	2.681	2.502
27	3.440	3.178	3.049	2.859	2.698	2.519
28	3.464	3.199	3.068	2.876	2.714	2.534
29	3.486	3.218	3.085	2.893	2.730	2.549
30	3.507	3.236	3.103	2.908	2.745	2.563
31	3.528	3.253	3.119	2.924	2.759	2.577
32	3.546	3.270	3.135	2.938	2.773	2.591
33	3.565	3.286	3.150	2.952	2.786	2.604
34	3.582	3.301	3.164	2.965	2.799	2.616
35	3.599	3.316	3.178	2.979	2.811	2.628

A-2: Tabla calculo estadístico de prueba de Dixon y valores críticos, norma ASTM E178-08.

TABLE 2 Dixon Criteria for Testing of Extreme Observation (Single Sample)[A]

n	Criterion	Significance Level (One-Sided Test)		
		10 percent	5 percent	1 percent
3	$r_{10} = (x_2 - x_1)/(x_n - x_1)$ if smallest value is suspected;	0.886	0.941	0.988
4	$= (x_n - x_{n-1})/(x_n - x_1)$ if largest value is suspected	0.679	0.765	0.889
5		0.557	0.642	0.780
6		0.482	0.560	0.698
7		0.434	0.507	0.637
8	$r_{11} = (x_2 - x_1)/(x_{n-1} - x_1)$ if smallest value is suspected;	0.479	0.554	0.683
9	$= (x_n - x_{n-1})/(x_n - x_2)$ if largest value is suspected.	0.441	0.512	0.635
10		0.409	0.477	0.597
11	$r_{21} = (x_3 - x_1)/(x_{n-1} - x_1)$ if smallest value is suspected;	0.517	0.576	0.679
12	$= (x_n - x_{n-2})/(x_n - x_2)$ if largest value is suspected.	0.490	0.546	0.642
13		0.467	0.521	0.615
14	$r_{22} = (x_3 - x_1)/(x_{n-2} - x_1)$ if smallest value is suspected;	0.492	0.546	0.641
15	$= (x_n - x_{n-2})/(x_n - x_3)$ if largest value is suspected.	0.472	0.525	0.616
16		0.454	0.507	0.595
17		0.438	0.490	0.577
18		0.424	0.475	0.561
19		0.412	0.462	0.547
20		0.401	0.450	0.535
21		0.391	0.440	0.524
22		0.382	0.430	0.514
23		0.374	0.421	0.505
24		0.367	0.413	0.497
25		0.360	0.406	0.489
26		0.354	0.399	0.486
27		0.348	0.393	0.475
28		0.342	0.387	0.469
29		0.337	0.381	0.463
30		0.332	0.376	0.457

A-3: Diagrama de flujo para elegir el análisis multivariante apropiado.



A-4: Estadístico d de Durbin-Watson para un nivel de significancia de 0,05.

TABLA D.5A **Estadístico *d* de Durbin-Watson: puntos de significancia de d_L y d_U en el nivel de significancia de 0.05**

