



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Organización Industrial

# DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN RODAMIENTOS DE MOTORES ELÉCTRICOS MEDIANTE TÉCNICAS LASSO

Autor:

*Fernández Villafañez, José Ignacio*

Tutores:

Fernández Temprano, Miguel Alejandro

García Escudero, Luis Ángel

Departamento de Estadística e Investigación  
Operativa

Valladolid, Junio de 2018



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	9
PALABRAS CLAVE.....	9
ABSTRACT .....	11
KEYWORDS .....	11
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
1.1.    JUSTIFICACIÓN .....	13
1.2.    OBJETIVO DEL PROYECTO .....	14
1.3.    METODOLOGÍA DE REALIZACIÓN .....	15
1.4.    ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO .....	15
<b>CAPÍTULO 2: MOTORES DE INDUCCIÓN .....</b>	<b>17</b>
2.1.    INTRODUCCIÓN .....	17
2.2.    ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS .....	18
2.3.    PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....	19
2.4.    TIPOS DE ROTORES .....	20
2.4.1.  ROTOR DE JAULA DE ARDILLA .....	20
2.4.2.  ROTOR BOBINADO .....	21
2.5.    FALLOS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.....	22
2.5.1.  RODAMIENTOS Y EJE.....	23
2.5.2.  ESTATOR.....	27
2.5.3.  ROTOR .....	30
2.6.    MANTENIMIENTO .....	31
2.6.1.  INTRODUCCIÓN: ¿QUÉ ES EL MANTENIMIENTO?.....	31
2.6.2.  MANTENIMIENTO CORRECTIVO Y PREVENTIVO .....	34
2.6.3.  MANTENIMIENTO PREDICTIVO .....	35
2.6.4.  TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.....	36
2.6.5.  ANÁLISIS DEL ESPECTRO DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA .....	37
<b>CAPÍTULO 3: EXPERIMENTACIÓN.....</b>	<b>39</b>
3.1.    INTRODUCCIÓN .....	39

3.2.	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL EMPLEADO. BANCO DE ENSAYOS.....	41
3.2.1.	MOTOR COMERCIAL .....	41
3.2.2.	VARIADORES DE FRECUENCIA.....	43
3.2.3.	PC .....	44
3.2.4.	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	45
3.2.5.	TRANSDUCTORES.....	46
3.2.6.	FRENO ELECTROMAGNÉTICO Y UNIDAD DE CONTROL..	49
3.3.	ATRIBUTOS MEDIDOS.....	49
3.3.1.	IDENTIFICADORES DE LA EXPERIMENTACIÓN.....	49
3.3.2.	VARIABLES RELATIVAS AL DOMINIO DE LA FRECUENCIA .....	51
<b>CAPÍTULO 4: TÉCNICAS ESTADÍSTICAS.....</b>		<b>53</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN .....	53
4.2.	REGRESIÓN LINEAL Y POLINÓMICA.....	54
4.2.1.	REGRESIÓN LINEAL.....	54
4.2.2.	REGRESIÓN POLINÓMICA .....	55
4.3.	REGRESIÓN LOGÍSTICA .....	55
4.3.1.	CLASIFICACIÓN MULTICLASE .....	55
4.4.	MÉTODOS DE REGULARIZACIÓN .....	56
4.4.1.	RIDGE REGRESSION.....	57
4.4.2.	LASSO – LEAST ABSOLUTE SHRINKAGE AND SELECTION OPERATOR .....	58
4.4.3.	ELASTIC NET .....	59
4.5.	VALIDACIÓN CRUZADA.....	60
4.5.1.	VALIDACIÓN SIMPLE.....	60
4.5.2.	LEAVE ONE OUT CROSS-VALIDATION (LOOCV) .....	61
4.5.3.	K-FOLD CROSS-VALIDATION .....	61
<b>CAPÍTULO 5: LASSO EN R .....</b>		<b>63</b>
5.1.	INTRODUCCIÓN A R .....	63
5.2.	DESCRIPCIÓN DEL PAQUETE “GLMNET” .....	64
<b>CAPÍTULO 6: ANÁLISIS Y RESULTADOS .....</b>		<b>67</b>
6.1.	CONJUNTO DE DATOS Y FILTRADO DEL MISMO.....	67

6.2.	INTRODUCCIÓN A LOS ANÁLISIS.....	68
6.3.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO AB1.....	69
6.3.1.	ANÁLISIS COMPLETO.....	70
6.3.2.	ANÁLISIS BFTF .....	74
6.3.3.	ANÁLISIS BPGI.....	76
6.3.4.	ANÁLISIS BPGO .....	79
6.3.5.	ANÁLISIS BSG .....	82
6.4.	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS.....	85
6.4.1.	RESULTADOS DE LA REGRESIÓN BINARIA .....	85
6.4.2.	RESULTADOS DE LA REGRESIÓN MULTINOMIAL .....	94
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS .....</b>		<b>101</b>
<b>ANEXO A: RESULTADOS DETALLADOS DE TODOS LOS ANÁLISIS EFECTUADOS .....</b>		<b>105</b>
A1.	ANÁLISIS DE AB1 .....	105
A1.1	ANÁLISIS COMPLETO.....	105
A1.2	ANÁLISIS BFTF .....	109
A1.3	ANÁLISIS BPGI.....	111
A1.4	ANÁLISIS BPGO .....	113
A1.5	ANÁLISIS BSG .....	115
A2.	ANÁLISIS DE AB2 .....	117
A2.1	ANÁLISIS COMPLETO.....	117
A2.2	ANÁLISIS BFTF .....	120
A2.3	ANÁLISIS BPGI.....	124
A2.4	ANÁLISIS BPGO .....	127
A2.5	ANÁLISIS BSG .....	130
A3.	ANÁLISIS DE AB3 .....	134
A3.1	ANÁLISIS COMPLETO.....	134
A3.2	ANÁLISIS BFTF .....	137
A3.3	ANÁLISIS BPGI.....	140
A3.4	ANÁLISIS BPGO .....	143
A3.5	ANÁLISIS BSG .....	147
A4.	ANÁLISIS DE AB4 .....	150
A4.1	ANÁLISIS COMPLETO.....	150

A4.2 ANÁLISIS BFTF .....	153
A4.3 ANÁLISIS BPFI .....	157
A4.4 ANÁLISIS BPFO .....	160
A4.5 ANÁLISIS BSF .....	163
A5. ANÁLISIS DE RED .....	167
A5.1 ANÁLISIS COMPLETO.....	167
A5.2 ANÁLISIS BFTF .....	170
A5.3 ANÁLISIS BPFI .....	173
A5.4 ANÁLISIS BPFO .....	177
A5.5 ANÁLISIS BSF .....	180
A6. ANÁLISIS DE WEG .....	183
A6.1 ANÁLISIS COMPLETO.....	183
A6.2 ANÁLISIS BFTF .....	187
A6.3 ANÁLISIS BPFI .....	190
A6.4 ANÁLISIS BPFO .....	193
A6.5 ANÁLISIS BSF .....	197
<b>ANEXO B: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN .....</b>	<b>201</b>
B1. CÓDIGO PARA EL ANÁLISIS COMPLETO DE AB1.....	202
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>205</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Sección de un motor eléctrico. ....	18
<b>Figura 2:</b> Estator y Rotor de un motor eléctrico. [2].....	18
<b>Figura 3:</b> Diseño de un rotor de jaula de ardilla. ....	20
<b>Figura 4:</b> Diseño de un rotor bobinado. [3] .....	21
<b>Figura 5:</b> Comparación de rotores. [4] .....	21
<b>Figura 6:</b> Componentes de un rodamiento. [7].....	23
<b>Figura 7:</b> Rotura de la pista interior. [8].....	24
<b>Figura 8:</b> Arañazos en la pista de rodadura. [8].....	25
<b>Figura 9:</b> Descamación del rodamiento. [8] .....	25
<b>Figura 10:</b> Escamación del rodamiento debido a un exceso de carga axial. [8].....	26
<b>Figura 11:</b> Rayado debido al paso de la corriente eléctrica. [8] .....	26
<b>Figura 12:</b> Pilares del TMP. [9] .....	33
<b>Figura 13:</b> Transformada de Fourier (I) [11].....	40
<b>Figura 14:</b> Transformada de Fourier (II) [8].....	40
<b>Figura 15:</b> Motor Siemens. [8].....	41
<b>Figura 16:</b> Motor Siemens (II).....	42
<b>Figura 17:</b> Inversor PoweFlex 40 de Allen Bradley.....	43
<b>Figura 18:</b> Inversor CFW 11 de WEG. ....	44
<b>Figura 19:</b> PC utilizado para la recogida de datos. [8] .....	44
<b>Figura 20:</b> Tarjeta de adquisición de datos. [8].....	45
<b>Figura 21:</b> Tarjeta de adquisición de datos (II). ....	45
<b>Figura 22:</b> Tarjeta dedicada con los transductores. [13].....	47
<b>Figura 23:</b> Tarjeta dedicada con los transductores. [13].....	47
<b>Figura 24:</b> Sensores de corriente. ....	48
<b>Figura 25:</b> Freno de polvo magnético y unidad de control. [13].....	49
<b>Figura 26:</b> Fases del aprendizaje automático. [14] .....	53
<b>Figura 27:</b> Ejemplo del sobreajuste. [8].....	56
<b>Figura 28:</b> Plot correspondiente al análisis E0 vs E1 en la alimentación AB1 con nivel de carga alto.....	65
<b>Figura 29:</b> Representación de la curva de validación cruzada (puntos rojos) así como las desviaciones estándar a lo largo de la secuencia de valores de lambda. [18].....	66
<b>Figura 30:</b> Plot resultante del análisis de AB1-NC2-E0vsE1.....	70
<b>Figura 31:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE1.....	71
<b>Figura 32:</b> Plot resultante del análisis multiclase AB1-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	72
<b>Figura 33:</b> Plot resultante del análisis multiclase AB1-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II) .....	72
<b>Figura 34:</b> Variables del modelo del análisis completo para la regresión multiclase.....	73
<b>Figura 35:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BFTF-E0vsE1.....	74
<b>Figura 36:</b> Plot correspondiente al análisis de AB1-BFTF-E0vsE1.....	74
<b>Figura 37:</b> Plot resultante del análisis multiclase AB1-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	75
<b>Figura 38:</b> Plot resultante del análisis multiclase AB1-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II) .....	76
<b>Figura 39:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE1 .....	77
<b>Figura 40:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE1 .....	77
<b>Figura 41:</b> Plot resultante del análisis multiclase AB1-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	78
<b>Figura 42:</b> Plot resultante del análisis multiclase AB1-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	78
<b>Figura 43:</b> Variables del modelo del análisis BPFI para la regresión multiclase.....	79
<b>Figura 44:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE1.....	79
<b>Figura 45:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE1.....	80
<b>Figura 46:</b> Plot resultante del análisis multiclase AB1-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	81
<b>Figura 47:</b> Plot resultante del análisis multiclase AB1-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II) .....	81

<b>Figura 48:</b> Variables del modelo del análisis BPFO para la regresión multiclase .....	81
<b>Figura 49:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE1.....	82
<b>Figura 50:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE1.....	82
<b>Figura 51:</b> Plot resultante del análisis multiclase AB1-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	83
<b>Figura 52:</b> Plot resultante del análisis multiclase AB1-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II) .....	83
<b>Figura 53:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB1 en la regresión binaria .....	85
<b>Figura 54:</b> Número de coeficientes AB1 en la regresión binaria .....	85
<b>Figura 55:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB2 en la regresión binaria .....	86
<b>Figura 56:</b> Número de coeficientes AB2 en la regresión binaria .....	86
<b>Figura 57:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB3 en la regresión binaria .....	87
<b>Figura 58:</b> Número de coeficientes AB3 en la regresión binaria .....	87
<b>Figura 59:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB4 en la regresión binaria .....	88
<b>Figura 60:</b> Número de coeficientes AB4 en la regresión binaria .....	88
<b>Figura 61:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para RED en la regresión binaria .....	89
<b>Figura 62:</b> Número de coeficientes RED en la regresión binaria .....	89
<b>Figura 63:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para WEG en la regresión binaria .....	90
<b>Figura 64:</b> Número de coeficientes WEG en la regresión binaria.....	90
<b>Figura 65:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB1 en la regresión multiclase .....	94
<b>Figura 66:</b> Número de coeficientes AB1 en la regresión multiclase .....	94
<b>Figura 67:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB2 en la regresión multiclase .....	95
<b>Figura 68:</b> Número de coeficientes AB2 en la regresión multiclase .....	95
<b>Figura 69:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB3 en la regresión multiclase .....	96
<b>Figura 70:</b> Número de coeficientes AB3 en la regresión multiclase .....	96
<b>Figura 71:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB4 en la regresión multiclase .....	97
<b>Figura 72:</b> Número de coeficientes AB4 en la regresión multiclase .....	97
<b>Figura 73:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para RED en la regresión multiclase .....	98
<b>Figura 74:</b> Número de coeficientes RED en la regresión multiclase .....	98
<b>Figura 75:</b> Evolución del porcentaje de clasificación cv para WEG en la regresión multiclase .....	99
<b>Figura 76:</b> Número de coeficientes WEG en la regresión multiclase .....	99
<b>Figura 77:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE2.....	105
<b>Figura 78:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE2 (II) .....	106
<b>Figura 79:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE3.....	106
<b>Figura 80:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE3 (II) .....	107
<b>Figura 81:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE4.....	107
<b>Figura 82:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE4 (II) .....	108
<b>Figura 83:</b> Plot correspondiente al análisis multiclase AB1-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	108
<b>Figura 84:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BFTF-E0vsE2.....	109
<b>Figura 85:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BFTF-E0vsE2 (II) .....	109
<b>Figura 86:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BFTF-E0vsE3.....	110
<b>Figura 87:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BFTF-E0vsE3 (II) .....	110
<b>Figura 88:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BFTF-E0vsE4.....	110
<b>Figura 89:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BFTF-E0vsE4 (II) .....	111
<b>Figura 90:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE2 .....	111
<b>Figura 91:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE2 (II).....	111
<b>Figura 92:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE3 .....	112
<b>Figura 93:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE3 (II).....	112
<b>Figura 94:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE4 .....	112
<b>Figura 95:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE4 (II).....	113
<b>Figura 96:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE2.....	113
<b>Figura 97:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE2 (II) .....	113



<b>Figura 98:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE3.....	114
<b>Figura 99:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE3 (II) .....	114
<b>Figura 100:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE4 (II) .....	114
<b>Figura 101:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE4 (II) .....	115
<b>Figura 102:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE2.....	115
<b>Figura 103:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE2 (II) .....	115
<b>Figura 104:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE3.....	116
<b>Figura 105:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE3 (II) .....	116
<b>Figura 106:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE4.....	116
<b>Figura 107:</b> Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE4 (II) .....	117
<b>Figura 108:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE1.....	117
<b>Figura 109:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE1 (II) .....	117
<b>Figura 110:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE2.....	118
<b>Figura 111:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE2 (II) .....	118
<b>Figura 112:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE3.....	118
<b>Figura 113:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE3 (II) .....	119
<b>Figura 114:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE4.....	119
<b>Figura 115:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE4 (II) .....	119
<b>Figura 116:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	120
<b>Figura 117:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	120
<b>Figura 118:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BTFE-E0vsE1.....	120
<b>Figura 119:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BTFE-E0vsE1 (II) .....	121
<b>Figura 120:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BTFE-E0vsE2.....	121
<b>Figura 121:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BTFE-E0vsE2 (II) .....	121
<b>Figura 122:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BTFE-E0vsE3.....	122
<b>Figura 123:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BTFE-E0vsE3 (II) .....	122
<b>Figura 124:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BTFE-E0vsE4.....	122
<b>Figura 125:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BTFE-E0vsE4 (II) .....	123
<b>Figura 126:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BTFE-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	123
<b>Figura 127:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BTFE-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	123
<b>Figura 128:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE1 .....	124
<b>Figura 129:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE1 (II) .....	124
<b>Figura 130:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE2 .....	124
<b>Figura 131:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE2 (II) .....	125
<b>Figura 132:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE3 .....	125
<b>Figura 133:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE3 (II) .....	125
<b>Figura 134:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE4 .....	126
<b>Figura 135:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE4 (II) .....	126
<b>Figura 136:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	126
<b>Figura 137:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II) .....	127
<b>Figura 138:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE1.....	127
<b>Figura 139:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE1 (II) .....	127
<b>Figura 140:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE2.....	128
<b>Figura 141:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE2 (II).....	128
<b>Figura 142:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE3.....	128
<b>Figura 143:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE3 (II) .....	129
<b>Figura 144:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE4.....	129
<b>Figura 145:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE4 (II) .....	129
<b>Figura 146:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	130
<b>Figura 147:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	130

<b>Figura 148:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE1.....	130
<b>Figura 149:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE1 (II) .....	131
<b>Figura 150:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE2.....	131
<b>Figura 151:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE2 (II) .....	131
<b>Figura 152:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE3.....	132
<b>Figura 153:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE3 (II) .....	132
<b>Figura 154:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE4.....	132
<b>Figura 155:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE4 (II) .....	133
<b>Figura 156:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	133
<b>Figura 157:</b> Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	133
<b>Figura 158:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE1.....	134
<b>Figura 159:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE1 (II) .....	134
<b>Figura 160:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE2.....	134
<b>Figura 161:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE2 (II) .....	135
<b>Figura 162:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE3.....	135
<b>Figura 163:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE3 (II) .....	135
<b>Figura 164:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE4.....	136
<b>Figura 165:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE4 (II) .....	136
<b>Figura 166:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	136
<b>Figura 167:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	137
<b>Figura 168:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BTFE-E0vsE1.....	137
<b>Figura 169:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BTFE-E0vsE1 (II) .....	137
<b>Figura 170:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BTFE-E0vsE2.....	138
<b>Figura 171:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BTFE-E0vsE2 (II) .....	138
<b>Figura 172:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BTFE-E0vsE3.....	138
<b>Figura 173:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BTFE-E0vsE3 (II) .....	139
<b>Figura 174:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BTFE-E0vsE4.....	139
<b>Figura 175:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BTFE-E0vsE4 (II) .....	139
<b>Figura 176:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BTFE-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	140
<b>Figura 177:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BTFE-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	140
<b>Figura 178:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE1 .....	140
<b>Figura 179:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE1 (II) .....	141
<b>Figura 180:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE2 .....	141
<b>Figura 181:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE2 (II) .....	141
<b>Figura 182:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE3 .....	142
<b>Figura 183:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE3 (II) .....	142
<b>Figura 184:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE4 .....	142
<b>Figura 185:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	143
<b>Figura 186:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II) .....	143
<b>Figura 187:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE1.....	143
<b>Figura 188:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE1 (II) .....	144
<b>Figura 189:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE2.....	144
<b>Figura 190:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE2 (II) .....	144
<b>Figura 191:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE3.....	145
<b>Figura 192:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE3 (II) .....	145
<b>Figura 193:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE4.....	145
<b>Figura 194:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE4 (II) .....	146
<b>Figura 195:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	146
<b>Figura 196:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	146
<b>Figura 197:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE1.....	147

<b>Figura 198:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE1 (II) .....	147
<b>Figura 199:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE2.....	147
<b>Figura 200:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE2 (II) .....	148
<b>Figura 201:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE3.....	148
<b>Figura 202:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE3 (II) .....	148
<b>Figura 203:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE4.....	149
<b>Figura 204:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE4 (II) .....	149
<b>Figura 205:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	149
<b>Figura 206:</b> Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	150
<b>Figura 207:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE1.....	150
<b>Figura 208:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE1 (II) .....	150
<b>Figura 209:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE2.....	151
<b>Figura 210:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE2 (II) .....	151
<b>Figura 211:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE3.....	151
<b>Figura 212:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE3 (II) .....	152
<b>Figura 213:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE4.....	152
<b>Figura 214:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE4 (II) .....	152
<b>Figura 215:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	153
<b>Figura 216:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	153
<b>Figura 217:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE1.....	153
<b>Figura 218:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE1 (II) .....	154
<b>Figura 219:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE2.....	154
<b>Figura 220:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE2 (II) .....	154
<b>Figura 221:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE3.....	155
<b>Figura 222:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE3 (II) .....	155
<b>Figura 223:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE4.....	155
<b>Figura 224:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE4 (II) .....	156
<b>Figura 225:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	156
<b>Figura 226:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	156
<b>Figura 227:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE1 .....	157
<b>Figura 228:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE1 (II) .....	157
<b>Figura 229:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE2 .....	157
<b>Figura 230:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE2 (II) .....	158
<b>Figura 231:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE3 .....	158
<b>Figura 232:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE3 (II) .....	158
<b>Figura 233:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE4 .....	159
<b>Figura 234:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE4 (II) .....	159
<b>Figura 235:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	159
<b>Figura 236:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II) .....	160
<b>Figura 237:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE1.....	160
<b>Figura 238:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE1 (II) .....	160
<b>Figura 239:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE2.....	161
<b>Figura 240:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE2 (II) .....	161
<b>Figura 241:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE3.....	161
<b>Figura 242:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE3 (II) .....	162
<b>Figura 243:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE4.....	162
<b>Figura 244:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE4 (II) .....	162
<b>Figura 245:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	163
<b>Figura 246:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	163
<b>Figura 247:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE1.....	163

<b>Figura 248:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE1 (II) .....	164
<b>Figura 249:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE2.....	164
<b>Figura 250:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE2 (II) .....	164
<b>Figura 251:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE3.....	165
<b>Figura 252:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE3 (II) .....	165
<b>Figura 253:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE4.....	165
<b>Figura 254:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE4 (II) .....	166
<b>Figura 255:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	166
<b>Figura 256:</b> Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	166
<b>Figura 257:</b> Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE1.....	167
<b>Figura 258:</b> Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE1 (II) .....	167
<b>Figura 259:</b> Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE2.....	167
<b>Figura 260:</b> Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE2 (II) .....	168
<b>Figura 261:</b> Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE3.....	168
<b>Figura 262:</b> Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE3 (II) .....	168
<b>Figura 263:</b> Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE4.....	169
<b>Figura 264:</b> Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE4 (II) .....	169
<b>Figura 265:</b> Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	169
<b>Figura 266:</b> Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	170
<b>Figura 267:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BTFE-E0vsE1.....	170
<b>Figura 268:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BTFE-E0vsE1 (II) .....	170
<b>Figura 269:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BTFE-E0vsE2.....	171
<b>Figura 270:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BTFE-E0vsE2 (II) .....	171
<b>Figura 271:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BTFE-E0vsE3.....	171
<b>Figura 272:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BTFE-E0vsE3 (II) .....	172
<b>Figura 273:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BTFE-E0vsE4.....	172
<b>Figura 274:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BTFE-E0vsE4 (II) .....	172
<b>Figura 275:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BTFE-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	173
<b>Figura 276:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BTFE-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II) .....	173
<b>Figura 277:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE1 .....	173
<b>Figura 278:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE1 (II).....	174
<b>Figura 279:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE2 .....	174
<b>Figura 280:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE2 (II).....	174
<b>Figura 281:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE3 .....	175
<b>Figura 282:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE3 (II).....	175
<b>Figura 283:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE4 .....	175
<b>Figura 284:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE4 (II).....	176
<b>Figura 285:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	176
<b>Figura 286:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II) .....	176
<b>Figura 287:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE1.....	177
<b>Figura 288:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE1 (II) .....	177
<b>Figura 289:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE2.....	177
<b>Figura 290:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE2 (II) .....	178
<b>Figura 291:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE3.....	178
<b>Figura 292:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE3 (II) .....	178
<b>Figura 293:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE4.....	179
<b>Figura 294:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE4 (II) .....	179
<b>Figura 295:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	179
<b>Figura 296:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	180
<b>Figura 297:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE1.....	180

<b>Figura 298:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE1 (II) .....	180
<b>Figura 299:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE2.....	181
<b>Figura 300:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE2 (II) .....	181
<b>Figura 301:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE3.....	181
<b>Figura 302:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE3 (II) .....	182
<b>Figura 303:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE4.....	182
<b>Figura 304:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE4 (II) .....	182
<b>Figura 305:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4.....	183
<b>Figura 306:</b> Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II) .....	183
<b>Figura 307:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE1 .....	183
<b>Figura 308:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE1 (II).....	184
<b>Figura 309:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE2 .....	184
<b>Figura 310:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE2 (II).....	184
<b>Figura 311:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE3 .....	185
<b>Figura 312:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE3 (II).....	185
<b>Figura 313:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE4 .....	185
<b>Figura 314:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE4 (II).....	186
<b>Figura 315:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	186
<b>Figura 316:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	186
<b>Figura 317:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE1 .....	187
<b>Figura 318:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE1 (II).....	187
<b>Figura 319:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE2 .....	187
<b>Figura 320:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE2 (II).....	188
<b>Figura 321:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE3 .....	188
<b>Figura 322:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE3 (II).....	188
<b>Figura 323:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE4 .....	189
<b>Figura 324:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE4 (II).....	189
<b>Figura 325:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	189
<b>Figura 326:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	190
<b>Figura 327:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE1.....	190
<b>Figura 328:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE1 (II).....	190
<b>Figura 329:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE2.....	191
<b>Figura 330:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE2 (II).....	191
<b>Figura 331:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE3.....	191
<b>Figura 332:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE3 (II).....	192
<b>Figura 333:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE4.....	192
<b>Figura 334:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE4 (II).....	192
<b>Figura 335:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	193
<b>Figura 336:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	193
<b>Figura 337:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE1 .....	193
<b>Figura 338:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE1 (II).....	194
<b>Figura 339:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE2 .....	194
<b>Figura 340:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE2 (II).....	194
<b>Figura 341:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE3 .....	195
<b>Figura 342:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE3 (II).....	195
<b>Figura 343:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE4 .....	195
<b>Figura 344:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE4 (II).....	196
<b>Figura 345:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	196
<b>Figura 346:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II).....	196
<b>Figura 347:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE1 .....	197

<b>Figura 348:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE1 (II).....	197
<b>Figura 349:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE2 .....	197
<b>Figura 350:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE2 (II).....	198
<b>Figura 351:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE3 .....	198
<b>Figura 352:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE3 (II).....	198
<b>Figura 353:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE4 .....	199
<b>Figura 354:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE4 (II).....	199
<b>Figura 355:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 .....	199
<b>Figura 356:</b> Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II) .....	200

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Esfuerzos sobre los elementos de un motor de inducción. [1].....	22
<b>Tabla 2:</b> Fallos más habituales en el devanado del estator. [1] .....	27
<b>Tabla 3:</b> Generaciones del mantenimiento. ....	33
<b>Tabla 4:</b> Características técnicas del motor Siemens. ....	42
<b>Tabla 5:</b> Características del Variador PowerFlex40 de Allen-Bradley.....	43
<b>Tabla 6:</b> Características del variador WEG. ....	44
<b>Tabla 7:</b> Características técnicas del ordenador. ....	45
<b>Tabla 8:</b> Características técnicas del chasis.....	46
<b>Tabla 9:</b> Características del módulo de adquisición. ....	46
<b>Tabla 10:</b> Parámetros técnicos del transductor de LEM.....	48
<b>Tabla 11:</b> Parámetros técnicos del transductor HoneyWell. ....	48
<b>Tabla 12:</b> Número de ensayos. ....	51
<b>Tabla 13:</b> Variables del modelo del análisis completo para la regresión binaria .....	71
<b>Tabla 14:</b> Variables del modelo del análisis BFTF para la regresión binaria. ....	75
<b>Tabla 15:</b> Variables del modelo del análisis BFTF para la regresión multiclase .....	76
<b>Tabla 16:</b> Variables del modelo del análisis BPF1 .....	78
<b>Tabla 17:</b> Variables del modelo del análisis BPF0.....	80
<b>Tabla 18:</b> Variables del modelo del análisis BSF.....	83
<b>Tabla 19:</b> Variables del modelo del análisis BSF para la regresión multiclase .....	84
<b>Tabla 20:</b> Resultados de la regresión binaria. ....	93
<b>Tabla 21:</b> Resultados de la regresión multinomial. ....	100
<b>Tabla 22:</b> Resumen del número de coeficientes para cada variador en función de la regresión y del análisis realizado. ....	102

## RESUMEN

---

El principal objetivo del presente trabajo consiste en definir una metodología que permita el diagnóstico de fallos en los rodamientos de motores de inducción mediante técnicas estadísticas. Para ello, contamos con la base de datos de una experimentación que registró la corriente eléctrica que circula por el motor para los diferentes estados de fallo del rodamiento, el cual se introdujo de forma intencionada. Asimismo, se emplearon diferentes fuentes de alimentación y niveles de carga para determinar su posible influencia.

Las principales técnicas que se han empleado en el presente proyecto se agrupan dentro de las técnicas de regresión, destacando la regresión binaria y la regresión multiclase. Igualmente, el método elegido para la selección de variables de los diferentes modelos ha sido el LASSO – *Least Absolute Shrinkage and Selection Operator* –

## PALABRAS CLAVE

---

- Motor de inducción
- Variador de frecuencia
- Mantenimiento predictivo
- Fallo en el rodamiento





## ABSTRACT

---

The main objective of this work is to define a methodology that allows the diagnosis of failures in the bearings of induction motors using statistical techniques. To this end, we have the database of an experiment that recorded the electric current that circulates through the motor for the different states of failure of the bearing, which was introduced intentionally. Moreover, different power supplies and load levels were used to determine their possible influence.

The main techniques that have been used in this project are grouped within regression techniques, highlighting binary regression and multiclass regression. Likewise, the method chosen for the selection of variables of the different models has been the LASSO – least Absolute Shrinkage and selection Operator –

## KEYWORDS

---

- Induction Motor
- Variable frequency
- Predictive maintenance
- Bearing failure



---

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

## 1.1. JUSTIFICACIÓN

Durante los últimos años, los motores eléctricos de inducción han cobrado mayor importancia al convertirse en un elemento cotidiano para toda la población. Tradicionalmente, han sido y son muy relevantes en los sistemas productivos industriales (se estima que el consumo de energía industrial es del 80-85 % por el uso de estos motores), no obstante, en la actualidad tienen una amplia variedad de aplicaciones. Por ejemplo, podemos encontrarlos en los hogares en los diferentes electrodomésticos presentes en la vivienda, en los coches eléctricos, etc. Es por ello que es de suma importancia optimizar su rendimiento a la vez que reducir la probabilidad de fallo que acarreen problemas en su comportamiento.

Uno de los mayores problemas que presentaban los motores de inducción en épocas anteriores era la regulación de velocidad dado que no se aprovechaba al máximo la potencia de los motores por lo que, a principios del siglo pasado, el motor más utilizado era el de corriente continua. Sin embargo, con la aparición a finales del siglo XX de componentes electrónicos como los variadores de frecuencia, el motor de inducción volvió a ser el más empleado. Esto se debe a que mediante el inversor o variador de frecuencia la velocidad puede regularse y adaptarse a la carga necesaria permitiendo ahorros de energía significativos. Este hecho junto con las nuevas directivas europeas que fomentan el uso de motores de bajo consumo energético o lo que es lo mismo, motores con variadores de frecuencia, explica el incremento del uso de los motores alimentados por inversores.

Dentro de los motores de inducción, el más empleado es el motor de inducción de jaula de ardilla el cual presenta un índice reducido de averías, pero, pese a ello, el continuo uso del mismo a lo largo del tiempo hace que presente defectos y/o averías. Tradicionalmente, para la gestión de los defectos se han empleado dos técnicas de mantenimiento, preventivo y correctivo. El mantenimiento preventivo permite evitar que el motor deje de funcionar completamente pero no hacemos un uso adecuado de la vida útil de los componentes al sustituirles antes de tiempo. Por otro lado, el mantenimiento correctivo tiene la peculiaridad de que solo se sustituyen aquellos componentes que están completamente rotos por lo que no aprovechamos eficientemente el tiempo en que está funcionando el motor. En la actualidad, y con el incremento de la utilización de nuevas fuentes de alimentación como los inversores, surge la necesidad de un nuevo mantenimiento que se conoce como

mantenimiento predictivo el cual tiene como objetivo detectar la avería o el fallo con antelación lo que nos permite evaluar su gravedad y actuar en consecuencia. De esta manera, el componente defectuoso será sustituido en el momento exacto, ni antes (mantenimiento preventivo) ni después (mantenimiento correctivo).

Esta técnica nos permite evaluar el estado real del motor en tiempo real para determinar el momento adecuado de intervención por medio de diferentes técnicas como el análisis de las vibraciones o bien mediante el análisis espectral de la corriente (técnica que será la utilizada en el presente TFG) que circula por el estator y consume el motor eléctrico. Las vibraciones se producen por desajustes en el motor que pueden ocurrir cuando algún componente se encuentra en mal estado o con un desgaste elevado. Sin embargo, las vibraciones también pueden producir por un mal ajuste de diseño o por alguna causa externa al motor. Por ello, es más interesante utilizar la otra técnica de mantenimiento preventivo: El análisis espectral de la corriente. Además, esta técnica es no invasiva por lo que no hay necesidad de que el motor cese su funcionamiento.

Los fallos que presentan los motores de inducción son variados. Uno de ellos es el fallo en los rodamientos, el cual es el principal fallo que sufren los motores de inducción. Para detectar este fallo de manera preventiva, analizaremos la respuesta en frecuencia de la corriente de alimentación.

## **1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO**

Durante el apartado 1.1 se han mencionado diversas técnicas para detectar preventivamente el fallo en los rodamientos y se han nombrado factores de interés como es el variador de frecuencia. Por ello, el presente Trabajo de Fin de Grado tiene como finalidad desarrollar, implementar y validar un procedimiento que nos permita detectar fallos en los motores de inducción mediante el uso de técnicas estadísticas. Más concretamente, intentaremos averiguar el número de variables (en nuestro caso se denominan como frecuencias características de fallo) que son necesarias para predecir el estado del motor así como si existe alguna relación evidente entre el variador de frecuencia y las frecuencias características de fallo.

Para llevar a cabo el trabajo nos ayudaremos de la base de datos proporcionada por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid. Esta base de datos consiste en mediciones de las frecuencias de un mismo motor alimentado mediante diferentes variadores de frecuencia, así como directamente de la red, y sobre el cual se introduce un fallo intencionado y de forma gradual en el rodamiento. Su experimentación se trata de forma más detallada en el capítulo 3 de este trabajo.

El desarrollo de los análisis estadísticos necesarios requiere el uso del entorno de programación R.

### **1.3. METODOLOGÍA DE REALIZACIÓN**

Para la realización del presente trabajo podemos distinguir cuatro etapas claramente diferenciadas:

Una primera etapa de documentación acerca de los diferentes aspectos eléctricos que conciernen a la realización del proyecto:

- Qué es y cómo funciona un motor de inducción.
- Componentes de un motor eléctrico: Estator, Rotor, Rodamientos y eje.
- Tipos de rotores y sus características.
- Fallos más habituales en los componentes del motor.
- Variadores de frecuencia.

Una segunda etapa de redacción que engloba no solo la parte eléctrica del trabajo sino también los diferentes métodos estadísticos empleados para analizar los datos y obtener información sobre los mismos.

En la tercera parte de elaboración del proyecto nos centramos en el grueso de este, los análisis estadísticos. Empleamos una técnica de regularización para obtener un modelo sencillo para las diferentes comparaciones de los estados del motor para los diferentes variadores empleando R.

Finalmente, completamos la presente memoria del TFG con los diferentes resultados estadísticos así como conclusiones obtenidas en el proyecto.

### **1.4. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO**

El presente documento consta de diferentes capítulos claramente diferenciados que presentamos a continuación:

#### Capítulo 1: Introducción y objetivos.

En este capítulo se pretende exponer el porqué de este proyecto, así como los objetivos del mismo. También se presenta la metodología empleada a lo largo de la realización del trabajo.

## Capítulo 2: Motores de inducción.

A lo largo de este capítulo se realiza una breve introducción a todo lo relacionado con los motores de inducción: Qué son, cuál es su principio de funcionamiento, sus componentes, los diferentes fallos que afectan a sus elementos, etc.

## Capítulo 3: Experimentación.

Se describe el proceso de experimentación llevado a cabo por el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid. Igualmente, se describe el banco de ensayos donde se han registrado todos los datos necesarios.

## Capítulo 4: Técnicas estadísticas.

Explicación teórica de los diferentes métodos estadísticos relacionados con el presente TFG.

## Capítulo 5: LASSO en R.

Breve explicación del software utilizado, así como de los diferentes paquetes empleados para el estudio.

## Capítulo 6: Análisis y resultados.

Explicación de los diferentes resultados alcanzados en el proyecto.

## Capítulo 7: Conclusiones y desarrollos futuros

Presentamos las conclusiones alcanzadas así como las posibles futuras líneas de investigación.

## Anexo A: Resultados detallados de todos los análisis efectuados

En este Anexo incluimos los diferentes gráficos obtenidos durante la realización del proyecto para los variadores Allen Bradley –AB1, AB2, AB3, AB4–, WEG y RED.

## Anexo B: Código de programación.

Presentamos un ejemplo particular de las líneas de código utilizadas durante la realización del proyecto.

## Bibliografía

Referencias utilizadas a lo largo del presente TFG.

---

## CAPÍTULO 2: MOTORES DE INDUCCIÓN

---

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas las cuales se encargan de obtener energía mecánica a partir de energía eléctrica. Dentro de las distintas máquinas eléctricas existentes, en este trabajo nos centraremos en los motores de inducción, también conocidos como motores asíncronos.

El motor de inducción es un tipo de motor eléctrico en el que la corriente alterna generada se debe al campo magnético que se produce en la bobina del estator.

Su uso está muy generalizado en comparación con otros motores los cuales tienen aplicaciones más específicas como son los motores síncronos tanto de corriente alterna como continua. Es por ello, que cuando nos referimos a la industria, el motor de inducción representa el 80 % de los motores eléctricos industriales, lo cual se debe principalmente a su precio, poco peso, su versatilidad, y robustez. Entre sus aplicaciones destacamos el accionamiento de elevadores, cintas transportadoras, aires acondicionados, etc. Como podemos ver, constituyen un elemento crítico dentro de, prácticamente, cualquier planta industrial por lo que es fundamental realizar estudios acerca de su mantenimiento y el diagnóstico del mismo. [1]

No obstante, no solo está generalizado su uso en aplicaciones industriales (por ejemplo, conectado a la red trifásica) sino que también se utiliza en distintas aplicaciones domésticas ya que está presente en gran parte de los electrodomésticos (ventiladores, lavadoras, etc.)

Cabe destacar que el presente trabajo se centrará en los aspectos estadísticos y los diferentes análisis, sin embargo, sí que se ha realizado una introducción a todo lo relacionado con los motores de inducción y sus características.

## 2.2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Como todo motor eléctrico, el motor de inducción está constituido por diferentes componentes (véase figura 1), no obstante, los dos elementos principales se denominan estator y rotor (véase figura 2). El estator es el elemento fijo del motor y cuya función es actuar como base para que se lleve a cabo la rotación del motor mientras que el rotor es la parte móvil y se encuentra alojado en el interior del estator.

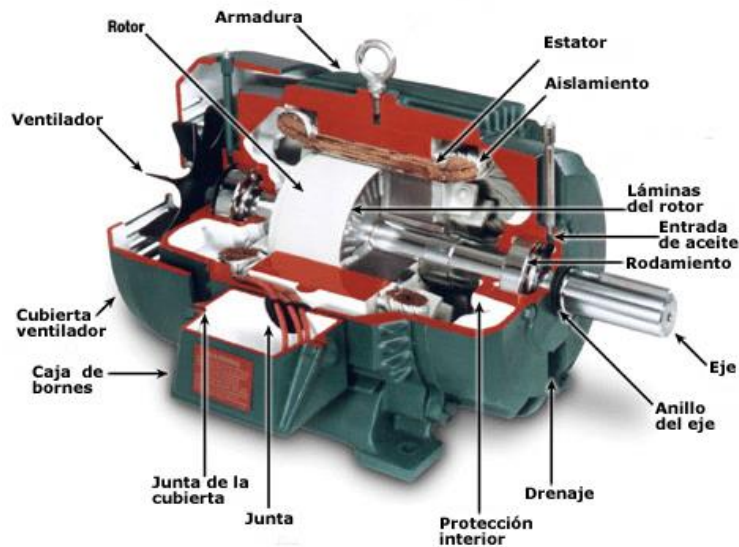


Figura 1: Sección de un motor eléctrico.

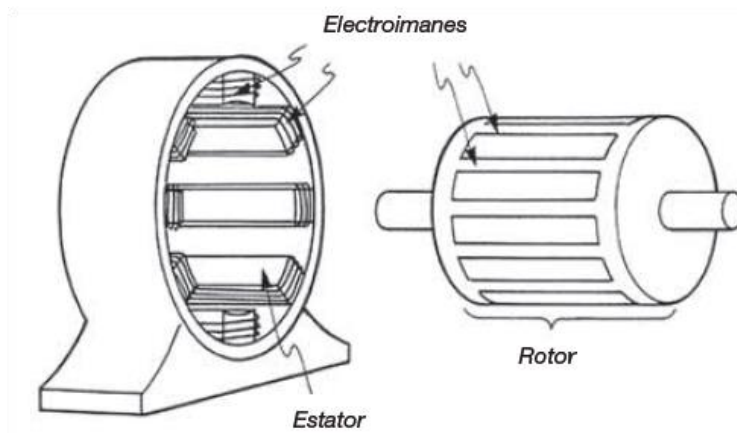


Figura 2: Estator y Rotor de un motor eléctrico. [2]

Ambos elementos están formados por dos circuitos, uno magnético y el otro eléctrico. El circuito magnético está formado por unas láminas apiladas, independientes entre sí, cuya forma varía en función de los elementos anteriores. En el estator tienen forma de anillo mientras que en el rotor tienen forma de cilindro.



Entre el estator y el rotor existe un espacio formado por aire que se denomina entrehierro y su finalidad es permitir el giro del motor con la mayor libertad posible. De esta manera, el campo magnético generado por el estator atravesará el entrehierro para inducir las corrientes en el rotor.

A pesar de que solo hemos hablado de los dos elementos más importantes que constituyen el motor de inducción, para su correcto funcionamiento es necesario tener presente otra serie de componentes igualmente importantes que los anteriores: los rodamientos, los bobinados, los ventiladores, las tablas, la base que soporta toda la fuerza producida en el motor, la caja de conexiones, así como la parte visible del motor que es la carcasa. La finalidad de este último elemento es proteger tanto al bobinado como al rotor. Asimismo, presenta una serie de ranuras que permiten disipar el calor del motor cuando este está en funcionamiento. En las máquinas de mediana y gran potencia existe un ventilador en el eje para forzar una refrigeración del motor.