	$k' = 1$		$k' = 2$		$k' = 3$		$k' = 4$		$k' = 5$		$k' = 6$		$k' = 7$		$k' = 8$		$k' = 9$		$k' = 10$	
n	d_L	d_U	d_L	d_U	d_L	d_U	d_L	d_U	d_L	d_U	d_L	d_U	d_L	d_U	d_L	d_U	d_L	d_U	d_L	d_U
6	0.610	1.400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	0.700	1.356	0.467	1.896	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	0.763	1.332	0.559	1.777	0.368	2.287	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	0.824	1.320	0.629	1.699	0.455	2.128	0.296	2.588	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	0.879	1.320	0.697	1.641	0.525	2.016	0.376	2.414	0.243	2.822	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	0.927	1.324	0.658	1.604	0.595	1.928	0.444	2.283	0.316	2.645	0.203	3.005	—	—	—	—	—	—	—	—
12	0.971	1.331	0.812	1.579	0.658	1.864	0.512	2.177	0.379	2.506	0.268	2.832	0.171	3.149	—	—	—	—	—	—
13	1.010	1.340	0.861	1.562	0.715	1.816	0.574	2.094	0.445	2.390	0.328	2.692	0.230	2.985	0.147	3.266	—	—	—	—
14	1.045	1.350	0.905	1.551	0.767	1.779	0.632	2.030	0.505	2.296	0.389	2.572	0.286	2.848	0.200	3.111	0.127	3.360	—	—
15	1.077	1.361	0.946	1.543	0.814	1.750	0.685	1.977	0.562	2.220	0.447	2.472	0.343	2.727	0.251	2.979	0.175	3.216	0.111	3.438
16	1.106	1.371	0.982	1.539	0.857	1.728	0.734	1.935	0.615	2.157	0.502	2.388	0.398	2.624	0.304	2.860	0.222	3.090	0.155	3.304
17	1.133	1.381	1.015	1.536	0.897	1.710	0.779	1.900	0.664	2.104	0.554	2.318	0.451	2.537	0.356	2.757	0.272	2.975	0.198	3.184
18	1.158	1.391	1.046	1.535	0.933	1.696	0.820	1.872	0.710	2.060	0.603	2.257	0.502	2.461	0.407	2.667	0.321	2.873	0.244	3.073
19	1.180	1.401	1.074	1.536	0.967	1.685	0.859	1.848	0.752	2.023	0.649	2.206	0.549	2.396	0.456	2.589	0.369	2.783	0.290	2.974
20	1.201	1.411	1.100	1.537	0.998	1.676	0.894	1.828	0.792	1.991	0.692	2.162	0.595	2.339	0.502	2.521	0.416	2.704	0.336	2.885
21	1.221	1.420	1.125	1.538	1.026	1.669	0.927	1.812	0.829	1.964	0.732	2.124	0.637	2.290	0.547	2.460	0.461	2.633	0.380	2.806
22	1.239	1.429	1.147	1.541	1.053	1.664	0.958	1.797	0.863	1.940	0.769	2.090	0.677	2.246	0.588	2.407	0.504	2.571	0.424	2.734
23	1.257	1.437	1.168	1.543	1.078	1.660	0.986	1.785	0.895	1.920	0.804	2.061	0.715	2.208	0.628	2.360	0.545	2.514	0.465	2.670
24	1.273	1.446	1.188	1.546	1.101	1.656	1.013	1.775	0.925	1.902	0.837	2.035	0.751	2.174	0.666	2.318	0.584	2.464	0.506	2.613
25	1.288	1.454	1.206	1.550	1.123	1.654	1.038	1.767	0.953	1.886	0.868	2.012	0.784	2.144	0.702	2.280	0.621	2.419	0.544	2.560
26	1.302	1.461	1.224	1.553	1.143	1.652	1.062	1.759	0.979	1.873	0.897	1.992	0.816	2.117	0.735	2.246	0.657	2.379	0.581	2.513
27	1.316	1.469	1.240	1.556	1.162	1.651	1.084	1.753	1.004	1.861	0.925	1.974	0.845	2.093	0.767	2.216	0.691	2.342	0.616	2.470
28	1.328	1.476	1.255	1.560	1.181	1.650	1.104	1.747	1.028	1.850	0.951	1.958	0.874	2.071	0.798	2.188	0.723	2.309	0.650	2.431
29	1.341	1.483	1.270	1.563	1.198	1.650	1.124	1.743	1.050	1.841	0.975	1.944	0.900	2.052	0.826	2.164	0.753	2.278	0.682	2.396
30	1.352	1.489	1.284	1.567	1.214	1.650	1.143	1.739	1.071	1.833	0.998	1.931	0.926	2.034	0.854	2.141	0.782	2.251	0.712	2.363