### **2.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

El principio de funcionamiento se fundamenta en el principio de inducción mutua de Faraday. Al aplicar corriente alterna al bobinado del estator se produce un flujo giratorio magnético desarrollado en el circuito del estator que al girar alrededor del rotor en reposo inducirá corrientes en el mismo. Este campo magnético girará a una velocidad denominada velocidad de sincronismo la cual viene determinada por el número de pares de polos de la máquina y por la frecuencia de alimentación.

Como hemos descrito previamente, la bobina del estator produce un flujo giratorio el cual corta los conductores del rotor provocando fuerzas electromotrices inducidas. Es de suponer que cuando la bobina del rotor está cerrada, las corrientes eléctricas recorrerán sus conductores.

Debido a la acción de las corrientes presentes en los conductores del rotor y el campo magnético giratorio se producen fuerzas electrodinámicas sobre dichos conductores. Dichas fuerzas electrodinámicas producen un par en el rotor que le obliga a girar en el sentido que gira el campo debido a la ley de Lenz.

Cabe destacar que en los motores de inducción o asíncronos, la velocidad de rotación del rotor no debería superar a la velocidad del flujo giratorio del estator (velocidad asíncrona) pues se anularían todas las fuerzas electromotrices. Igualmente, para que existan dichas fuerzas electromotrices es completamente necesario que haya un movimiento relativo entre los conductores y el flujo giratorio. Dicho movimiento relativo entre ambos se denomina deslizamiento. Si el rotor girase a la velocidad de sincronismo, este deslizamiento sería 0. [1]

## 2.4. TIPOS DE ROTORES

En la actualidad existen diversos rotores en función de la forma en la que se ha construido el devanado trifásico que, a su vez, constituye el circuito eléctrico del rotor. Principalmente distinguimos dos tipos: rotor bobinado o rotor *jaula de ardilla* (también conocido como en cortocircuito).

### 2.4.1. ROTOR DE JAULA DE ARDILLA

En este tipo de rotor (ver figura 3), el devanado trifásico está formado por una serie de conductores de gran sección que normalmente son un conjunto de barras de aluminio o cobre, las cuales se cierran en sus extremos a dos anillos de igual material que las barras provocando un cortocircuito en ellos. Los anillos de los extremos reciben el nombre de tapas del rotor.

Sin embargo, cuando el motor es de un tamaño pequeño o mediano, el rotor es de aluminio fundido y moldeado de tal manera que forme un conjunto homogéneo con los anillos. De esta manera, el motor de inducción no necesita de anillos para conectar la corriente al rotor dado que se consigue mediante el efecto de inducción del estator sobre el rotor.

Hay que destacar que es el tipo de rotor que se ha utilizado en los experimentos ya que es uno de los que más se usa a nivel industrial gracias a su reducido coste de fabricación, su escaso mantenimiento, la facilidad utilización y su robustez. Igualmente, posee otras ventajas frente al rotor bobinado como por ejemplo su reducido volumen y peso, así como que requiere un mantenimiento mucho menos exhaustivo que otras máquinas rotativas.

No obstante, debemos de considerar que muchos de los elementos que forman el motor de jaula de ardilla son susceptibles de fallo, como, por ejemplo, los rodamientos, el circuito eléctrico y el circuito magnético (tanto del estator como del rotor), el eje, etc. Por ello, debemos tener presente las señales más características de fallo este tipo de rotores como pueden ser el ruido al girar, la disminución de potencia o el chispeo producido por las barras y los aros frontales.

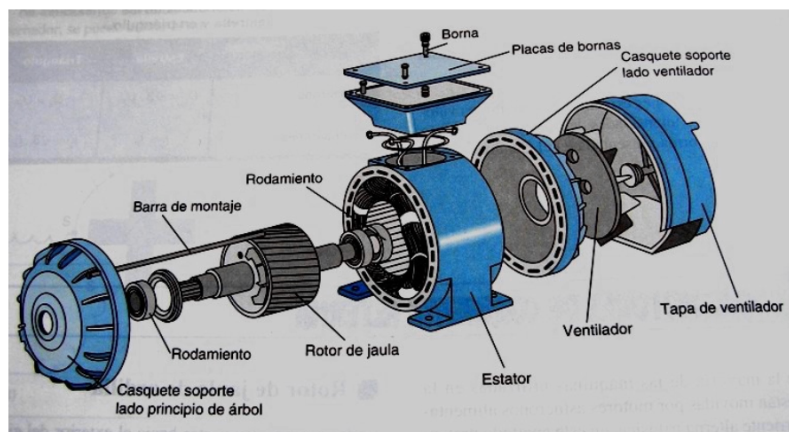


Figura 3: Diseño de un rotor de jaula de ardilla.

## 2.4.2. ROTOR BOBINADO

En este rotor (ver figura 4), las bobinas de hilo de cobre, de forma general, dan forma al arrollamiento trifásico, para el cual usaremos conductores de sección circular o rectangular. Estos conductores deben estar aislados no solo entre ellos, pero también de las ranuras por las que se introducen. Asimismo, los extremos de las bobinas se enlazan a unos anillos que permite que se alimenten las bobinas.

En este tipo de rotores, se utilizan dos tipos de ranuras: abiertas, las cuales tienen la ventaja de que las bobinas pueden extraerse con facilidad y pueden colocarse en su posición por la parte superior. No obstante, incrementan la reluctancia del circuito magnético por lo que normalmente se utilizan el otro tipo de ranuras: semicerradas.

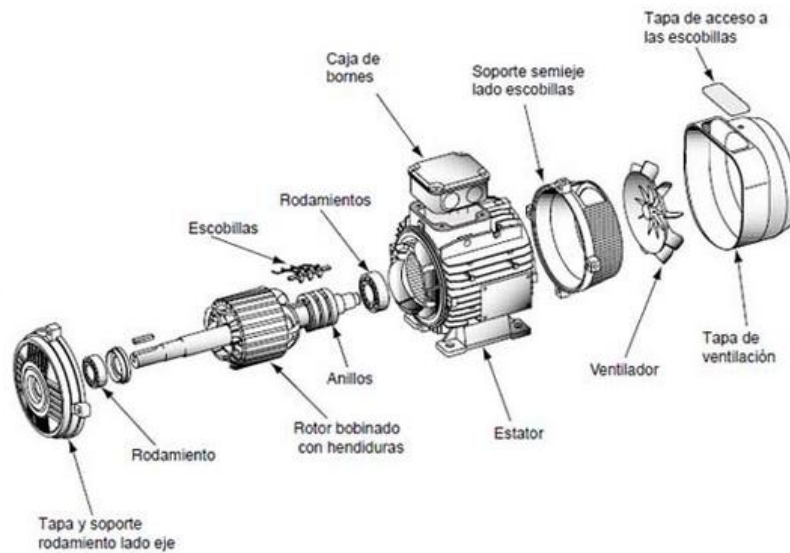


Figura 4: Diseño de un rotor bobinado. [3]

La principal ventaja de este rotor es que podemos modificar los aspectos eléctricos del rotor desde el exterior lo que nos permitiría alcanzar un elevado par de arranque.

A continuación, podemos ver una comparación más general de ambos rotores:

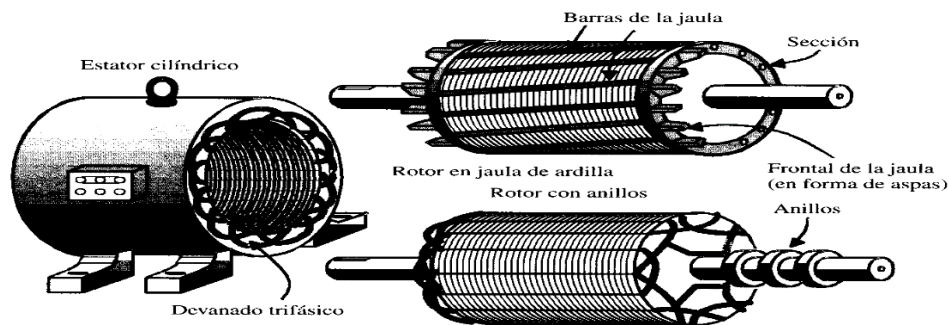


Figura 5: Comparación de rotores. [4]

## 2.5. FALLOS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

Como resultado de los distintos esfuerzos a los que se ven sometidos los motores de inducción en cada uno de sus elementos constituyentes (ver tabla 1), los factores y las causas que pueden producir defectos y fallos en este tipo de motores son innumerables. No obstante, estos fallos también son provocados por uso excesivo del motor tanto en tiempo como en capacidad.

ESFUERZOS	ESTATOR	ROTOR	RODAMIENTOS
Térmica	X	X	X
Dieléctrica	X	X	X
Mecánica	X	X	X
Dinámica		X	X
Residual		X	X
Electromagnética	X	X	X
Ambiental	X	X	X

*Tabla 1: Esfuerzos sobre los elementos de un motor de inducción. [1]*

Asimismo, los defectos que se producen en un motor se pueden agrupar en dos categorías en función del grado de influencia que tenga el mismo en la capacidad de trabajo del motor [5]:

- Fallo total o catastrófico: Fallo que inhabilita el sistema completamente, provocando que no pueda ejercer su función.
- Fallo incompleto o parcial: Fallo que inhabilita algún elemento concreto del sistema, pero el motor puede seguir en funcionamiento con una menor capacidad al reducirse alguna de sus características.

A pesar de que nos centraremos en el estudio de los fallos producidos en los rodamientos, describiremos en este apartado los distintos fallos que pueden producir en este tipo de motores, agrupándoles en tres categorías: fallos en el rotor, fallos en el estator y fallos en los rodamientos y eje.

## 2.5.1. RODAMIENTOS Y EJE.

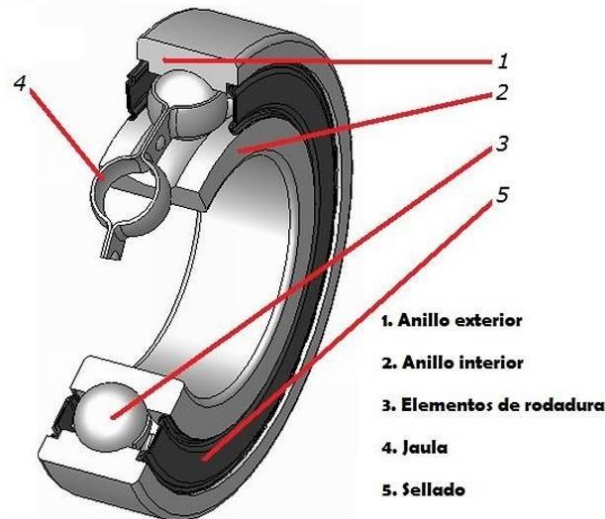
Previamente a la definición de los distintos fallos que sufre un rodamiento, realizamos una descripción de qué es un rodamiento y sus elementos.

### 2.5.1.1. DESCRIPCIÓN DE UN RODAMIENTO

Un rodamiento (véase figura 6) es un elemento mecánico cuyo principal objetivo es reducir la fricción entre dos piezas por medio de elementos rodantes. Se sitúa entre dos componentes de una maquina con un eje de rotación común para que exista un movimiento relativo entre ambos. [6]

Los componentes principales de un rodamiento son:

- Elementos rodantes que pueden ser bolas, rodillo o agujas fabricados para soportar una alta resistencia a la fátiga y al desgaste. Suelen estar fabricados en aceros duros.
- La jaula donde se encuentran las rodaduras de manera separada y guiada están fabricadas con aceros blandos, latón o bronce entre otros materiales.
- Las pistas o anillos tanto interiores o exteriores que constituyen una superficie para las bolas del rodamiento.



*Figura 6: Componentes de un rodamiento. [7]*

Tras diversos estudios estadísticos se ha comprobado que los rodamientos son los elementos que sufren más deterioros en los motores eléctricos debido al esfuerzo y a la fatiga del material por lo que son la primera causa de fallo en los motores eléctricos.

Además, es un elemento que tiene un tiempo de vida útil finito por lo que debe ser sustituido en periodos de tiempo concretos, los cuales suelen venir especificados por el fabricante. Este tiempo de vida útil viene determinado por el número de horas de actividad a velocidad constante hasta que aparece la primera muestra de fatiga en el material.

### 2.5.1.2. FALLO EN UN RODAMIENTO

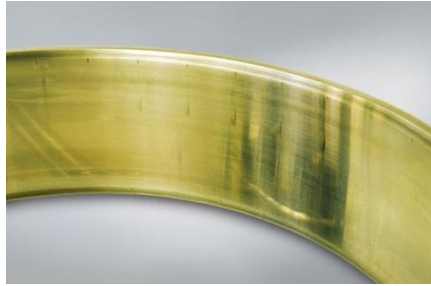
A pesar de que los rodamientos, como cualquier otro elemento, está diseñado para que no falle durante su ciclo de vida útil, como todo componente, puede fallar antes de que se agote por lo que, a continuación, enumeramos y explicamos las causas de fallo más comunes:

- El tamaño del rodamiento es erróneo y, por lo tanto, su diseño también lo es.
- La contaminación externa.
- El paso de la corriente eléctrica.
- Lubricación incorrecta del material.
- Presencia de vibraciones cuando el motor no está funcionando.
- Presencia de partículas que contaminan el rodamiento.
- Carga excesiva tanto en estado estacionario como dinámico.

Cuando el diseño del rodamiento no es adecuado se producen holguras no deseadas que provocan el incremento de las vibraciones y estas, a su vez, generan un fallo en el material por fatiga. En la figura 7 podemos observar la rotura del anillo interior de un rodamiento provocada por una carga que genera un impacto repetidas veces mientras que en la figura 8 podemos observar la presencia de arañazos debido a la inclinación del anillo interior y posterior.



*Figura 7: Rotura de la pista interior. [8]*



*Figura 8: Arañazos en la pista de rodadura. [8]*

Hay que considerar que una adecuada lubricación es fundamental para evitar que la vida útil del rodamiento disminuya ya que su principal propósito es reducir la fricción entre superficies. Para ello, debemos considerar la vida útil del lubricante. Si es inferior a la del rodamiento será necesario relubricarlo mientras que en caso contrario no. Asimismo, en ocasiones, ciertos rodamientos precisan de relubricación cada cierto periodo de tiempo independientemente de la vida útil del lubricante.

Algunas consecuencias de una errónea lubricación serían:

- Quemado del bobinado.
- Rotura del rodamiento.
- Aumento en el rodamiento de su temperatura y de la fricción.
- Presencia de contaminantes.

Cabe destacar que, por el contrario, un exceso de lubricación también es perjudicial para el rodamiento. Alguna de las consecuencias que provocaría:

- Resistencia al movimiento
- Disminución del calor que se disipa provocando un incremento de la temperatura.
- La grasa penetra en las bobinas del motor.
- Reducción de la vida útil del rodamiento y del lubricante.

Como resultado de una mala lubricación podemos ver en la figura 9 la presencia de manchas que generan diminutas grietas las cuales pueden provocar la rotura del rodamiento a lo largo del tiempo.



*Figura 9: Descamación del rodamiento. [8]*



Los rodamientos están proyectados para soportar una determinada carga máxima, por lo que si se supera ésta podría provocar un fallo temprano en el rodamiento. Algunas de las consecuencias son la aparición de grietas, un rayado e, incluso, la rotura del rodamiento. En la figura 10 observamos el resultado de una carga axial excesiva.



*Figura 10: Escamación del rodamiento debido a un exceso de carga axial. [8]*

Otro de los fallos presentes en los rodamientos se debe a la presencia de corriente eléctrica a través del mismo. Esta corriente que atraviesa el rodamiento produce un arco eléctrico provocando la fusión del aceite en los puntos de contacto entre la rodadura y los elementos rodantes. Dichos puntos de contacto generan estrías y pliegues que se pueden apreciar a simple vista. Podemos ver estas consecuencias en la figura 11.



*Figura 11: Rayado debido al paso de la corriente eléctrica. [8]*

### **2.5.1.3. FALLO EN EL EJE**

Tras realizar numerosos estudios, se ha comprobado que la causa de fallo en los ejes en cualquier tipo de máquina se debe principalmente a la fatiga, la sobrecarga, la corrosión y las fracturas. En las máquinas eléctricas, el fallo más habitual es el fallo por fatiga que puede llegar a ser la causa del 90 % de los fallos que sufre un eje. Los fallos por fatiga los podemos clasificar en tres tipos: Fatiga flectora, fatiga torsional y fatiga axial.



## 2.5.2. ESTATOR

Los fallos en el estator tienen tendencia a producirse en un mismo elemento que es el aislamiento eléctrico del bobinado trifásico debido al efecto de diversos factores como los factores eléctricos, mecánicos, térmicos, medioambientales, etc.

Alguno de los fallos más habituales en el devanado del estator son los siguientes:

TIPO DE FALLO	CONSECUENCIA
Cortocircuito entre espiras	El motor puede seguir en servicio por un tiempo límite.
Cortocircuito entre bobinas de la misma fase	El motor puede seguir en servicio por un tiempo límite.
Cortocircuito entre fases	Fallo del motor. El sistema de protección se activa y desconecta el motor.
Derivación de fase a masa	Fallo del motor. El sistema de protección se activa y desconecta el motor.
Circuito abierto en una fase	El motor puede seguir en funcionamiento dependiendo de la carga y del circuito de protección.

*Tabla 2: Fallos más habituales en el devanado del estator. [1]*

A continuación, presentamos los distintos esfuerzos que provocan el fallo en el estator y la forma más habitual de presentarse [1]:

- Esfuerzos eléctricos

El aislamiento del bobinado puede verse afectado por distintos factores de carácter eléctrico, entre los que destacamos:

- El efecto *tracking* producido por otros factores externos como la humedad y la suciedad o por factores internos como el deterioro de los aislantes que generan caminos paralelos en la superficie del aislante permitiendo la circulación de corriente hacia masa. La circulación de corriente produce genera puntos calientes sobre el aislamiento. Este efecto se identifica a partir de un zumbido intermitente.
- Efecto corona que suele producirse en la parte superior de la bobina. Se produce cuando las partículas que están en el aire se ionizan y pueden conducir la corriente eléctrica. En este caso, el efecto corona se materializa en forma de descarga eléctrica y se visualiza como una capa azul alrededor de los elementos conductores. Puede producir la rotura de los aislantes y llegar a formarse un arco eléctrico. Para evitar su aparición se pretende uniformizar el campo eléctrico a lo largo del sistema aislante.

- Descargas parciales provocadas porque la rigidez del dieléctrico del aire se ha visto superada. Estas descargas disminuirán las características químicas del aislamiento llegando incluso a provocar su perforación.

- Esfuerzos mecánicos

Existen diversos esfuerzos mecánicos que pueden provocar un fallo en el estator. Hemos considerado los que ocurren con mayor frecuencia:

- La aparición de elementos ajenos al estator puede provocar fallos en el sistema generando daños en el aislamiento del bobinado, en las chapas del campo magnético, en las barras, etc. Estos objetos pueden ser, por ejemplo, tornillos mal ajustados, o bien elementos externos al motor que se introducen por el sistema de ventilación. Este fallo es especialmente significativo cuando el entrehierro es de pequeño tamaño (como en los motores de inducción).
- Fatiga provocada por las vibraciones. Las vibraciones, las cuales pueden ser tanto internas (producidas por el propio motor) o externas (generadas por máquinas que se encuentran próximas al motor de inducción) son comunes en todas las máquinas eléctricas y pueden provocar la rotura de las láminas que constituyen el aislamiento, así como el roce de las bobinas con otros componentes del motor.
- Movimiento de las bobinas provocado por las fuerzas electromagnéticas que se generan a causa de la elevada intensidad que se produce cuando arrancamos el motor o bien a causa de las conmutaciones o cortocircuitos exteriores. Esto puede producir desde microfracturas hasta rupturas mecánicas significativas.
- Las fuerzas oscilatorias generan un movimiento radial y longitudinal que puede producir daños en el aislamiento de la bobina como resultado del rozamiento.

- Esfuerzos térmicos

El factor térmico es uno de los efectos que provocan el envejecimiento del aislante de las bobinas y se produce cuando la temperatura del motor supera a la temperatura máxima del aislante de la bobina. Generalmente, el incremento de la temperatura de la máquina se produce debido a cualquier funcionamiento anómalo de la misma produciendo una sobrecarga térmica.

Las sobrecargas térmicas pueden originarse por diversas causas, como, por ejemplo: Una mala ventilación, aumento de la temperatura ambiente, calentamientos localizados, etc.

No obstante, para aumentar la vida térmica del aislante se podría aumentar la clase del aislante utilizado o bien disminuir la temperatura a la que funciona el motor. Cabe destacar que, si superamos en 10°C la temperatura del aislamiento, la vida útil del motor se reduce a la mitad (ley de Montsinger).

- Esfuerzos medioambientales

Para un correcto funcionamiento del motor es necesario protegerlo de los distintos factores ambientales que pueden afectarle, entre los que destacamos:

- La condensación que se produciría cuando se acumula la humedad debido a que el motor ha estado parado durante un largo periodo de tiempo. Como consecuencia, se degradarían las características del aislamiento. Para solucionarlo sería necesario secar el interior antes de volver a ponerlo en funcionamiento o bien, mientras no funcione mediante la utilización de estufas, conservar la temperatura del interior del motor por encima de la temperatura ambiente.
- La contaminación generada por partículas como agua, polvo, aceite u otros elementos que generan una capa de suciedad la cual provoca que no se pueda evacuar correctamente el calor del motor disminuyendo así la vida útil del aislamiento. Igualmente, se producirán caminos alternativos de la corriente a masa y como resultado se degradará la masa de los rodamientos.
- La temperatura ambiente elevada puede provocar una reducción de la vida útil del motor por lo que se requiere de unas condiciones especiales para un adecuado funcionamiento. Por ejemplo, en los rodamientos será necesario el uso de un lubricante especial.
- El funcionamiento en altitudes elevadas reduce la capacidad del motor debido a las dificultades del mismo para refrigerar. Esto se debe a que a mayor altitud, menor presión ambiental y, por lo tanto, menor densidad del aire. La solución para que no se produzcan fallos es reducir la potencia nominal del motor.

### 2.5.3. ROTOR

A diferencia del estator, el rotor presenta mayor robustez debido a su forma constructiva. En general, los problemas del rotor están relacionados con el exceso de temperaturas que se alcanzan en el rotor provocando un sobrecalentamiento del mismo y con las elevadas fuerzas que soportan las barras en sus extremos.

No obstante, los esfuerzos que sufre son de la misma clase que el estator entre los que destacamos esfuerzos térmicos, mecánicos, dinámicos, magnéticos y medioambientales. Todos ellos, individualmente y de forma combinada, contribuyen a los fallos prematuros y la forma en que lo hacen es analizada en los siguientes apartados [1]:

#### - Esfuerzos térmicos

El sobrecalentamiento es uno de los mayores problemas que sufre el rotor por lo que se debe respetar las características indicadas por el fabricante. Cuando se produce alguno de los siguientes factores: una aceleración incorrecta, un elevado número de arranques, un desequilibrio en la tensión o la ventilación no es suficiente, es posible que se den sobrecargas térmicas que provocan un incremento de la temperatura del rotor. Además, cuando la temperatura del rotor no es constante se puede producir un desequilibrio térmico que da lugar a rotura de los anillos o de las barras.

Otra de las causas del sobrecalentamiento del rotor es que la distribución de la corriente en las barras no es uniforme bien por deficiencias en el diseño y fabricación de la jaula o por una incorrecta refrigeración de la misma.

#### - Esfuerzos mecánicos

Existe un gran número de defectos que pueden ser asignados a este grupo como, por ejemplo: la pérdida del entrehierro, la resonancia de los dientes, geometría defectuosa del rotor, materiales incorrectos, etc. La mayoría de defectos mecánicos se producen por factores como el ciclo de trabajo, los procesos a los que se ve sometido el motor o defectos de fabricación.

#### - Esfuerzos dinámicos

Principalmente los podemos clasificar en dos grupos:

- Fuerzas centrífugas generadas cuando el rotor se ve sometido a una velocidad superior para la que fue diseñado. Sin embargo, normalmente existe la posibilidad de limitar la velocidad a la que funciona el rotor para evitar que se produzca un exceso de velocidad. De esta manera se evitarían sus consecuencias como el desplazamiento del eje o de la jaula.

- Esfuerzos cíclicos provocados cuando la alineación con el eje no es correcta, cuando alguno de los ejes no está recto o bien por un error en el tamaño de la polea. El resultado sería un defecto de fatiga.

- Esfuerzos magnéticos

Debemos de tener en cuenta que, en todo motor ideal, el rotor se encuentra centrado en el entrehierro por lo que las fuerzas magnéticas estarían equilibradas en las direcciones opuestas. Sin embargo, debido al peso del motor o al desgaste de los rodamientos, entre otros factores, en la realidad el rotor no está perfectamente centrado provocando un cierto nivel de excentricidad. Debido a esto, se generan unas fuerzas electromagnéticas que pueden llegar a reducir el entrehierro provocando que el rotor entre en contacto con el estator. Igualmente, dichas fuerzas ayudan a desplazar las barras generando una vibración en el rotor. Las barras del rotor se encuentran bajo un esfuerzo de fatiga que puede llegar a romperlas.

- Esfuerzos medioambientales

Al igual que para el estator, la presencia de ciertos agentes externos como partículas de polvo o la presencia de humedad pueden el correcto funcionamiento del sistema de ventilación dando lugar a sobrecalentamientos.

En cuanto a las causas más habituales de fallos en el eje son debidas a fracturas, sobrecargas, corrosión y fatiga. El 90 % del total de los fallos en este elemento es debido al fallo por fatiga.

## **2.6. MANTENIMIENTO**

### **2.6.1. INTRODUCCIÓN: ¿QUÉ ES EL MANTENIMIENTO?**

El mantenimiento constituye uno de los pilares fundamentales en la mayor parte de empresas, especialmente en aquellas dedicadas al sector industrial y del transporte.

Entendemos por mantenimiento como el conjunto de técnicas que permiten conservar las instalaciones, los equipos y las herramientas en las mejores condiciones de funcionamiento maximizando su disponibilidad, así como su rendimiento por lo que ocupa un lugar fundamental en la estructura de cualquier organización.

Su finalidad es doble: por un lado, reducir los costes derivados de problemas en la producción como por ejemplo la compra prematura de nueva maquinaria para lo cual pretende extender la vida útil de los equipos. Por otro lado, tiene como objetivo

mejorar la calidad del proceso productivo, así como de los productos resultantes del mismo. No obstante, debemos tener en cuenta que a pesar de que, en general, el mantenimiento tiende a reducir los costes y pretende mejorar la fiabilidad de los componentes, si se realiza de manera excesiva, los costes tienden a dispararse por lo que el objetivo es encontrar un punto de equilibrio entre el exceso y defecto del mantenimiento.

El concepto de mantenimiento surge en los años 30 con la aparición de Henry Ford, quien implementó el sistema de fabricación en cadena. Debido a que el sistema de producción provocaba que las máquinas estuvieran en funcionamiento durante largos periodos de tiempo, éstas fallaban antes de lo previsto por lo que Ford decidió crear una zona dedicada al mantenimiento de los equipos.

Asimismo, podemos observar con claridad como el mantenimiento se puede clasificar en tres generaciones:

- La primera generación engloba desde la industrialización hasta la Segunda Guerra Mundial. Esta época se caracterizaba por la escasa mecanización y en donde los equipos eran sencillos por lo que no era necesario un mantenimiento, simplemente valía con las rutinas de limpieza y lubricación.
- En la segunda generación, con el desarrollo de la Segunda Guerra Mundial, se produjo un incremento de la mecanización provocando una clara dependencia de las máquinas por lo que se considera que es necesario prevenir los fallos en los distintos equipos (mantenimiento preventivo)
- En la tercera generación se producen grandes cambios en la industria con la aparición de nuevas técnicas de producción, nuevas expectativas e investigaciones. Debido en parte a estos cambios, se dieron cuenta de que a partir de los distintos datos que se podían obtener de la producción los fallos podrían predecirse antes de que ocurriesen (mantenimiento predictivo)

A continuación, presentamos el desarrollo en las técnicas de mantenimiento obtenido del libro: *Mantenimiento predictivo: Motores de inducción*. [1]

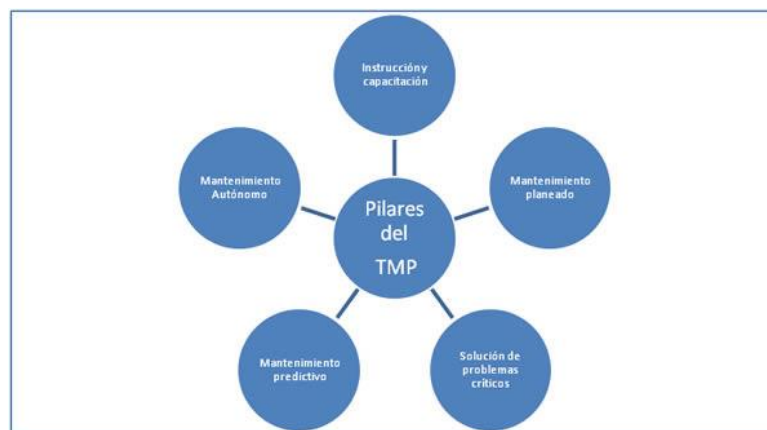
1ª Generación	2ª Generación	3ª Generación
Arreglar cuando se rompe	Revisiones programadas	Monitorización del estado
	Sistemas de control y planificación del trabajo	Diseño enfocado a la fiabilidad y mantenibilidad
	Ordenadores grandes y lentos	Estudios de riesgo
		Sistemas de expertos
		Trabajo multidisciplinar y en equipo

		Análisis del modo de fallo y sus efectos

*Tabla 3: Generaciones del mantenimiento.*

En la actualidad, como el objetivo del mantenimiento es la mejora continua del proceso de productivo, aparece un nuevo sistema de mantenimiento que aboga por la implicación continua de todos los trabajadores en el cuidado, la limpieza y el mantenimiento. Este sistema se llama TPM (Total Productive Maintenance o Mantenimiento Productivo Total).

El TPM se basa en cinco pilares los cuales podemos ver a continuación:



*Figura 12: Pilares del TPM. [9]*

En nuestro proyecto, como el objetivo es detectar el fallo en el motor de inducción antes de que se produzca mediante el espectro de la corriente eléctrica, nos centraremos en explicar en el apartado 2.6.3 el pilar del mantenimiento predictivo. No obstante, para situarnos en contexto, incluiremos un apartado donde se resuman las principales características de los otros dos mantenimientos por excelencia: Mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo.

Por último, cabe destacar que durante los últimos años han aparecido otra serie de técnicas relacionadas con el mantenimiento de los equipos como por ejemplo el AMFE (Análisis de Modos de Fallos y Efectos) el cual es una técnica de prevención dirigida hacia la consecución del Aseguramiento de la calidad que permite identificar las causas potenciales de los problemas. La principal diferencia con otras técnicas es el hecho de que se parte del supuesto de que se va a estudiar un fallo hipotético para evitar la avería mientras que en el resto de técnicas se estudia el fallo una vez que ha ocurrido. [10]

## **2.6.2. MANTENIMIENTO CORRECTIVO Y PREVENTIVO**

### **2.6.2.1. MANTENIMIENTO CORRECTIVO**

Este tipo de mantenimiento se realiza cuando se ha presentado el fallo en el equipo, momento en el cual se procede a su reparación. Es el mantenimiento más sencillo pues no requiere de ningún tipo de análisis previo. Simplemente se espera a que se produzca la avería, momento en el que se designa a personal cualificado para que la solucione.

Este tipo de mantenimiento se utiliza cuando las averías tienen una reparación rápida y el coste de la misma no es muy elevado.

A pesar de que esta clase de mantenimiento presenta diversas ventajas (Sencillez de implementación, no es necesario una planificación, etc.) también presenta grandes complicaciones como por ejemplo que no se puede conocer el momento de la avería ni el tiempo de reparación por lo que puede provocar grandes paradas en el proceso productivo.

### **2.6.2.2. MANTENIMIENTO PREVENTIVO**

Este mantenimiento surge debido a la necesidad de mejorar los inconvenientes del mantenimiento correctivo, principalmente por los costes generados por la parada del sistema de producción.

El mantenimiento preventivo se realiza de forma frecuente en el tiempo tras haber realizado un estudio de la vida útil de cada componente e independientemente del fallo producido en el componente.

Esta clase de mantenimiento introdujo numerosas ventajas frente al correctivo como puede ser el ahorro en torno al 60 % de los costes. Además, se reduce el número de averías, así como de tiempos muertos y se mejora la eficiencia de las instalaciones. No obstante, el principal problema que presenta es el hecho de sustituir los diferentes elementos antes de finalizar su vida útil.



### 2.6.3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Dado los inconvenientes del mantenimiento correctivo, ya que se sustituyen los componentes una vez que se ha producido el fallo incurriendo en pérdidas económicas al tener que parar la producción, y a los problemas que presenta el mantenimiento preventivo, pues se sustituyen los componentes o elementos antes de agotar su vida útil, aparece un nuevo mantenimiento que denominamos predictivo.

El mantenimiento predictivo surge con la condición de sustituir los componentes defectuosos en el momento exacto, ni antes (como el mantenimiento preventivo) ni después de agotar su vida útil (como realiza el mantenimiento correctivo)

Este mantenimiento se basa en la aplicación de métodos estadísticos, que, mediante el control del proceso, permiten detectar cuando se producirá un fallo antes de que se produzca evitando la aparición de productos defectuosos o retrasos por problemas en la maquinaria. Para detectar dicho fallo, se utilizará un parámetro o variable observable que es indicativo del estado o rendimiento del equipo. Por lo general, esta variable será algún parámetro relacionado con una magnitud física: la presión, la temperatura, el ruido, la vibración, la tensión o el consumo energético entre otros.

A pesar de que su aplicación mejoraría los resultados de los dos mantenimientos anteriores, es muy importante considerar su conveniencia en función de las características del equipo estudiado. Esto se debe a que tal vez sea menos costoso aplicar un mantenimiento correctivo si el elemento es muy sencillo (como puede ser una lámpara eléctrica) pues el mantenimiento predictivo requiere de técnicas muy sofisticadas que serán más eficaces en otros equipos cuyo desmontaje sea más complejo como los motores de inducción.

Alguna de las ventajas que presenta esta clase de mantenimiento son: desmontajes innecesarios, mejor aprovechamiento de la vida útil de los componentes, mejora la planificación, mayor conocimiento del equipo empleado, mejora la fiabilidad, etc.

Entre los inconvenientes destacamos la necesidad de formación del personal, pues necesitan conocer las distintas técnicas de análisis e interpretación de resultados y la mayor inversión inicial.

En la actualidad, y debido a la necesidad de que las técnicas utilizadas en el motor de inducción para detectar fallos mejorasen, existen multitud de técnicas las cuales presentamos en el próximo apartado.

## 2.6.4. TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.

Las técnicas para este tipo de motores se pueden agrupar en dos grupos: En el primer grupo encontramos todas aquellas técnicas que solo se pueden realizar cuando el motor está parado ya que es necesario desmontar una parte o la totalidad del motor. Previamente habrá sido necesario un estudio para detectar qué instante es el óptimo para dejar el motor fuera de servicio. Estos métodos de diagnóstico se centran en observar el deterioro del sistema aislante, así como el estado del núcleo magnético.

Estas técnicas las podemos clasificar en:

- Medida del aislamiento a masa
- Aislamiento entre espiras
- Análisis del núcleo magnético
- Análisis del lubricante de rodamientos.

No debemos olvidar la inspección visual de los diferentes elementos del motor cuando este está parado pues se podría considerar como el análisis más poderoso.

Por otro lado, en el segundo grupo encontramos la técnica que empleamos en este proyecto, el análisis del espectro de la corriente la cual forma parte de aquellas técnicas que no necesitan parar el motor por lo que son mucho más interesantes que las anteriores ya que la producción no se tiene que detener. Algunas técnicas son:

- Análisis de vibraciones
- Análisis acústico
- Análisis de la corriente del estator
- Medida de la temperatura

A continuación, analizamos con mayor profundidad el método que nos concierne para este proyecto.

## 2.6.5. ANÁLISIS DEL ESPECTRO DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

Esta técnica está muy extendida debido a su alta fiabilidad para el diagnóstico de fallos en motores de inducción. Además, su uso también se debe a su sencillez pues solo se necesita de una pinza amperimétrica para la toma de la corriente.

Para detectar el fallo debemos de fijarnos en sí la corriente que circula por el motor lo hace de forma homogénea. En caso de que no sea así, se produciría una alteración en el campo magnético.

Dependiendo del fallo que se produzca en el motor, la corriente presentara unos armónicos a unas determinadas frecuencias que nos permitirán detectar el fallo.

Una vez que hemos recogido los datos de la corriente, debemos transformarla del espacio temporal al espacio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier.

Una vez que nos encontramos en el espacio de la frecuencia, las frecuencias nos ayudarán a detectar la anomalía que se produce en el motor para cada fallo, independientemente de si es alimentado por red o mediante un inversor de frecuencia.

Se pueden observar que existen diversos estudios para detectar los fallos en el motor. Por ejemplo, rotura de barras, fallos por excentricidad, etc. Sin embargo, nosotros nos centraremos en explicar el fallo en los rodamientos.

Como hemos explicado en el apartado 2.5 del presente Trabajo Final de Grado, los rodamientos es el elemento que más averías sufre a lo largo de su vida útil. Esto se debe a que, de forma general, suelen trabajar en diferentes condiciones adaptándose a las diferentes condiciones en las que funciona el motor.

Al analizar el espectro de la corriente, la frecuencia donde se presenta el fallo es la siguiente:

$$f_{rod} = |f_1 \pm n f_v|$$

Donde  $f_1$  es la frecuencia que viene determinada por la alimentación de la corriente del motor y  $f_v$  es la frecuencia característica de la vibración.

Las frecuencias características de vibración que determinan el fallo que se produce en el motor son las siguientes:

- BPGI (Ball passing frequency inner race): Hace referencia a la frecuencia de deterioro de la pista interior.

$$BPGI = \frac{N_b}{2} \left[ 1 + \frac{B_d}{P_d} \cos(\alpha) \right] f_r$$

- BPGO (Ball Passing Frequency Outer Race): Frecuencia de deterioro de la pista exterior.

$$BPGO = \frac{N_b}{2} \left[ 1 - \frac{B_d}{P_d} \cos(\alpha) \right] f_r$$

- BSF (Ball Spin Frequency): Frecuencia de los elementos rodantes.

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left[ 1 - \left( \frac{B_d}{P_d} \cos(\alpha) \right)^2 \right] f_r$$

- BFTF (Ball Fundamental Train Frequency): Es la frecuencia del deterioro de la jaula.

$$BFTF = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{B_d}{P_d} \cos(\alpha) \right] f_r$$

---

## CAPÍTULO 3: EXPERIMENTACIÓN

---

### 3.1. INTRODUCCIÓN

La experimentación ha tenido lugar en el departamento de ingeniería eléctrica de la universidad de Valladolid en la Escuela de Ingenieros Industriales, situada en el Paseo del Cauce, y ha sido realizado por los profesores de dicho departamento. El experimento consiste en someter a un mismo motor a una serie de ensayos y comparar su comportamiento en función del estado del rodamiento:

- E0: Sano
- E4: Totalmente roto

Esta notación se debe a que el rodamiento se ha ido deteriorando progresivamente desde un estado E0 en el que está totalmente sano hasta un estado E4 donde está completamente roto pasando por E1, E2, E3 que son estados intermedios. Para reducir la vida útil de los componentes se ha ido añadiendo pasta abrasiva al lubricante.

La alimentación del motor eléctrico se ha realizado mediante dos variadores diferentes AB, al cual se le ha ido modificando sus características, y WEG. También se ha procedido a alimentar conectados a la red:

- 4 de AB: Inversor PowerFlex de Allen Bradley
  - AB1: Frecuencia de alimentación es de 50 Hz y la frecuencia de conmutación es de 4 kHz.
  - AB2: Frecuencia de alimentación es de 25 Hz y la frecuencia de conmutación es de 4 kHz.
  - AB3: Frecuencia de alimentación es de 75 Hz y la frecuencia de conmutación es de 4 kHz.
  - AB4: Frecuencia de alimentación es de 50 Hz y la frecuencia de conmutación es de 5 kHz.
- WEG: Inversor CFW – 11 de WEG.
- Directamente a la RED.

Cabe destacar que, a pesar de que se podrían haber realizado los ensayos en vacío se decidió realizarlos a dos niveles de carga para estudiar su posible influencia:

- NC1: Baja carga
- NC2: Alta carga

Lo que se pretende en este experimento es capturar la corriente del estator del motor de inducción y, mediante la transformada rápida de Fourier, transformar la corriente del dominio del tiempo al de la frecuencia.