31	1.363	1.496	1.297	1.570	1.229	1.650	1.160	1.735	1.090	1.825	1.020	1.920	0.950	2.018	0.879	2.120	0.810	2.226	0.741	2.333
32	1.373	1.502	1.309	1.574	1.244	1.650	1.177	1.732	1.109	1.819	1.041	1.909	0.972	2.004	0.904	2.102	0.836	2.203	0.769	2.306
33	1.383	1.508	1.321	1.577	1.258	1.651	1.193	1.730	1.127	1.813	1.061	1.900	0.994	1.991	0.927	2.085	0.861	2.181	0.795	2.281
34	1.393	1.514	1.333	1.580	1.271	1.652	1.208	1.728	1.144	1.808	1.080	1.891	1.015	1.979	0.950	2.069	0.885	2.162	0.821	2.257
35	1.402	1.519	1.343	1.584	1.283	1.653	1.222	1.726	1.160	1.803	1.097	1.884	1.034	1.967	0.971	2.054	0.908	2.144	0.845	2.236
36	1.411	1.525	1.354	1.587	1.295	1.654	1.236	1.724	1.175	1.799	1.114	1.877	1.053	1.957	0.991	2.041	0.930	2.127	0.868	2.216
37	1.419	1.530	1.364	1.590	1.307	1.655	1.249	1.723	1.190	1.795	1.131	1.870	1.071	1.948	1.011	2.029	0.951	2.112	0.891	2.198
38	1.427	1.535	1.373	1.594	1.318	1.656	1.261	1.722	1.204	1.792	1.146	1.864	1.088	1.939	1.029	2.017	0.970	2.098	0.912	2.180
39	1.435	1.540	1.382	1.597	1.328	1.658	1.273	1.722	1.218	1.789	1.161	1.859	1.104	1.932	1.047	2.007	0.990	2.085	0.932	2.164
40	1.442	1.544	1.391	1.600	1.338	1.659	1.285	1.721	1.230	1.786	1.175	1.854	1.120	1.924	1.064	1.997	1.008	2.072	0.952	2.149
45	1.475	1.566	1.430	1.615	1.383	1.666	1.336	1.720	1.287	1.776	1.238	1.835	1.189	1.895	1.139	1.958	1.089	2.022	1.038	2.088
50	1.503	1.585	1.462	1.628	1.421	1.674	1.378	1.721	1.335	1.771	1.291	1.822	1.246	1.875	1.201	1.930	1.156	1.986	1.110	2.044
55	1.528	1.601	1.490	1.641	1.452	1.681	1.414	1.724	1.374	1.768	1.334	1.814	1.294	1.861	1.253	1.909	1.212	1.959	1.170	2.010
60	1.549	1.616	1.514	1.652	1.480	1.689	1.444	1.727	1.408	1.767	1.372	1.808	1.335	1.850	1.298	1.894	1.260	1.939	1.222	1.984
65	1.567	1.629	1.536	1.662	1.503	1.696	1.471	1.731	1.438	1.767	1.404	1.805	1.370	1.843	1.336	1.882	1.301	1.923	1.266	1.964
70	1.583	1.641	1.554	1.672	1.525	1.703	1.494	1.735	1.464	1.768	1.433	1.802	1.401	1.837	1.369	1.873	1.337	1.910	1.305	1.948
75	1.598	1.652	1.571	1.680	1.543	1.709	1.515	1.739	1.487	1.770	1.458	1.801	1.428	1.834	1.399	1.867	1.369	1.901	1.339	1.935
80	1.611	1.662	1.586	1.688	1.560	1.715	1.534	1.743	1.507	1.772	1.480	1.801	1.453	1.831	1.425	1.861	1.397	1.893	1.369	1.925
85	1.624	1.671	1.600	1.696	1.575	1.721	1.550	1.747	1.525	1.774	1.500	1.801	1.474	1.829	1.448	1.857	1.422	1.886	1.396	1.916
90	1.635	1.679	1.612	1.703	1.589	1.726	1.566	1.751	1.542	1.776	1.518	1.801	1.494	1.827	1.469	1.854	1.445	1.881	1.420	1.909
95	1.645	1.687	1.623	1.709	1.602	1.732	1.579	1.755	1.557	1.778	1.535	1.802	1.512	1.827	1.489	1.852	1.465	1.877	1.442	1.903
100	1.654	1.694	1.634	1.715	1.613	1.736	1.592	1.758	1.571	1.780	1.550	1.803	1.528	1.826	1.506	1.850	1.484	1.874	1.462	1.898
150	1.720	1.746	1.706	1.760	1.693	1.774	1.679	1.788	1.665	1.802	1.651	1.817	1.637	1.832	1.622	1.847	1.608	1.862	1.594	1.877
200	1.758	1.778	1.748	1.789	1.738	1.799	1.728	1.810	1.718	1.820	1.707	1.831	1.697	1.841	1.686	1.852	1.675	1.863	1.665	1.874

A-5: Tabla de distribución t.

TABLA D.2

Puntos porcentuales de la distribución *t*

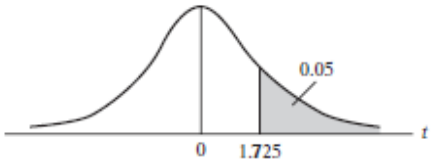
Fuente: De E. S. Pearson y H. O. Hartley (eds.), *Biometrika Tables for Statisticians*, vol. 1, 3a. ed., tabla 12, Cambridge University Press, Nueva York, 1966. Se reproduce con autorización de los editores y los fideicomisarios de *Biometrika*.

Ejemplo

$\Pr(t > 2.086) = 0.025$

$\Pr(t > 1.725) = 0.05$ para gl = 20

$\Pr(|t| > 1.725) = 0.10$



Pr / gl	0.25 0.50	0.10 0.20	0.05 0.10	0.025 0.05	0.01 0.02	0.005 0.010	0.001 0.002
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.31
2	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327
3	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.214
4	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893
6	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501
9	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297
10	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930
13	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610
19	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
21	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527
22	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505
23	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485
24	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467
25	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450
26	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435
27	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421
28	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408
29	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396
30	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385
40	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307
60	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232
120	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.160
∞	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090

Nota: La probabilidad más baja que aparece en el encabezado de cada columna es el área en una cola; la probabilidad más alta es el área en ambas colas.

A-6: Diagrama de flujo de componentes expuestos a altas temperaturas en turbina a gas modelo M701F.

A-7: Tabla resumen de resultado del análisis y depuración de la información histórica SI1.

N°	*Componente*	*N antes de la depuración*	*N después de la depuración*	*Observación*
1	Tobera piloto principal	16	8	- En IT 2006 se produce un cambio de diseño.
2	Tobera piloto gas	16	7	- En IT 2006 se produce un cambio de diseño. - Dato atípico: 10-sept-2011. Menor calidad constructiva.
3	Tobera piloto petróleo	16	7	- En IT 2006 se produce un cambio de diseño. - Dato atípico: 10-sept-2011. Menor calidad constructiva.
4	Cámara de combustión	16	6	- En IT 2006 se produce un cambio de diseño. - Dato atípico: 22-jun-2009. Menor calidad constructiva.
5	Pieza de transición	16	7	- En IT 2006 se produce un cambio de diseño. - Dato atípico: 27-sept-2010. Menor calidad constructiva.
6	Alabe fijo de 1° etapa	11	7	- En IC 2005 se produce un cambio en los componentes que implica una mejora en la calidad constructiva.
7	Alabe fijo de 2° etapa	10	7	- En IM 2000 se produce un cambio en los componentes que implica una mejora en la calidad constructiva.

				- Dato atípico: 12-jun-2008: menor calidad constructiva.
8	Alabe fijo de 3° etapa	3	3	- No hay indicaciones.
9	Alabe fijo de 4° etapa	2	2	- No hay indicaciones.
10	Alabe móvil de 1° etapa	11	4	- En IT 2004 se produce un cambio de diseño en los componentes.
11	Alabe móvil de 2° etapa	8	8	- No hay indicaciones.
12	Alabe móvil de 3° etapa	9	8	- Dato atípico: 27-sept-2010. Menor calidad constructiva.
13	Alabe móvil de 4° etapa	8	7	- Dato atípico: 01-oct-2004. Menor calidad constructiva.
14	Ring segment de 1° etapa	9	5	- No hay indicaciones.
15	Ring segment de 2° etapa	7	5	- Dato atípico: 01-oct-2004. Dato particular, es la primera inspección donde estos componentes son retirados, después de su instalación en el año 1997, y todos los componentes están en condiciones aceptables.
16	Ring segment de 3° etapa	3	3	- No hay indicaciones.
17	Ring segment de 4° etapa	1	1	- No hay indicaciones.

A-8: Tabla resumen de resultado del análisis y depuración de la información histórica SI2.

N°	Componente	N antes de la depuración	N después de la depuración	Observación
1	Tobera piloto principal	8	5	- En IC 2009 se produce un cambio de diseño en los componentes.
2	Tobera piloto gas	8	4	- En IC 2009 se produce un cambio de diseño en los componentes. - Dato atípico: 07-ene-2014, menor calidad constructiva.
3	Tobera piloto petróleo	8	5	- En IC 2009 se produce un cambio de diseño en los componentes.
4	Cámara de combustión	8	4	- En IC 2009 se produce un cambio de diseño en los componentes. - Dato atípico: 07-ene.2014, menor calidad constructiva.
5	Pieza de transición	9	9	- No hay indicaciones.
6	Alabe fijo de 1° etapa	5	5	- No hay indicaciones.
7	Alabe fijo de 2° etapa	4	4	- No hay indicaciones.
8	Alabe fijo de 3° etapa	1	1	- No hay indicaciones.
9	Alabe fijo de 4° etapa	1	1	- No hay indicaciones.
10	Alabe móvil de 1° etapa	4	4	- No hay indicaciones.
11	Alabe móvil de 2° etapa	5	5	- No hay indicaciones.
12	Alabe móvil de 3° etapa	2	2	- No hay indicaciones.