Podemos ver el modelo de trabajo de la transformada rápida de Fourier en las siguientes figuras:

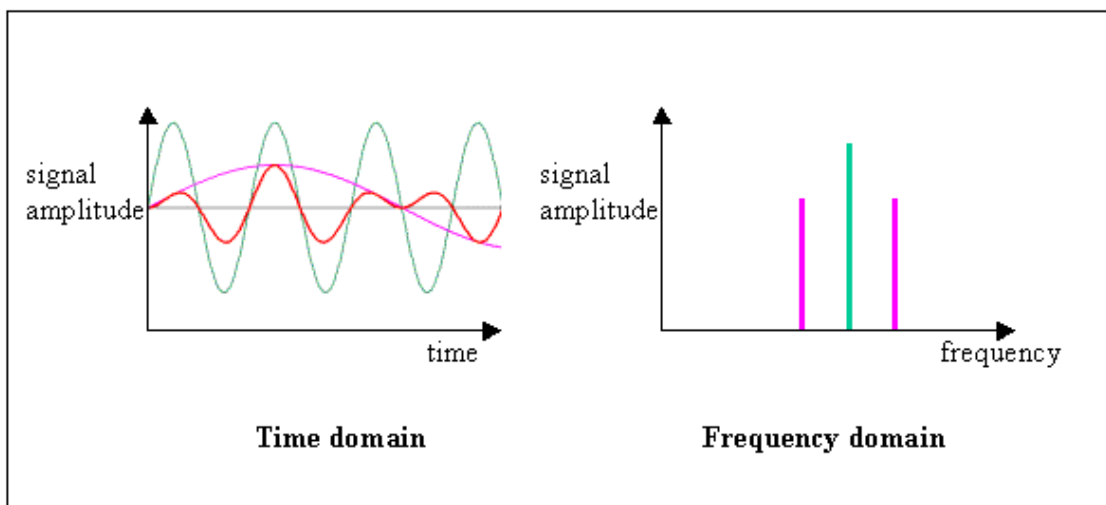


Figura 13: Transformada de Fourier (I) [11]

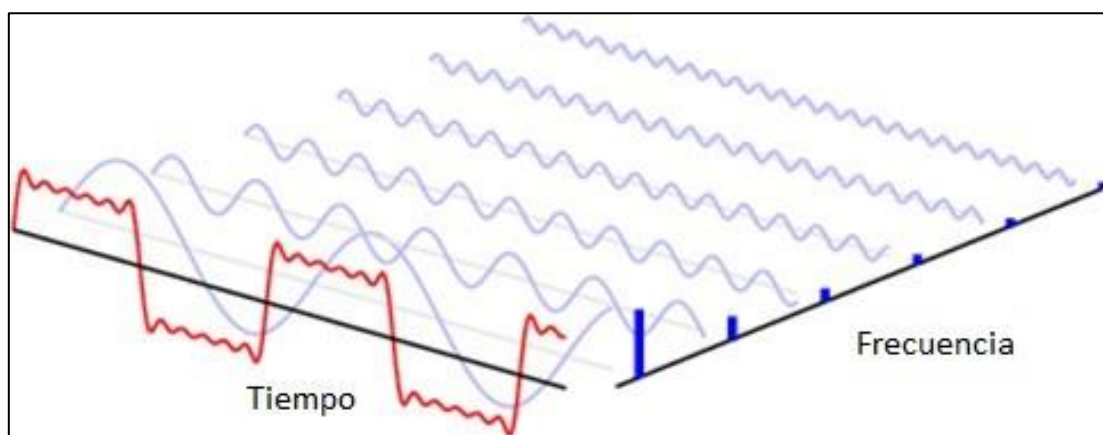


Figura 14: Transformada de Fourier (II) [8]

La finalidad de realizar la transformada de Fourier es dividir una onda que no es senoidal en la agregación de varias ondas que sí son senoidales con diferentes amplitudes y frecuencias ya que estas últimas nos aportaran información para deducir el fallo en los diferentes elementos que constituyen los rodamientos de un motor de inducción. La amplitud vendrá medida en decibelios.

El fallo que se produce en el rodamiento siempre es el mismo. No obstante, lo que varía es la frecuencia característica para detectar dicho fallo. Las frecuencias características que se utilizan para detectar el fallo son las siguientes:

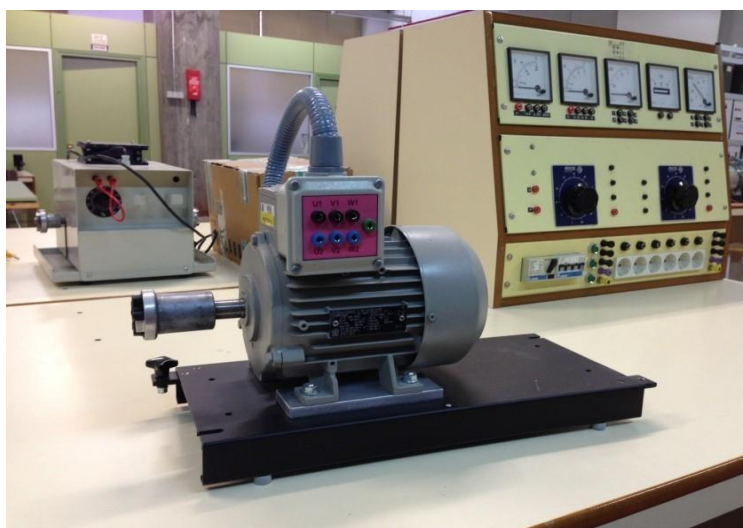
- Fallo en la pista interna del rodamiento (BPFI)
- Fallo en la pista externa del rodamiento (BPFO)
- Fallo en la jaula del rodamiento (BFTF)
- Fallo en las bolas del rodamiento (BSF)

### **3.2. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL EMPLEADO. BANCO DE ENSAYOS.**

En este apartado se explican los diferentes elementos empleados para realización del experimento, así como sus características técnicas.

#### **3.2.1. MOTOR COMERCIAL**

El motor de inducción empleado en este experimento (véase la figura 15) es de la marca SIEMENS con estructura de jaula de ardillas. También podemos observar otro motor de la misma marca, pero con distinta apariencia en la figura 16 donde podemos apreciar que se va indicando el estado del motor en la parte superior del mismo.



*Figura 15: Motor Siemens. [8]*

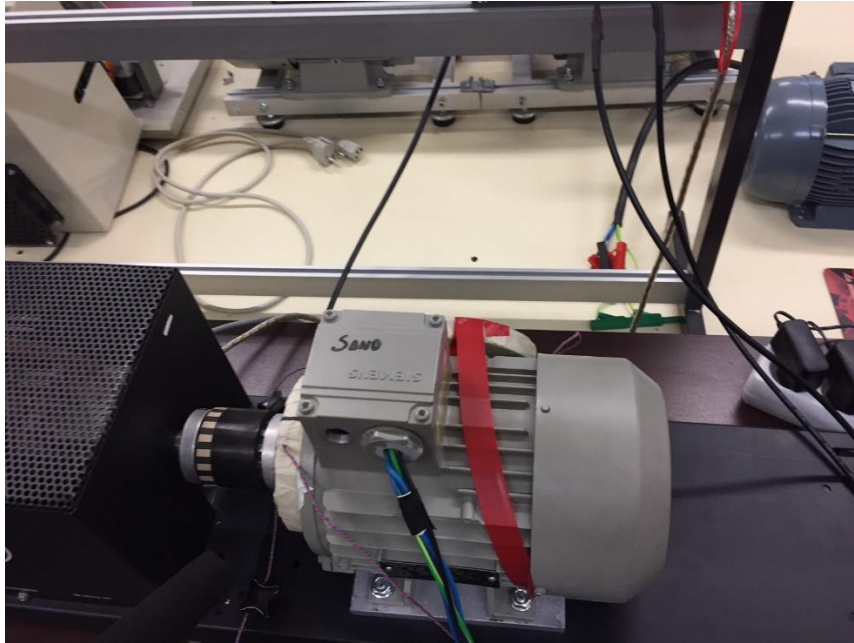


Figura 16: Motor Siemens (II)

A continuación, presentamos los parámetros técnicos del motor:

Potencia nominal	0,75 kW
Tensión nominal	3x230/400 V
Conexión del estator	Estrella
Frecuencia nominal 50 Hz	50 Hz
Corriente nominal	1,9 A
Número de pares de polos	2
Velocidad nominal	1395 rpm
Denominación	3 ~ Mot 1LA7083-4AA10
Número de serie	UD 0601/70097477-12
Eficiencia	IE1
Índice de protección	IP55
Tamaño	80M IM B3
Clase térmica	ThcL F
Factor de Servicio	1,1

Tabla 4: Características técnicas del motor Siemens.



### 3.2.2. VARIADORES DE FRECUENCIA.

Los variadores de frecuencia, también denominados inversores, son sistemas que sirven para gestionar la velocidad de giro de los motores de corriente alterna a través del control de la frecuencia de alimentación que es proporcionada al motor. Igualmente, se encargan de otras funciones, entre las cuales destacamos: controlar la velocidad, el tiempo de arranque y proteger al motor. [12]

Como alternativa a la alimentación directa desde la red, se han utilizado dos inversores diferentes como fuente de alimentación:

Variador PowerFlex 40 de Allen.Bradley:

Potencia nominal	2,2 kW
Tensión y frecuencia de alimentación	3x380 - 480 V (48-63 Hz)
Tensión de salida	0 - 460 V
Corriente nominal	7,5 A
Frecuencia de salida	0 - 400 Hz
Corriente máxima de salida en continuo	6 A
Sobrecarga temporal (60 seg)	9 A

*Tabla 5: Características del Variador PowerFlex40 de Allen-Bradley.*



*Figura 17: Inversor PowerFlex 40 de Allen Bradley.*

### Variador CFW-11 de WEG

Potencia nominal	2,2 kW
Tensión y frecuencia de alimentación	3x380 - 480 V (50-60 Hz)
Tensión de salida	0 - Tensión de entrada V
Corriente nominal	3,5 A
Frecuencia de salida	0,1 - 300 Hz
Corriente máxima de salida en continuo	3,5 A
Sobrecarga temporal (60 seg)	5,25 A

*Tabla 6: Características del variador WEG.*



*Figura 18: Inversor CFW 11 de WEG.*

### 3.2.3. PC

El objetivo del PC es obtener toda la información mediante un USB conectado a la tarjeta de adquisición de datos. Es un modelo de HP Compaq modelo 6715s (ver figura 17).



*Figura 19: PC utilizado para la recogida de datos. [8]*

Marca	HP
Modelo	6715s
Procesador	AMD Turion 64 X2 TL-56
RAM	2048 MB
Disco Duro	120 GB SATA
Software	Windows 7 Pro 64 Bits

*Tabla 7: Características técnicas del ordenador.*

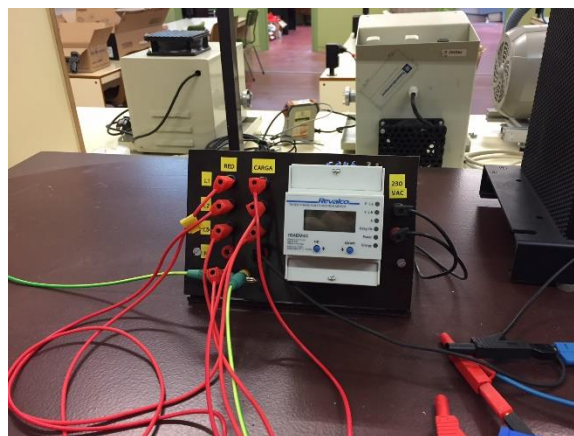
### 3.2.4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Este sistema tiene como finalidad transmitir los datos de cada uno de los ensayos al ordenador al cual se encuentra conectado mediante un USB 2.0. La tarjeta de adquisición de datos es un sistema modular formado por dos componentes principales: El módulo de adquisición (NI 9215) y el chasis compacto (NI cDAQ-9174).



*Figura 20: Tarjeta de adquisición de datos. [8]*

Otro ejemplo de tarjeta de adquisición de datos cuando las variables necesarias son menores es la siguiente:



*Figura 21: Tarjeta de adquisición de datos (II).*

A continuación, presentamos los parámetros técnicos tanto del chasis como del módulo de adquisición:

Número de serie	781157-01
Denominación	14E8524
Alimentación	9-30 V
Potencia máxima consumida	15 W
Número de temporizadores	4
Número de módulos	4
Resolución	32 bits
Número de ranuras	4
Interfaz de Bus	USB 2.0

*Tabla 8: Características técnicas del chasis.*

Número de serie	199269-1L 14C7DAA
Denominación	779011-01
Tipo de aislamiento	Tierra
Tipo de medida	Voltaje
Compatibilidad con RoHS	Sí
Entrada Analógica	Sí
Canales	4
Canales Diferenciales	4
Resolución	16 bits
Velocidad de Muestreo	100 kS/s
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V a 10 V
Muestreo Simultaneo	Sí
Conector de E/S	BNC
Temperatura de Operación	-40 a 70 ° C

*Tabla 9: Características del módulo de adquisición.*

### 3.2.5. TRANSDUCTORES

Los transductores, también denominados sensores o captadores, nos permiten realizar la medición de una determinada magnitud deseada. Se encuentran montados sobre dos placas (véase figura 20 y figura 21) diseñadas y construidas en el laboratorio y cuentan con un empaquetamiento PCB.

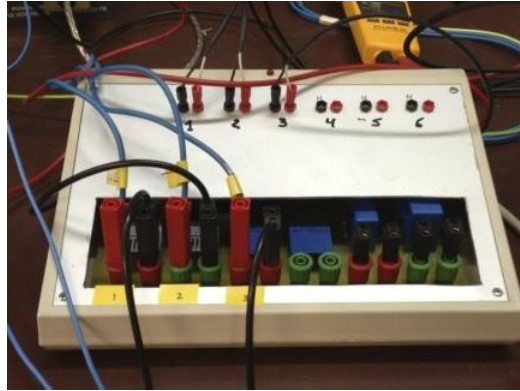


Figura 22: Tarjeta dedicada con los transductores. [13]



Figura 23: Tarjeta dedicada con los transductores. [13]

Para la realización del experimento se han utilizado dos tipos de sensores:

- Sensores de tensión

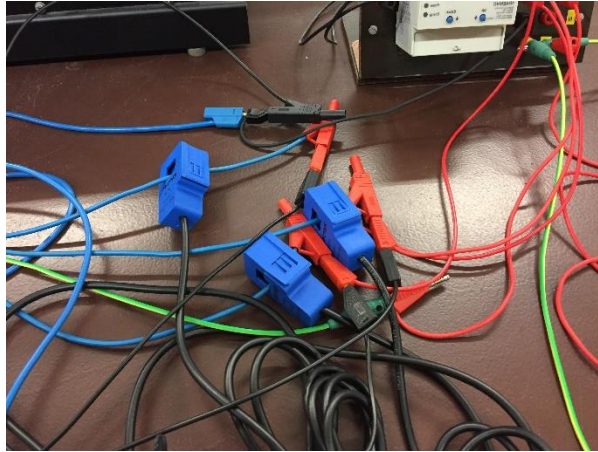
Este tipo de transductores se utilizan para obtener un registro de la tensión para lo cual es necesario registrar una corriente proporcional a la tensión medida a través de una resistencia externa en serie con el circuito.

En este experimento, se emplearon un sensor LEM LV 25- P basado en el efecto Hall.

- Sensores de corriente

En el experimento se han utilizado tres sensores de corriente para medir la intensidad de la misma que circula por el motor: dos de *Honeywell* y un tercero de *LEM*.

También existe la posibilidad de que los sensores tengan forma de pinza, como se puede apreciar en la siguiente figura:



*Figura 24: Sensores de corriente.*

Presentamos los datos técnicos de los transductores de LEM y de HoneyWell:

Denominación	LA 25 – NP
Corriente Primaria	25 mA (Eficaces)
Corriente Secundaria	25 mA (eficaces)
Rango de medida	- 36 a 36 A
Tensión de alimentación	- 15 a 15 V
Consumo de corriente	10 + Corriente secundaria mA
Precisión	- 0,5 a 0,5 %
Empaquetamiento	PCB

*Tabla 10: Parámetros técnicos del transductor de LEM.*

Denominación	CSNE151
Corriente Primaria	-36 a 36 A
Corriente Secundaria	25 mA (eficaces)
Tensión primaria (AC y DC)	10-500 V
Tensión de alimentación	- 15 a 15 Vdc
Consumo de corriente	10 + Corriente secundaria mA
Precisión	- 0,5 a 0,5 %
Empaquetamiento	PCB

*Tabla 11: Parámetros técnicos del transductor HoneyWell.*



### 3.2.6. FRENO ELECTROMAGNÉTICO Y UNIDAD DE CONTROL

Con el fin de cargar el motor y simular un par resistente constante se utiliza un freno de polvo magnético de la marca Lucas-Nülle. Para determinar el valor del par resistente que ejerce el freno, este va acompañado de una unidad de control (véase figura 22).



Figura 25: Freno de polvo magnético y unidad de control. [13]

## 3.3. ATRIBUTOS MEDIDOS

Para la consecución de los objetivos del experimento es necesario tratar convenientemente a la corriente del estator y, tras realizar la transformada rápida de Fourier, pasaremos de las medidas relativas del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y evaluaremos la amplitud de los armónicos en ciertas frecuencias características de fallo en el rodamiento.

### 3.3.1. IDENTIFICADORES DE LA EXPERIMENTACIÓN

Todos los resultados y datos obtenidos de los ensayos se encuentran agrupados en una misma hoja de cálculo (Explicado en el capítulo 6.1).

Nos encontramos con un determinado número de columnas donde distinguimos:

- Alimentación: Nos indica el tipo de alimentación utilizada. Como hemos comentado en el apartado 3.1, además de la alimentación de RED, hemos utilizado dos variadores de frecuencia: Allen Bradley y WEG.
- Nivel de carga: Los ensayos se han realizado a dos niveles de carga para cada fuente de alimentación con la finalidad de estudiar su posible influencia.

- Frecuencia característica de fallo: El fallo que se produce en el motor de inducción es siempre el mismo. No obstante, para detectarlo se ha hecho uso de diferentes frecuencias características las cuales hemos explicado en el apartado 3.1 y mencionamos de nuevo:
  - Fallo en la pista interna del rodamiento (BPFI)
  - Fallo en la pista externa del rodamiento (BPFO)
  - Fallo en la jaula del rodamiento (BFTF)
  - Fallo en las bolas del rodamiento (BSF)
- Estado del motor: A lo largo del ensayo, para cada fuente de alimentación, nivel de carga y frecuencia característica se ha ido deteriorando el rodamiento. Los distintos estados del mismo se denominan desde E0 cuando el motor está completamente sano hasta E4 cuando está roto pasando por los estados intermedios E1, E2, E3.
- VARIABLES: Las variables vienen determinadas en función de las frecuencias características de fallo, las cuales consisten en bandas alrededor de los armónicos principales. Por lo tanto, cada variable viene definida por la frecuencia característica de fallo, el orden del armónico y la banda (puede ser tanto positiva como negativa). Por lo tanto, el número total de variables será:

$$\text{Frecuencia Característica de Fallo} \times n^{\circ} \text{ de armónicos} \times n^{\circ} \text{ de bandas} \times 2 = 968$$

No obstante, hay que tener en cuenta que estos son las variables que obtuvimos departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid. En el capítulo 6.1 hablamos de este conjunto de datos así como del filtrado que realizamos para depurarlo.

Por otro lado, debemos considerar que el valor de la amplitud de cada variable viene dado en decibelios. Hay que tener en cuenta que estos valores han sido normalizados para que la amplitud del armónico principal sea cero.

A continuación, presentamos en una tabla el número de ensayos que se han realizado en el motor para cada fuente de alimentación y estado del fallo durante la experimentación eléctrica:

RED	Sano	20
	Fallo leve	15
	Fallo moderado	15
	Fallo grave	10
	Fallo muy Grave	10



WEG	Sano	20
	Fallo leve	15
	Fallo moderado	15
	Fallo grave	10
	Fallo muy Grave	10
Allen Bradley (AB1,AB2 , AB3.AB4)	Sano	20
	Fallo leve	15
	Fallo moderado	15
	Fallo grave	10
	Fallo muy Grave	10

*Tabla 12: Número de ensayos.*

### 3.3.2. VARIABLES RELATIVAS AL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Nuestro principal objeto de análisis es la respuesta en el dominio de la frecuencia del motor para sacar las conclusiones necesarias. No obstante, los registros que presentaron los sensores durante la experimentación eléctrica se corresponden al dominio del tiempo. Debido a esto es necesario realizar una transformación para obtener la señal adecuada.

Para llevar a cabo esta transformación se utilizó el software Matlab y el método más empleado para obtener el espectro de la corriente en frecuencia es la transformada de Fourier (FT). Sin embargo, el procesamiento de los datos es complejo dada la cantidad de operaciones matemáticas. Por ello, se desarrolló un algoritmo mucho más simplificado y eficiente: La transformada rápida de Fourier (FFT) que es la técnica empleada en la experimentación que estamos estudiando. Tras realizar la FFT, calcula la función *Power Spectral Density* (PSD) normalizada. Como hemos comentado en el apartado anterior, esta normalización permite establecer el 0 dB como amplitud del armónico principal. Igualmente, esta normalización nos permite mejorar la detección de las bandas laterales que nos indican el fallo.



---

## CAPÍTULO 4: TÉCNICAS ESTADÍSTICAS

---

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Como hemos descrito previamente en capítulos anteriores, el objetivo de este Trabajo Final de Grado es estudiar qué variables determinan si el motor se encuentra sano (E0), completamente roto (E4) o en cualquiera de las situaciones intermedias (E1, E2, E3). De esta manera, existirá la posibilidad de detectar el fallo antes de que se produzca y de realizar un mantenimiento predictivo reduciendo los costes y aumentando la eficiencia del proceso.

Para ello y mediante el uso de algoritmos estadísticos seremos capaces de observar patrones que determinen exactamente el estado del motor, que es lo que se conoce como *Machine Learning*.

El *Machine Learning* o aprendizaje automático tiene como objetivo proporcionar a las máquinas la capacidad de aprender a partir de datos almacenados. La finalidad es desarrollar programas que generalicen comportamientos a partir de datos e información suministrada en forma de ejemplo. Por lo tanto, dado que esta disciplina (el aprendizaje automático) se basa en el análisis de datos al igual que la estadística, podemos establecer que ambos campos se encuentran solapados en determinados momentos. Podemos ver en la siguiente figura un esquema del funcionamiento del *Machine Learning*:

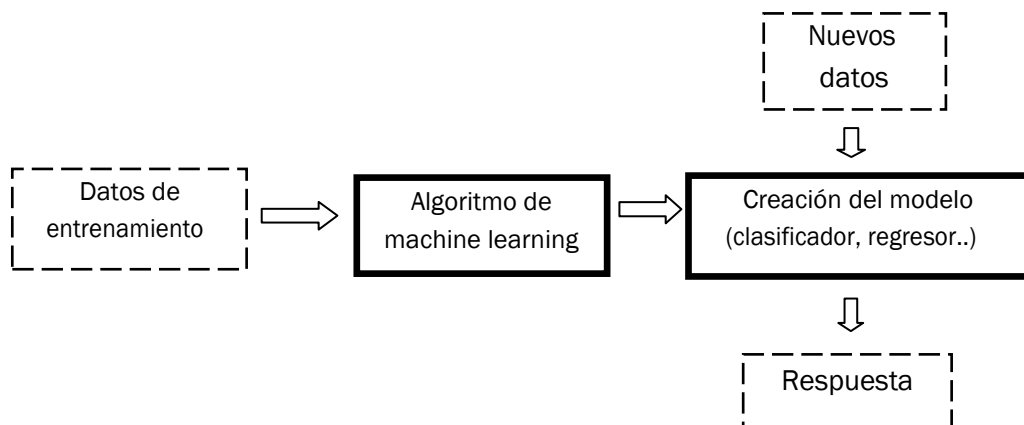


Figura 26: Fases del aprendizaje automático. [14]

Debemos considerar que el aprendizaje automático suele dividirse en dos:

- Supervisado: El test de entrenamiento está constituido por una serie de variables explicativas o predictores de las cuales conocemos sus características. Estos se encuentran agrupados en un determinado vector. Asimismo, se conocerá el valor de la variable a predecir o variable respuesta.

-No supervisado: Se desconoce el valor de la variable respuesta. Solo poseemos información acerca del vector de las variables explicativas.

Dentro del Aprendizaje Automático, existen multitud de técnicas empleadas desde algunas más simples como la regresión lineal hasta otras más complejas como pueden ser las redes neuronales.

A continuación, presentamos algunas de las técnicas más interesantes dentro del aprendizaje automático:

## **4.2. REGRESIÓN LINEAL Y POLINÓMICA**

### **4.2.1. REGRESIÓN LINEAL**

La regresión lineal es, dentro de los diferentes tipos de regresiones, la más simple pues su objetivo es pronosticar el posible valor de la variable respuesta (Y) a partir de una variable de entrada. Por lo general, este tipo de regresión se utiliza cuando la variable respuesta (Y) es una variable continua.

La regresión lineal se basa en el método de los mínimos cuadrados el cual consiste en aproximar una recta a los puntos que habíamos anotado anteriormente y que serán los datos de entrenamiento. Una vez ajustada la recta y obtenido los parámetros del modelo podremos realizar pronósticos acerca del valor que toma la variable respuesta en función del valor de las variables de entrada.

Un ejemplo sencillo de dos dimensiones sería cuando queremos predecir la velocidad máxima de un determinado vehículo en función de su potencia. En este caso, la variable respuesta Y sería la velocidad máxima del vehículo mientras que los valores de entrada serían las potencias. La función que aproximaría los datos se lo denomina función hipótesis y en este caso sería la siguiente:

$$Y=a+bX$$

Donde:

a es la ordenada en el origen y el término independiente.

b es la pendiente o inclinación de la recta.

Ambos parámetros,  $a$  y  $b$ , se determinan mediante el método de mínimos cuadrados y son característicos de la función hipótesis. Para determinarlos, es necesario entender lo que es la función de coste.

La función coste tiene como finalidad determinar lo buena que es la aproximación que hemos realizado por lo que a mayor valor de la función coste peor será dicha aproximación. De esta manera, el objetivo sería minimizar la función coste. Una vez que tengamos dicha función minimizada, ya tendríamos los parámetros de la función hipótesis y podríamos realizar las predicciones.

## **4.2.2. REGRESIÓN POLINÓMICA**

Al igual que la regresión lineal, su finalidad es la de predecir los valores de la variable salida a partir de unos valores de entrada. No obstante, la principal diferencia entre una y otra es el grado de la función hipótesis ya que mientras en la regresión lineal el grado es uno, en la regresión polinómica es mayor que uno.

## **4.3. REGRESIÓN LOGÍSTICA**

Este tipo de técnica se engloba en las técnicas de clasificación pues a diferencia de las dos regresiones anteriores, lineal y polinómica, la variable respuesta ( $Y$ ) es una variable categórica que puede adoptar un determinado número de clases en función de las variables de entrada.

Por lo tanto, cuando aplicamos este método de regresión clasificaremos un nuevo objeto del que desconocemos su clase en función de la probabilidad que tenga de pertenecer a una clase u otra. Para ello, podemos delimitar la salida de la función hipótesis a un intervalo  $[0-1]$  donde 0 significa que no hay ninguna probabilidad de pertenecer a esta clase mientras que 1 significa que existe una probabilidad de pertenecer del 100%. No obstante, mediante este tipo de regresión también se puede determinar simplemente si pertenecerá a un tipo de clase o no.

Algunos ejemplos donde podemos aplicar esta regresión serían para comprobar si un paciente está sano o enfermo, para determinar la probabilidad de un equipo de ascender o para predecir la tendencia de los mercados de valores.

### **4.3.1. CLASIFICACIÓN MULTICLASE**

La clasificación multiclase es un tipo de regresión logística donde la clasificación no solo se realiza para dos grupos o estados sino para varios. Por ejemplo, en el caso de la medicina ya no consistiría en predecir si un paciente está enfermo o sano sino si se encuentra sano, resfriado o con gripe.

Para realizar esta clasificación se aplica la técnica de uno contra todos. La metodología empleada es la siguiente: [8]

- 1) Se selecciona un estado como caso positivo ( $y = 1$ ) y se ponen los demás estados como negativos ( $y = 0$ ).
- 2) Se halla la probabilidad que tiene el ejemplo a clasificar de pertenecer a la clase que hemos seleccionado positiva.
- 3) Se elige otra clase como positiva poniendo las demás como negativas, tal como realizamos en el paso 1.
- 4) Se halla la probabilidad que tiene el ejemplo a clasificar de pertenecer a la nueva clase positiva.
- 5) Realizamos los pasos 3 y 4 hasta que tengamos hallada la probabilidad de pertenecer a cada una de las posibles clases.
- 6) Finalmente clasificamos el ejemplo en la clase que mayor probabilidad tenga de pertenecer.

#### 4.4. MÉTODOS DE REGULARIZACIÓN

En el presente trabajo utilizaremos las técnicas de regularización cuya finalidad es evitar que se produzca la aparición de un problema denominado sobreajuste. Este se produce cuando la función hipótesis o el clasificador que nos permitirá predecir resultados futuros se ajusta perfectamente a los datos de entrenamiento. Sin embargo, a pesar de esto, no tiene por qué realizar una predicción adecuada en el futuro. Lo observamos mejor en el siguiente gráfico:

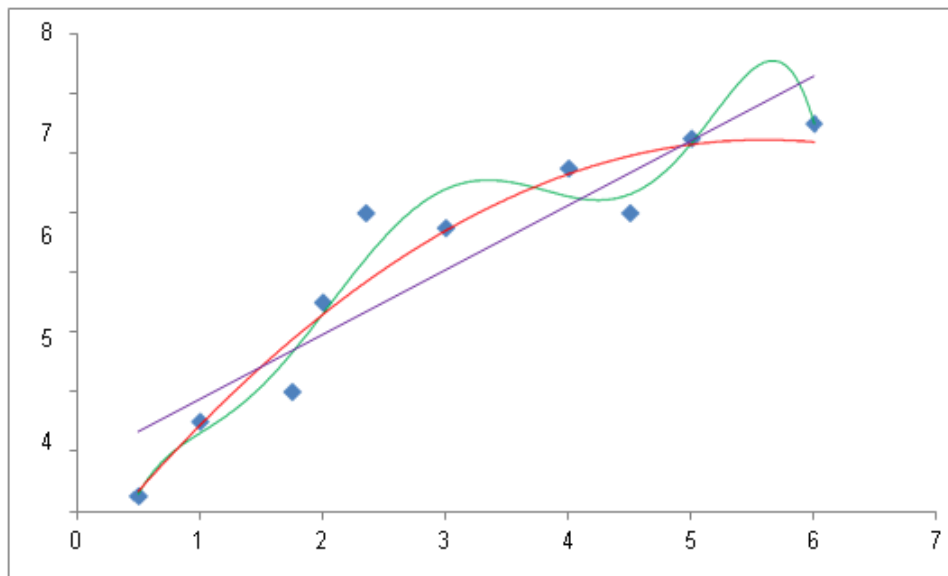


Figura 27: Ejemplo del sobreajuste. [8]

Podemos ver tres ajustes diferenciados:

- En morado el ajuste se ha realizado mediante una regresión lineal. Podemos ver como el modelo en el futuro no realizará buenas predicciones. Esto se debe a que la función hipótesis es demasiado simple y se está produciendo una falta de ajuste.

- En verde el modelo se ha ajustado mediante una regresión polinómica de grado 6. El efecto que se produce es justo el contrario que con la regresión lineal pues existe un sobreajuste claro y por tanto tampoco se producirán buenas predicciones en el futuro.

- Por último, en rojo podemos ver una función polinómica, pero de grado dos. Esta presenta unas mejores predicciones que las anteriores. Para obtener este tipo de función es habitual utilizar los métodos de regularización los cuales se presentan en los puntos siguientes.

Hay que destacar que cuando intentamos explicar la relación entre variables, independientemente del método que utilicemos, casi siempre se producirá un error que denominamos *bias* el cual solamente depende del modelo que utilizamos para definir la relación entre las variables, así como de los datos de entrenamiento que utilicemos. Igualmente, este factor debemos considerarlo dado que el que determinará la fiabilidad y precisión de nuestro modelo. [15]

A continuación explicamos los diferentes métodos de regularización [16]:

#### 4.4.1. RIDGE REGRESSION

La técnica empleada por el método de regularización Ridge es similar al ajuste por mínimos cuadrados siendo la principal diferencia el hecho de que este método incorpora un término de penalización. La finalidad de este término es forzar a los coeficientes a tender a cero para simplificar el modelo.

Los coeficientes que estimamos con Ridge son aquellos valores que minimizan:

$$\beta^{ridge} = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j X_{ij})^2 + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2$$

Donde  $\lambda$  es el parámetro encargado de penalizar el modelo. Cuando  $\lambda = 0$  estaremos en el caso particular de mínimos cuadrados.

Tras haber realizado la estimación de los coeficientes se procederá a seleccionar el  $\lambda$  más adecuado con el objetivo de minimizar la estimación del error de predicción esperado. Para determinar dicho parámetro, utilizaremos el método de validación cruzada que explicamos en el apartado 4.5.

Como principal ventaja sobre el ajuste por mínimos cuadrados destacamos el hecho de que se reduce la varianza.

Por otro lado, su principal inconveniente es que, a pesar de contraer los coeficientes a cero, no conseguir eliminar ninguno de ellos por lo que no se producirá una selección de variables al tener el modelo todas ellas. Este inconveniente tiene especial importancia cuando existe un número muy elevado de  $p$  variables explicativas. Para solventar este problema, se desarrolló un nuevo método (*Lasso*) que se explica a continuación.

#### 4.4.2. LASSO – LEAST ABSOLUTE SHRINKAGE AND SELECTION OPERATOR

En el presente TFG implementaremos esta técnica como método de regularización en R.

Lasso es una técnica de regresión lineal regularizada, como Ridge, pero con diferencias significativas en la penalización que provocan que sea una de las técnicas más utilizadas en este ámbito.

Mientras que en Ridge el parámetro adicional penaliza los parámetros de mayor grado, pero nunca llega a hacerles cero, en la regularización Lasso esto sí que ocurre por lo que obtendremos un modelo más simplificado. Esto provoca que no solo realice la selección de predictores adecuados, sino que reduzca la varianza del modelo.

Así pues, Lasso se basa en la siguiente función:

$$\beta^{Lasso} = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j X_{ij})^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j|$$

Tras aplicar *Lasso* faltaría aún detectar el mejor valor del parámetro lambda mediante validación cruzada.

No obstante, el hecho de realizar una selección de variables y el encogimiento de la función hipótesis hace que sea más inestable que Ridge.



A pesar de las ventajas que nos proporciona esta técnica, también presenta defectos que es necesario conocer:

- Si unos conjuntos de variables presentan correlaciones por parejas, Lasso tenderá a coger una de esas variables sin importar si es la más explicativa de todas ellas.

- Cuando  $n > p$ , y exista una alta correlación entre los predictores, Lasso tenderá a escoger una predicción más defectuosa que el método Ridge.

Cabe destacar que la precisión del modelo obtenido mediante Lasso depende del valor de  $\lambda$  que utilizemos ya que determina el nivel de penalización

### 4.4.3. ELASTIC NET

Elastic Net surge para solventar el problema de inestabilidad que presenta Lasso al realizar simultáneamente un encogimiento y una selección de variables. Con esta técnica se supera uno de los principales defectos de Lasso a que permite seleccionar un conjunto de variables correlacionadas.

A continuación, se define el criterio Elastic Net simple:

$$\beta^{ElasticNet} = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j X_{ij})^2 + \lambda_1 \sum_{j=1}^p \beta_j^2 + \lambda_2 \sum_{j=1}^p |\beta_j|$$

Si consideramos que  $\alpha = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$  tendremos un nuevo parámetro. Si  $\alpha = 0$ , estaremos utilizando la regresión Ridge mientras que si  $\alpha = 1$  utilizaremos la regresión Lasso.

## 4.5. VALIDACIÓN CRUZADA

Una vez que hemos seleccionado las variables adecuadas, generado el modelo y comprobado que se cumplen las condiciones del método de ajuste empleado, a continuación, deberemos evaluar la bondad del modelo para predecir la variable respuesta.

Para evaluar el modelo nos basaremos en dos tipos de errores:

- *Training Error rate*: Es el error promedio que se produce en el modelo cuando este intenta predecir los mismos datos que se han utilizado para crear dicho modelo.

- *Test Error rate*: Es el error que comete el modelo cuando predice nuevas observaciones las cuales no estaban incluidas en los datos de entrenamiento.

Para medir el error cometido, y en el caso de que las variables sean cualitativas, utilizaremos el *mean square error (MSE)*. En caso de que las variables sean cualitativas y simplemente realicemos una clasificación, el error se mide como el número de predicciones que han sido incorrectas respecto al total de predicciones realizadas.

En nuestro caso, utilizaremos la técnica denominada como *Cross-Validation* o Validación Cruzada la cual consiste en diferentes estrategias y métodos que nos permitirán hallar el *test error rate*.

A continuación, presentamos las diferentes estrategias que podemos utilizar en la validación cruzada.

### 4.5.1. VALIDACIÓN SIMPLE

El procedimiento en el que se basa la validación simple lo explicamos a continuación mediante un ejemplo:

Suponemos que tenemos 10 observaciones y una variable respuesta y queremos definir un modelo. Para ello, definimos una serie de observaciones, por ejemplo 6, como los datos de entrenamiento. Con las 6 observaciones se genera un modelo el cual se comprueba con los datos del test que son las 4 observaciones restantes que no se han utilizado para generar el modelo y se comprueba su eficiencia.

Esta técnica utilizada sería la denominada como Validación Simple y a pesar de su simplicidad presenta dos problemas importantes: En primer lugar, el error estimado

posee una gran variabilidad dependiendo del conjunto de datos elegido como entrenamiento y del conjunto de datos elegido para validar el modelo. En segundo lugar, al elegir solamente una parte de los datos disponible disponemos de menor información para crear el modelo por lo que se suele elevar el error estimado.

#### 4.5.2. LEAVE ONE OUT CROSS-VALIDATION (LOOCV)

Este método se basa en que como datos de entrenamiento utilizará todos menos uno el cual se utilizará para realizar la validación. Así pues, el proceso se repetirá tantas veces como datos tengamos de manera que en cada iteración se excluya para validar una observación distinta. El error estimado del test será la media de todos los errores que hayamos obtenido en cada iteración.

Como ventaja de este modelo frente a la validación simple es que se reduce la aleatoriedad presente cuando escogemos al azar los datos de entrenamiento y los datos de validación. Por otro lado, la principal desventaja sería el tiempo y coste computacional pues el proceso necesita que el modelo sea ajustado y validado tantas veces como observaciones tengamos. Además, al emplear todas y cada una de las observaciones podemos caer en el problema de sobreajuste que es lo que buscamos evitar con los métodos de regularización.

#### 4.5.3. K-FOLD CROSS-VALIDATION

En nuestro caso emplearemos el siguiente método. Este proceso se caracteriza por ser también iterativo, pero con la principal diferencia que dividimos los datos en  $k$  grupos. De esta manera utilizaremos  $k-1$  grupos para realizar el entrenamiento y uno de los grupos se emplea para realizar la validación o como test. El proceso se repetirá  $k$  veces empleando un conjunto de datos distinto como test en cada iteración.

Si comparamos este método con el *LOOCV*, podemos ver como esta estrategia necesita un mayor nivel de computación para realizar todas las iteraciones necesarias, las cuales vendrán determinadas por el valor de  $k$  escogido.

Asimismo, mientras que el *LOOCV*, al utilizar  $n-1$  datos para realizar el entrenamiento, obtiene un gran ajuste del modelo y un *bias* muy bajo, es altamente probable que los datos estén correlacionados por lo que hay riesgo de sobreajuste y de varianza elevada. En el método de *k-fold CV*, al emplear  $k$  grupos para realizar el entrenamiento obtendremos mucha menos correlación y por tanto varianza al promediar el error de las estimaciones.



---

## CAPÍTULO 5: LASSO EN R

---

### 5.1. INTRODUCCIÓN A R

*R* fue desarrollado en 1993 en Nueva Zelanda por Robert Gentleman y Ross Ihaka. Ambos decidieron adoptar para este nuevo lenguaje la sintaxis del lenguaje S desarrollado por Bell Laboratories.

*R* es un entorno de programación, de distribución libre, orientado al análisis estadístico y gráfico que proporciona una amplia gama de herramientas. Debido a ser un entorno abierto y colaborativo, su versatilidad y el rendimiento que podemos obtener, *R* es una de las herramientas más utilizadas para el análisis de datos. [17]

Al tratarse de un entorno de distribución abierta, *R* se convierte en una herramienta muy interesante pues nos da la libertad de adaptarlo a nuestras necesidades en cada situación, acceder al código fuente, mejorar el programa e introducir pequeñas modificaciones y mejoras para el resto de usuarios, etc.

Como pequeño defecto de *R* se dice que, debido a su formato, consume demasiado recurso de memoria por lo que si corremos programas de gran tamaño es probable que no pueda procesarlos. No obstante, esto podría solventarse al vectorizar el código.

Igualmente, *R* consta de diversos paquetes estadísticos, la mayoría de ellos contenidos en su propio sistema como, por ejemplo: *stats*, *graphics*, *grDevices*, etc. No obstante, cabe destacar que aparte de los diversos paquetes que se encuentran en el “paquete base” de *R*, en CRAN (<https://cran.r-project.org/>) existen otros 4000 paquetes que han sido desarrollados por usuarios de todo el mundo y que están a nuestra disposición.

En el presente Trabajo Final de Grado haremos uso, principalmente, del paquete “*glmnet*” que fue desarrollado en 2008 por J. Friedman, T.Hastie, N.Simon y R. Tibshirani.

Hay que destacar que hemos hecho uso de la interfaz de *R* llamada *Rstudio* (<https://www.rstudio.com/>) para trabajar de forma más sencilla ya que, además de tener la consola de programación como *R*, disponemos de otras tres ventanas. En la

ventana superior derecha encontramos las distintas variables que hemos empleado en la programación, debajo de esta ventana podemos apreciar las distintas gráficas que se van obteniendo.

## 5.2. DESCRIPCIÓN DEL PAQUETE “GLMNET”

El paquete *glmnet* tiene como finalidad permitir realizar las regularizaciones de Ridge, Lasso o Elastic Net tanto para las regresiones lineal, logística, de Poisson y los modelos de Cox y multinomiales. Con este paquete, podemos realizar diversas predicciones a partir de los modelos obtenidos.

La función que tenemos que implementar en R es la siguiente:

```
glmnet (x, y, family = c("gaussian", "binomial", "Poisson", "multinomial", "cox",  
                        "mgussian), weights, offset, alpha,, nlambda, ...)
```

Donde:

x	es la matriz de entrada
y	es la variable respuesta
family	es el tipo de respuesta.
Weights	es el peso de cada variable. Por defecto es 1.
Offset	Vector incluido en la predicción. Por defecto es NULL.
Alpha	Parámetro que determina el método de penalización 0 – Ridge, 1 – Lasso. Entre 0 y 1 – Elastic Net.
Nlambda	El número de valores de lambda. Por defecto es 100.

En este paquete se optimiza la siguiente fórmula:

$$|y - X\beta|^2 + \lambda * \left[ \frac{1 - \alpha}{2} |\beta|^2 + \alpha |\beta| \right]$$

Por lo que para  $\alpha = 0$ , la función coincidiría con la función de la regresión Ridge y con  $\alpha = 1$  coincide con la de Lasso.

Otra función interesante en este paquete es la función *plot* la cual nos permite dibujar un gráfico de la trayectoria de los coeficientes cuando se ajusta mediante la función *glmnet*.