13	Alabe móvil de 4° etapa	1	1	- No hay indicaciones.
14	Ring segment de 1° etapa	5	4	- Dato atípico: 31-ago-2015, mayor calidad constructiva.
15	Ring segment de 2° etapa	4	4	- No hay indicaciones.
16	Ring segment de 3° etapa	1	1	- No hay indicaciones.
17	Ring segment de 4° etapa	0	0	- No hay indicaciones.

A-9: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, cámara de combustión SI1.

Análisis de la varianza:					
Fuente de variación	*Grados de libertad (GL)*	*Suma de cuadrados ajustada (SC)*	*Suma de cuadrados promedio ajustada (SCP)*	*Estadístico F*	*Valor p*
Ln(Horas operación petróleo)	1	0,6457	0,6457	2,05	0,225
Error	4	1,2575	0,3144		
Total	5	1,9031			
Resumen modelo:					
S		R^2		R^2 *ajustada*	
0,5607		33,93%		17,41%	
Coeficientes:					
Termino		*Coeficiente*	*Error estándar del coeficiente*	*Estadístico T*	*Valor p*
Constante		0,432	0,615	0,70	0,521
Ln(Horas operación petróleo)		0,148	0,103	1,43	0,225

A-10: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, alabe fijo de 1° etapa SI1.

Análisis de la varianza:					
Fuente de variación	*Grados de libertad (GL)*	*Suma de cuadrados ajustada (SC)*	*Suma de cuadrados promedio ajustada (SCP)*	*Estadístico F*	*Valor p*
Horas operación gas	1	26,550	26,5504	48,73	0,001
Error	5	2,725	0,5449		
Total	6	29,275			
Resumen modelo:					
S		R^2		R^2 *ajustada*	
0,738174		90,69%		88,83%	
Coeficientes:					
Termino		*Coeficiente*	*Error estándar del coeficiente*	*Estadístico T*	*Valor p*
Horas operación gas		0,000211	0,000030	6,98	0,001

A-11: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, alabe fijo de 2° etapa SI1.

Análisis de la varianza:					
Fuente de variación	*Grados de libertad (GL)*	*Suma de cuadrados ajustada (SC)*	*Suma de cuadrados promedio ajustada (SCP)*	*Estadístico F*	*Valor p*
Horas operación gas	1	27,526	27,5258	159,40	0,000
Error	6	1,036	0,1727		
Total	7	28,562			
Resumen modelo:					
S		R^2		R^2 *ajustada*	
0,415549		96,37%		95,77%	
Coeficientes:					
Termino		*Coeficiente*	*Error estándar del coeficiente*	*Estadístico T*	*Valor p*
Horas operación gas		0,000165	0,000013	12,63	0,000

A-12: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, alabe móvil de 3° etapa SI1.

Análisis de la varianza:					
Fuente de variación	*Grados de libertad (GL)*	*Suma de cuadrados ajustada (SC)*	*Suma de cuadrados promedio ajustada (SCP)*	*Estadístico F*	*Valor p*
1/Horas operación gas	1	15,763	15,7625	18,01	0,005
Error	6	5,250	0,8751		
Total	7	21,013			
Resumen modelo:					
S		*R^2*		*R^2 ajustada*	
0,935445		75,01%		70,85%	
Coeficientes:					
Termino		*Coeficiente*	*Error estándar del coeficiente*	*Estadístico T*	*Valor p*
Constante		5,859	0,895	6,55	0,001
1/Horas operación gas		-23733	5592	-4,24	0,005

A-13: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, alabe móvil de 4° etapa SI1.