Un ejemplo del gráfico que obtendríamos sería el siguiente:

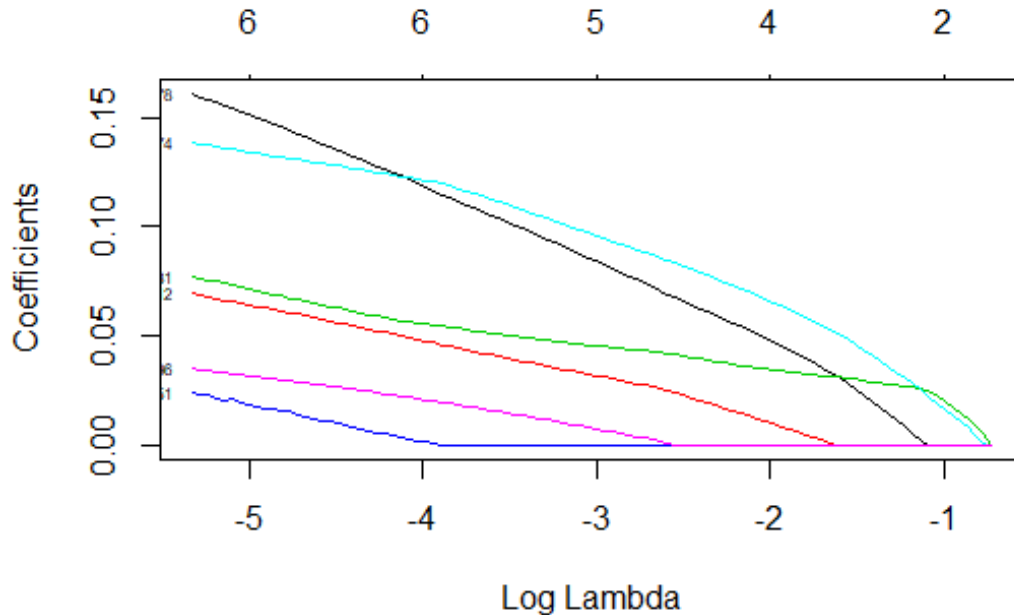


Figura 28: Plot correspondiente al análisis E0 vs E1 en la alimentación AB1 con nivel de carga alto.

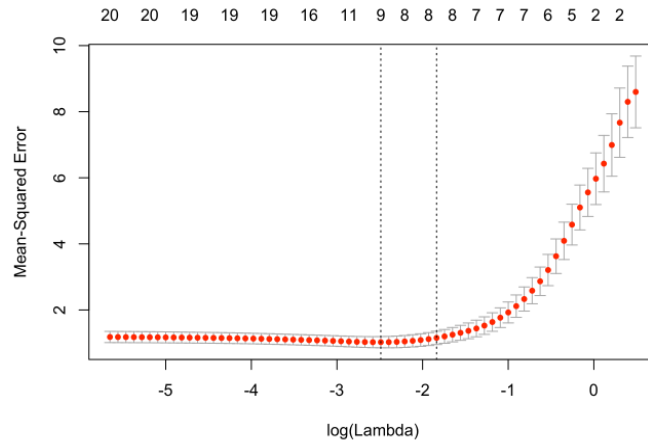
Otra función que me gustaría destacar de este paquete es la función *cv.glmnet* que realiza de manera automática la validación cruzada para determinar la capacidad de nuestro modelo.

*Cv.glmnet* (*x,y, weights, offset, lambda,.....*)

Donde:

- X es la matriz utilizada en el *glmnet*
- Y es la variable respuesta como en el *glmnet*
- Weights Es el peso de las observaciones. Por defecto es 1.
- Offset Igual que en la función *glmnet*
- Lambda Por defecto es NULL y es elegido por *glmnet*.

Si utilizásemos la función *plot* con una función del tipo *cv.glmnet* obtendríamos un gráfico como este:



**Figura 29:** Representación de la curva de validación cruzada (puntos rojos) así como las desviaciones estándar a lo largo de la secuencia de valores de lambda. [18]

Las funciones anteriormente nombradas no son las únicas que están presentes en el paquete *glmnet* pero si son las que principalmente hemos utilizado en el presente TFG.

Podemos destacar otras como *predict.cv* que su objetivo es, mediante el modelo ajustado anteriormente y con la lambda óptima, realizar predicciones de un modelo de validación cruzada.

La función que se implementaría en R es la siguiente:

*Predict (objetc, newx, s, ....)*

Donde:

- Object      Hace referencia al objeto *cv.glmnet*
- Newx        Es la matriz de valores de x sobre la que se harán las predicciones.
- S            Valor del parámetro lambda.



---

## CAPÍTULO 6: ANÁLISIS Y RESULTADOS

---

### 6.1. CONJUNTO DE DATOS Y FILTRADO DEL MISMO

Antes de entrar en detalle sobre los diferentes análisis realizados es necesario comprender los pasos dados previamente.

En primer lugar, tras la obtención de los datos del motor por parte del departamento de Ingeniería Eléctrica se cambió el formato y presentación de estos para mejorar su manejo. Lo que se realizó simplemente fue una trasposición de filas y columnas de tal manera que las variables de interés estuvieran en las columnas y la respuesta se convirtiera en las diferentes filas. El cambio de formato se refiere a la definición de las variables utilizadas en el presente TFG. Para ello definimos como primer número el orden del armónico, y el segundo se refería a la banda. Si la banda era positiva se separaron mediante un punto. Si la banda era negativa se separaron mediante barra baja. Asimismo, dado que los datos se encontraban separados en diferentes Excel, se agruparon todos ellos en una misma hoja de cálculo para facilitar su manipulación.

A continuación, y tras hablarlo con los profesores de ingeniería eléctrica, se decidió que el análisis estadístico se realizará para el conjunto de datos obtenido con el nivel NC2 el cual hace referencia a la utilización del motor a plena carga. Cabe recordar como explicamos en el apartado 3.3.1 que la experimentación eléctrica se realizó no solo para un nivel de carga alto (NC2) sino también para un nivel de carga bajo (NC1). No obstante, nosotros realizamos los análisis para NC2 pues la gran parte de los motores de inducción se utilizan a plena carga y es muy poco habitual ver motores con un nivel de carga bajo ya que no estaríamos aprovechando la potencia que nos ofrece el motor.

Tras este primer filtrado observamos que en el conjunto de datos existían valores denominados -200 y -500. Estos valores hacían referencia a casos en los que en la experimentación se produjo un error de medida debido a la presencia de ruido en la experimentación por lo que era necesario eliminarlos del conjunto de datos. Hay que destacar que en el conjunto original también existían valores igual a cero. Estos valores estaban presentes porque se confundían con el armónico principal y por lo tanto era necesario eliminarlos para el análisis estadística. Sin embargo, tras realizar la eliminación del nivel de carga bajo, prácticamente todos los valores que eran cero desaparecieron del conjunto. En el caso de que siguiesen presentes, eliminamos

aquellas filas donde su aparición era recurrente para diferentes variables. Finalmente observamos que tras los diversos filtrados de datos existían *outliers* o puntos extraños que causaban bastante inestabilidad por lo que haciendo uso de los valores que consideramos correctos aplicamos el método de interpolación lineal para obtener aquellos que eran *outliers*.

## 6.2. INTRODUCCIÓN A LOS ANÁLISIS

Tras la obtención del conjunto de datos adecuado decidimos realizar dos tipos de análisis:

En primer lugar, realizamos una **regresión logística binaria**. Este tipo de regresión se basa en lo siguiente:

- La variable respuesta es una variable que solo tiene dos categorías (variable *dummy*). Un ejemplo sería cuando queremos detectar si un paciente está sano o enfermo en medicina o si un alumno aprueba o suspende en función de unas determinadas variables.
- Su objetivo es predecir la probabilidad de que algo ocurre frente a la probabilidad de que no ocurra.

En nuestro caso compararemos para los diferentes variadores el estado del motor sano (E0) contra el resto de los estados (E1, E2, E3 y E4). Estas comparaciones se realizaron en un primer momento para todas y cada una de las variables definidas por las frecuencias características de fallo. A pesar de que el número de variables era muy elevado (~ 808 variables) los resultados eran muy interesantes pues quedaban modelos sencillos y con un porcentaje de clasificación elevado. Seguidamente, repetimos los mismos análisis, pero para cada una de las frecuencias características por separado. El objetivo era observar si era necesario tener todo el conjunto de variables para determinar el estado del motor. O bien, si con un conjunto de variables (BFTF, BPF1, BPF0, BSF) era suficiente.

El otro análisis que realizamos era el de **regresión logística multinomial**. Nuestro objetivo era comparar para cada variador y para cada conjunto de variables (completo, solo con BFTF, solo con BPF1, solo con BPF0 y solo con BSF) si el modelo es capaz de realizar una clasificación multiclase lo suficientemente buena en comparación con la obtenida mediante la regresión logística binaria.

Cabe destacar la importancia de la bondad de los modelos obtenidos el cual, en nuestro caso, es un porcentaje sobre los casos correctamente clasificados por nuestro modelo. Basándonos en la regresión obtenida, así como los datos observados, el modelo realizará una predicción de la variable respuesta que será el valor pronóstico. Este valor se comparará con el observado y en caso de que acierte,

será correctamente clasificado. Cuando más casos se clasifiquen correctamente, mejor será el modelo definido. [19]

A continuación, explicamos en profundidad los análisis realizados para el variador **AB1**. El resto de los variadores y análisis se encontrarán en el anexo, así como los diferentes códigos de programación empleados.

### 6.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO AB1

El procedimiento general es el mismo para todas y cada una de las comparaciones y análisis realizados. El código de programación se encontrará en el anexo A.

- Primeramente, definimos dos matrices X e Y en donde agrupamos las variables explicativas y la variable dependiente o respuesta respectivamente.
- Seguidamente, utilizamos la función *glmnet* del paquete de R con el mismo nombre la cual nos permite definir el tipo de regresión (binaria o multinomial) así como la técnica de regularización empleada (en nuestro caso, LASSO)
- A continuación, utilizamos la función *cv.glmnet* la cual implementa automáticamente una validación cruzada y nos devuelve un valor de lambda.
- Tras obtener el modelo y observar que variables lo define, realizamos dos clasificaciones:
  - o 1- Una clasificación aparente que nos permite comprobar la bondad del modelo utilizando como datos de entrenamiento los mismos que le hemos suministrado para generar el modelo. Esta clasificación nos otorgará una primera idea sobre el modelo, no obstante, es necesario hacer otra clasificación.
  - o 2- Clasificación mediante validación cruzada. El porcentaje de clasificación que nos otorga la validación cruzada sí será definitivo, junto con el número de coeficientes del modelo, para tomar una decisión acerca de su idoneidad. Esta clasificación se realiza definiendo, por un lado, unos datos de entrenamiento (en nuestro caso representan el 75 % de los datos totales) los cuales utilizaremos para definir el modelo y por otro, el 25 % restante se utilizarán como test para comprobar el porcentaje de clasificación. Como explicamos en el apartado 4.8.3, el método K-fold el cual es un proceso iterativo nos permite realizar esta clasificación tantas veces como lo hayamos

programado (100, en nuestro caso) y en cada una de las iteraciones los datos de entrenamiento y de test varían. De esta manera, el porcentaje de clasificación obtenido es la media de cada uno de los porcentajes de las cien iteraciones.

### 6.3.1. ANÁLISIS COMPLETO

Inicialmente realizamos el análisis con todas las variables definidas por las cuatro frecuencias características de fallo: BFTF, BPF1, BPFO, y BSF. Cabe recordar que las variables vienen determinadas según el orden del armónico y la banda.

#### 6.3.1.1. E0 vs E1

En esta primera comparación binaria, el primer *plot* interesante que obtenemos es el siguiente:

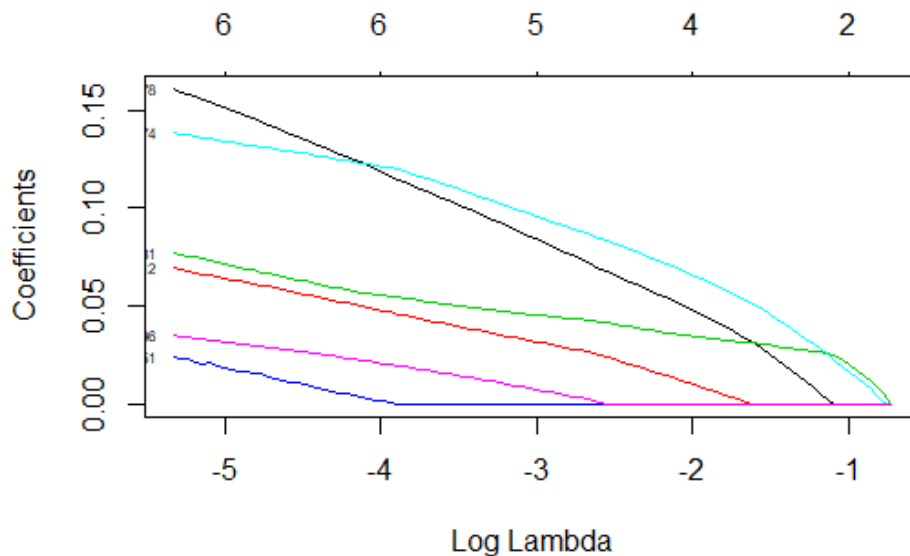
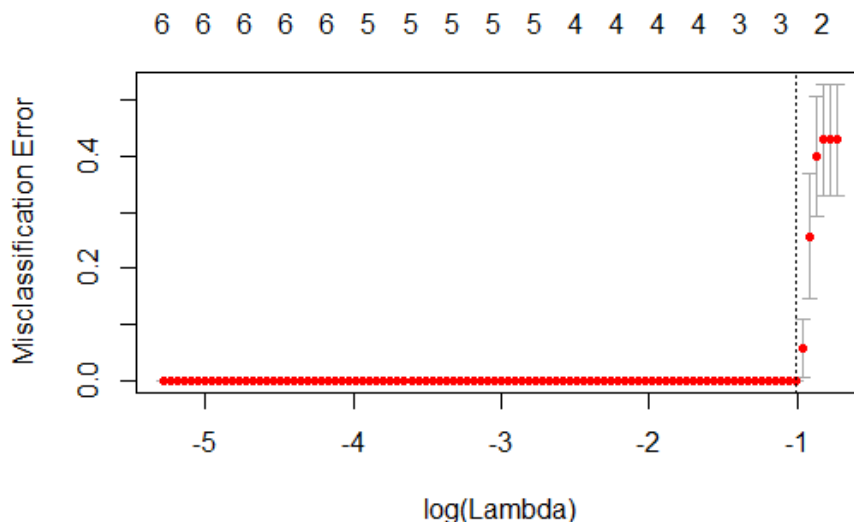


Figura 30: Plot resultante del análisis de AB1-NC2-E0vsE1

La principal ventaja que nos ofrece este *plot* es que podemos hacernos una primera idea de, no solo el número de coeficientes que pueden que estén presentes en el modelo, sino también el coeficiente que sería. El número de coeficientes dependerá del valor lambda que nos otorgué el programa el cual se habrá obtenido por validación cruzada y será el obtenido para minimizar el error.

Concretando, podemos observar el número de coeficientes que obtendremos en el modelo en función de la lambda que elijamos, así como el error de clasificación si utilizásemos ese modelo resultante. Esto lo podemos ver en el siguiente *plot*:



*Figura 31: Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE1*

En este caso concreto el resultado sería un modelo con un número de variables explicativas comprendido entre 2-3 y un error de clasificación muy bajo. Esta conclusión inicial es muy interesante pues pasaríamos de un gran número de variables (~ 808) a solo necesitar 2-3 para saber en qué estado clasificar el motor.

A pesar de estas primeras impresiones en los que los resultados son interesantes, es necesario comprobar tanto la clasificación aparente que realizaría el modelo con tan pocos coeficientes como la clasificación mediante validación cruzada la cual nos proporcionará una idea sobre la bondad del modelo.

En este caso, la clasificación aparente es del 100 % mientras que la clasificación por validación cruzada es del 99,88889 % lo cual nos permite afirmar que el modelo obtenido es correcto.

Las variables que hemos obtenido significativas en este modelo son las siguientes:

BSF		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
2	+10	2.10
4	+10	4.10

*Tabla 13: Variables del modelo del análisis completo para la regresión binaria*

### 6.3.1.2. E0 vs E1 vs E2 vs E3 vs E4

En esta primera regresión multiclase obtenemos los siguientes gráficos:

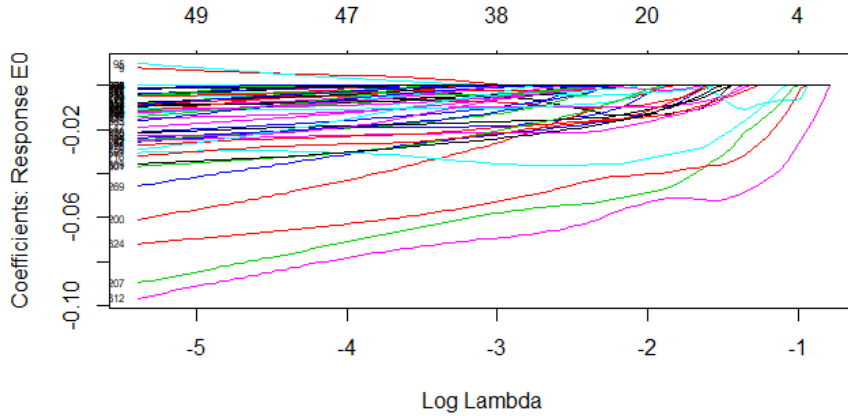


Figura 32: Plot resultante del análisis multiclase AB1-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

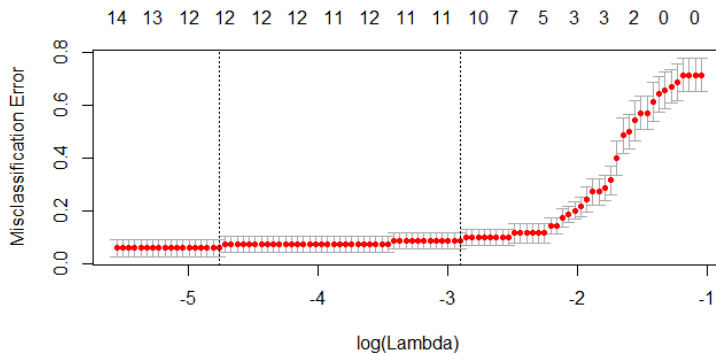


Figura 33: Plot resultante del análisis multiclase AB1-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

En primer lugar debemos explicar a que el *Coefficients Response E0* es la clase referencia con la que se han realizado los análisis en la regresión multiclase. Hemos preestablecido que la referencia sea E0 pues corresponde a cuando el rodamiento se encuentra completamente sano. Esto se ha aplicado para el resto de análisis.

Observando el primer gráfico podemos detectar como la mayoría de las variables serán negativas en el modelo. Esto ocurre debido a que al elegir como clase de referencia E0 que es la que tiene picos más altos por lo que se debe sumar un valor negativo (que corresponderá a los coeficientes negativos que proporciona el modelo) para rebajar los picos de las otras clases.

Las variables que hemos obtenido significativas en este modelo son las siguientes:

<b>BFTF</b>		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
1	+1	1.1
2	+3	2.3
4	-4	4_4
<b>BPFI</b>		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
3	+6	3.6
8	-10	8_10
<b>BPFO</b>		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
1	+10	1.10
3	+11	3.11
5	-11	5_11
7	-11	7_11
7	+11	7.11
10	+4	10.4
<b>BSF</b>		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
1	+10	1.10
2	-2	2_2
2	+2	2.2
4	+5	4.5

*Figura 34: Variables del modelo del análisis completo para la regresión multiclase*

En este caso, obtendríamos un modelo más complejo que en la comparación binaria E0vsE1 con un porcentaje de clasificación aparente del 100 % y con un porcentaje de clasificación mediante validación cruzada del 91,11 % lo que representaría una gran ventaja pues con un simple análisis podríamos predecir cualquiera de los estados del rodamiento y, por lo tanto, del motor eléctrico.