Análisis de la varianza:					
Fuente de variación	*Grados de libertad (GL)*	*Suma de cuadrados ajustada (SC)*	*Suma de cuadrados promedio ajustada (SCP)*	*Estadístico F*	*Valor p*
Cantidad partidas	1	31,09	31,090	15,66	0,007
Error	6	11,91	1,985		
Total	7	43,00			
Resumen modelo:					
S		R^2		R^2 *ajustada*	
1,40888		72,30%		67,69%	
Coeficientes:					
Termino		*Coeficiente*	*Error estándar del coeficiente*	*Estadístico T*	*Valor p*
Cantidad partidas		0,01952	0,00493	3,96	0,007

A-14: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, tobera piloto gas SI2.

Análisis de la varianza:					
Fuente de variación	*Grados de libertad (GL)*	*Suma de cuadrados ajustada (SC)*	*Suma de cuadrados promedio ajustada (SCP)*	*Estadístico F*	*Valor p*
Horas operación gas	1	9,299	9,2993	12,82	0,070
Error	2	1,451	0,7253		
Total	3	10,750			
Resumen modelo:					
S		R^2		R^2 *ajustada*	
0,851672		86,51%		79,76%	
Coeficientes:					
Termino		*Coeficiente*	*Error estándar del coeficiente*	*Estadístico T*	*Valor p*
Constante		-6,70	2,26	-2,96	0,097
Horas operación gas		0,000860	0,000240	3,58	0,070

A-15: Resultados de análisis de regresión arrojados por Minitab, cámara de combustión SI2.

Análisis de la varianza:					
Fuente de variación	*Grados de libertad (GL)*	*Suma de cuadrados ajustada (SC)*	*Suma de cuadrados promedio ajustada (SCP)*	*Estadístico F*	*Valor p*
Ln(Horas operación gas)	1	103,33	103,334	19,38	0,048
Error	2	10,67	5,333		
Total	3	114,00			
Resumen modelo:					
S		*R^2*		*R^2 ajustada*	
2,30928		90,64%		85,97%	
Coeficientes:					
Termino		*Coeficiente*	*Error estándar del coeficiente*	*Estadístico T*	*Valor p*
Constante		-244,6	57,6	-4,24	0,051
Ln(Horas operación gas)		27,82	6,32	4,40	0,048

A-16: Resultados de análisis de regresión por Minitab, alabe fijo de 1° etapa SI2.

Análisis de la varianza:					
Fuente de variación	*Grados de libertad (GL)*	*Suma de cuadrados ajustada (SC)*	*Suma de cuadrados promedio ajustada (SCP)*	*Estadístico F*	*Valor p*
Cantidad partidas	1	2561,0	2561,01	34,15	0,004
Error	4	300,0	75,00		
Total	5	2861,0			
Resumen modelo:					
S		R^2		R^2 *ajustada*	
8,66007		89,51%		86,89%	
Coeficientes:					
Termino		*Coeficiente*	*Error estándar del coeficiente*	*Estadístico T*	*Valor p*
Cantidad partidas		0,4302	0,0736	5,84	0,004

A-17: Resultados de análisis de regresión por Minitab, alabe móvil de 1° etapa SI2.

Análisis de la varianza:					
Fuente de variación	*Grados de libertad (GL)*	*Suma de cuadrados ajustada (SC)*	*Suma de cuadrados promedio ajustada (SCP)*	*Estadístico F*	*Valor p*
Ln(Horas operación gas)	1	9089,6	9089,63	143,86	0,007
Error	2	126,4	63,18		
Total	3	9216,0			
Resumen modelo:					
S		*R^2*		*R^2 ajustada*	
7,94885		98,63%		97,94%	
Coeficientes:					
Termino		*Coeficiente*	*Error estándar del coeficiente*	*Estadístico T*	*Valor p*
Constante		-95,2	12,6	-7,57	0,017
Ln(Horas operación gas)		18,96	1,58	11,99	0,007

A-18: Resultados de análisis de regresion por Minitab, ring segment de 1° etapa SI2.

Análisis de la varianza:					
Fuente de variación	*Grados de libertad (GL)*	*Suma de cuadrados ajustada (SC)*	*Suma de cuadrados promedio ajustada (SCP)*	*Estadístico F*	*Valor p*
Horas operación gas	1	17,067	17,0665	46,33	0,006
Error	3	1,105	0,3683		
Total	4	18,172			
Resumen modelo:					
S		R^2		R^2 *ajustada*	
0,606906		93,92%		91,89%	
Coeficientes:					
Termino		*Coeficiente*	*Error estándar del coeficiente*	*Estadístico T*	*Valor p*
Horas operación gas		0,000229	0,000034	6,81	0,006