### 6.3.2. ANÁLISIS BFTF

Tras haber realizado el análisis con todas las variables, nos centraremos en el análisis con solo las variables definidas por la frecuencia característica de fallo en la jaula del rodamiento -BFTF-

#### 6.3.2.1. E0 vs E1

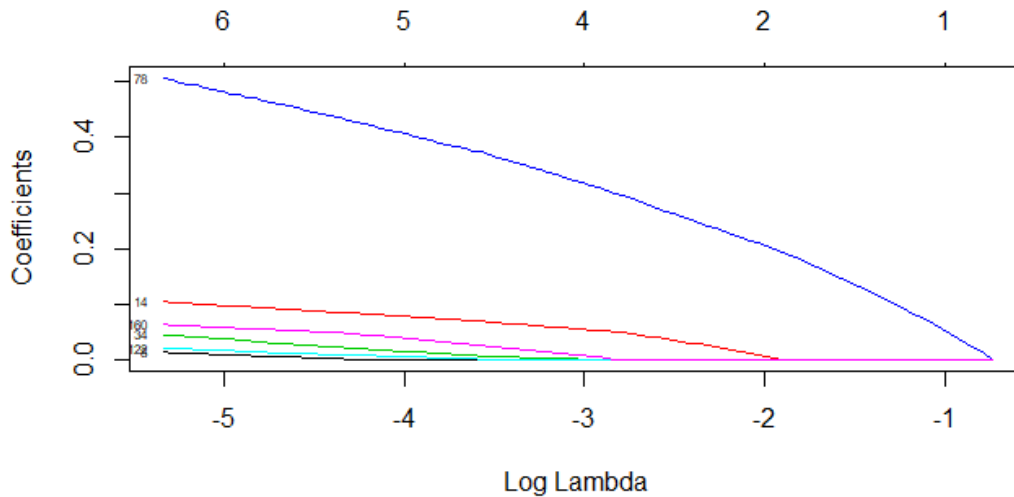


Figura 35: Plot correspondiente al análisis AB1-BFTF-E0vsE1

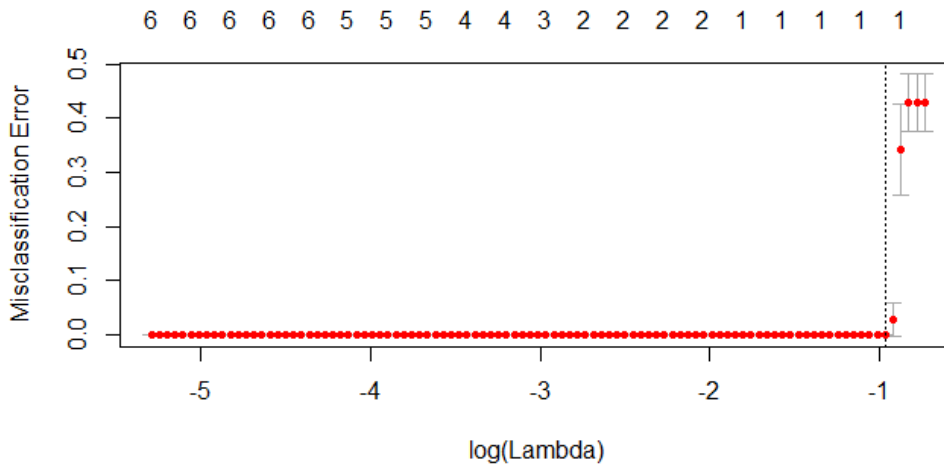


Figura 36: Plot correspondiente al análisis de AB1-BFTF-E0vsE1

En la primera gráfica podemos observar como el número de variables que pueden ser significativas es bastante similar o incluso inferior al obtenido al realizar el análisis completo.

Esto lo podemos confirmar en el segundo gráfico donde vemos que con un solo coeficiente podemos obtener un modelo. No obstante, debemos comprobar que la



bondad del modelo sigue siendo lo suficientemente buena como para decantarnos por un análisis con BFTF en vez de un análisis completo.

En este caso, la clasificación aparente sale igual que en el análisis completo, 100 % mientras que la clasificación con validación cruzada sale 98,66667 % lo cual es un punto inferior al análisis completo, pero, evidentemente, hay que tener en cuenta la simplicidad de realizar los análisis con solo el conjunto de variables BFTF por lo que en esta primera comparación podemos ver que tal vez los análisis completos no sean lo más idóneo en cuanto a tiempo y resultados. Esto lo debemos confirmar o desmentir con los siguientes análisis con solo un conjunto de variables.

Las variables resultantes son las siguientes:

BFTF		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
4	+7	4.7

Tabla 14: Variables del modelo del análisis BFTF para la regresión binaria.

### 6.3.2.2. E0 vs E1 vs E2 vs E3 vs E4

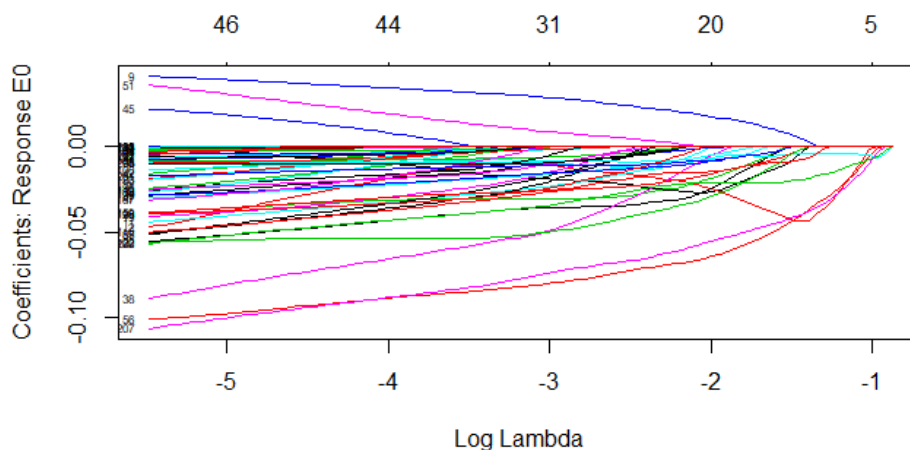


Figura 37: Plot resultante del análisis multiclase AB1-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

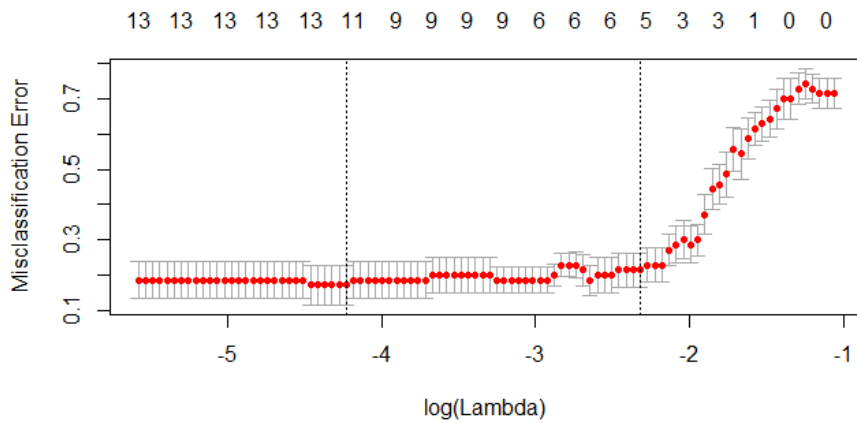


Figura 38: Plot resultante del análisis multiclase AB1-BTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

Las variables resultantes de la regresión multinomial son las siguientes:

BTF		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
1	-1	1_1
1	+1	1.1
2	+3	2.3
4	-5	4_5
4	+7	4.7
8	+4	8.4
10	+3	10.3
10	-4	10_4

Tabla 15: Variables del modelo del análisis BTF para la regresión multiclase

Si observásemos los porcentajes de clasificación aparente y el de clasificación mediante validación cruzada podemos ver como siguen siendo bastante altos (100 % y 80,72% respectivamente) por lo que puede ser interesante elegir esta opción (analizar solo con las variables BTF) frente a realizar el análisis completo ya que no solo obtenemos buenos porcentajes de clasificación, sino que el modelo que obtendríamos es bastante más sencillo.

### 6.3.3. ANÁLISIS BPF

A continuación, explicamos los resultados obtenidos para los análisis realizados solo con las variables definidas por la frecuencia característica de fallo en la pista interna del rodamiento -BPF-

### 6.3.3.1. E0 vs E1

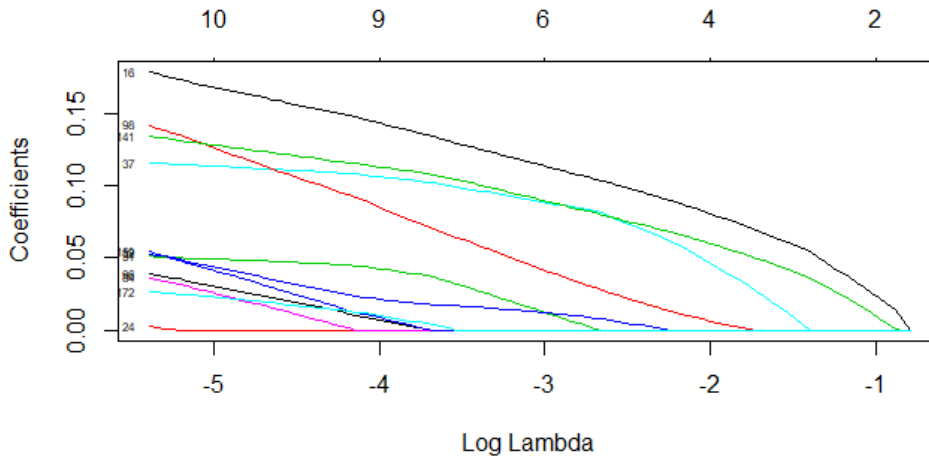


Figura 39: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE1

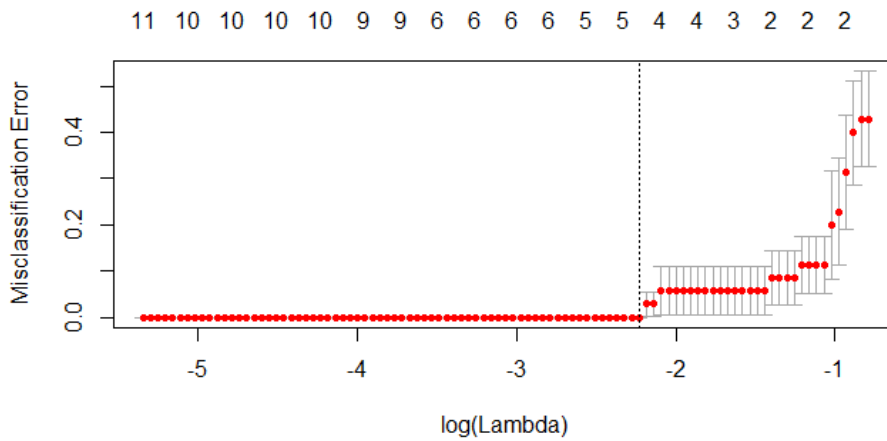


Figura 40: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE1

En la primera gráfica observamos como el número de coeficientes puede que se haya incrementado respecto al análisis BFTF y sea similar al análisis completo. Para cerciorarnos del número de variables observamos la segunda gráfica donde observamos que para ese determinado valor de lambda obtendremos un modelo entre 4-5 variables.

Si comprobamos los porcentajes de clasificación aparente y el obtenido mediante validación cruzada vemos que ambos son bastante altos (100 y 94.66667 %, respectivamente) por lo que puede ser interesante decantarse por esta opción en vez del análisis completo. No obstante, si entrase en juego las variables BFTF elegiríamos ese análisis pues nos da porcentajes más elevados y el modelo es más sencillo.

Las variables resultantes son las siguientes:

BPFI		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
2	+2	2.2
3	+6	3.6
6	-10	6_10
8	-10	8_10

Tabla 16: Variables del modelo del análisis BPFI

### 6.3.3.2. E0 vs E1 vs E2 vs E3 vs E4

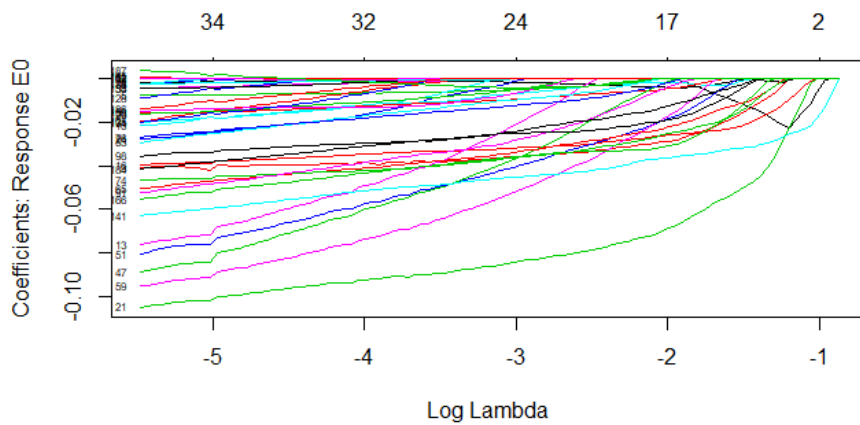


Figura 41: Plot resultante del análisis multiclase AB1-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

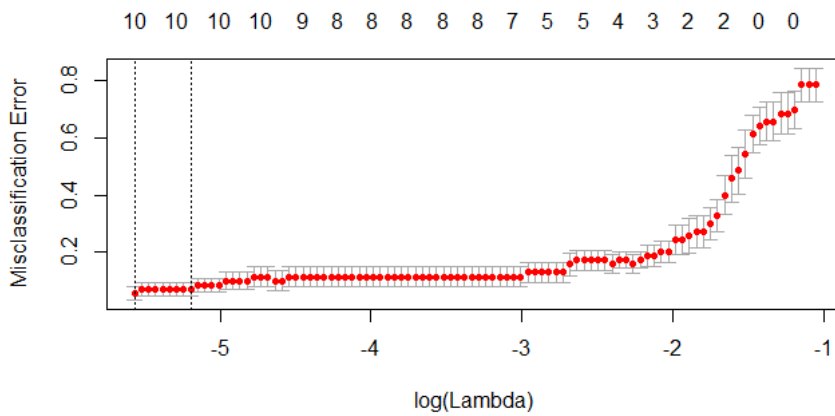


Figura 42: Plot resultante del análisis multiclase AB1-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

Las variables resultantes de la regresión multinomial son las siguientes:

BPFI		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
1	+3	1.3
3	+3	3.3
3	+6	3.6
4	+3	4.3
5	+6	5.6
6	-9	6_9
7	+7	7.7
8	-10	8_10
10	-9	10_9
10	-10	10_10

Figura 43: Variables del modelo del análisis BPFI para la regresión multiclase

Si, de nuevo que en los apartados anteriores, observamos los porcentajes de clasificación aparente (100%) y de validación cruzada(86,88%) parece evidente que, por ahora, los análisis BFTF y BPFI son más interesantes que el análisis completo pues obtenemos modelos más sencillos y la bondad del modelo es bastante elevada.

### 6.3.4. ANÁLISIS BPFO

Realizamos el mismo estudio pero solamente para las variables definidas por la frecuencia característica de fallo en la pista exterior del rodamiento-BPFO-

#### 6.3.4.1. E0 vs E1

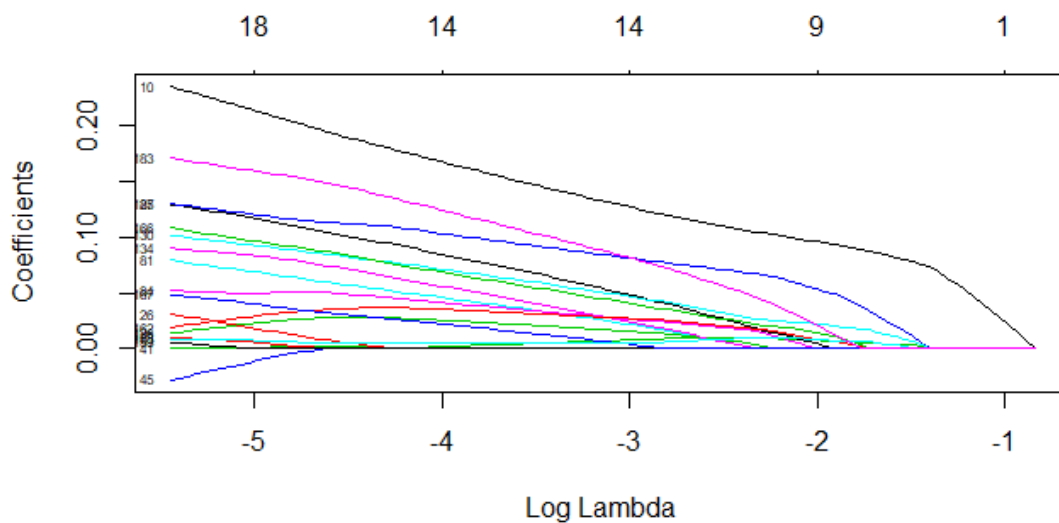


Figura 44: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE1

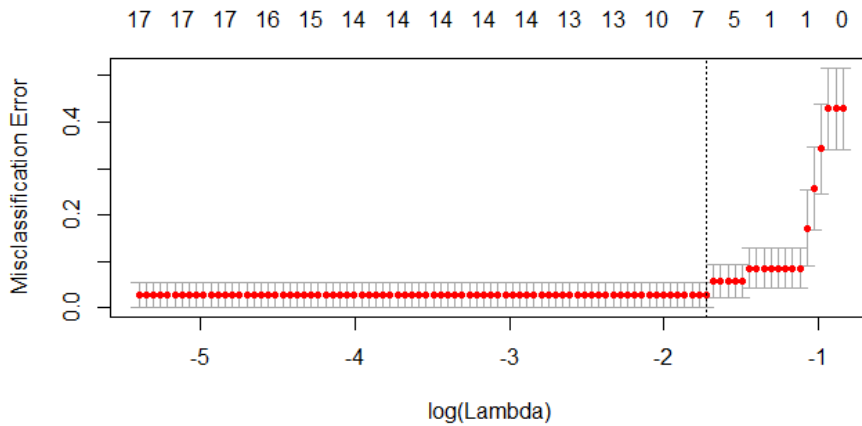


Figura 45: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE1

De observar ambos gráficos podemos concluir que se van a necesitar más variables que en el resto de análisis efectuados. Si nos detenemos a observar los porcentajes tanto de clasificación aparente como de validación cruzada llegamos a la conclusión que este conjunto de variables no es interesante para esta comparación pues el porcentaje aparente no llega al 100 % (97,14286 %) mientras que el porcentaje de validación cruzada es 93,11111 %, el cual es más pequeño que el resto de análisis. Hay que considerar que en caso de no disponer de la posibilidad de realizar los análisis con el conjunto de variables BFTF o BPFI, si sería interesante escoger el BPFO pues a pesar de que los porcentajes y número de coeficientes no mejoran al análisis completo. A esta conclusión llegamos debido a la complejidad computacional que requiere trabajar con ~809 variables y porque el error de clasificación es bastante bajo.

Las variables que definen el modelo son las siguientes:

BPFO		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
1	+10	1.10
3	+9	3.9
7	+11	7.11
8	-2	8_2
10	-2	10_2
10	+7	10.7

Tabla 17: Variables del modelo del análisis BPFO

### 6.3.4.2. E0 vs E1 vs E2 vs E3 vs E4

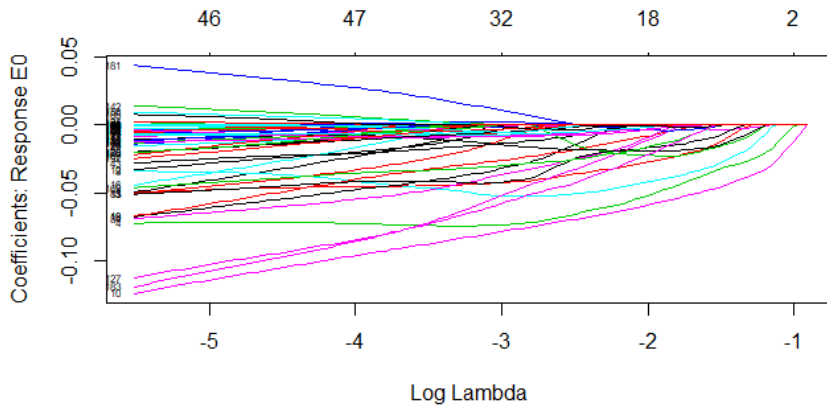


Figura 46: Plot resultante del análisis multiclase AB1-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

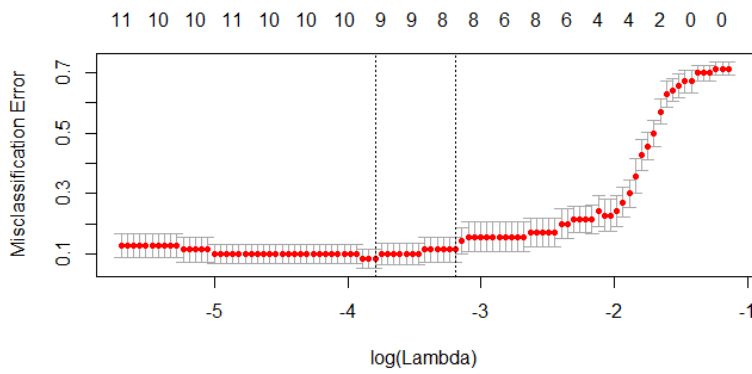


Figura 47: Plot resultante del análisis multiclase AB1-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

Las variables resultantes de la regresión multinomial son las siguientes:

BPFO		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
1	+9	1.9
1	+10	1.10
2	-2	2_2
3	+11	3.11
4	-4	4_4
5	+11	5.11
6	+9	6.9
7	-11	7_11
10	+4	10.4
11	+2	11.2

Figura 48: Variables del modelo del análisis BPFO para la regresión multiclase

Al realizar los análisis con las variables BPFO la bondad del modelo no disminuye significativamente en comparación con BTF, BPFI y mediante el análisis completo ya que sus porcentajes de clasificación aparente y validación cruzada son de 100 % y 80,44 % por lo que sería una buena alternativa al análisis completo. No obstante, a pesar de que sería una alternativa similar, es preferible utilizar cualquiera de los otros dos conjuntos de variables (BTF o BPFI) pues sus porcentajes son ligeramente superiores.

### 6.3.5. ANÁLISIS BSF

Analizamos el conjunto de variables definido por la frecuencia característica de fallo en las bolas del rodamiento –BSF–

#### 6.3.5.1. E0 vs E1

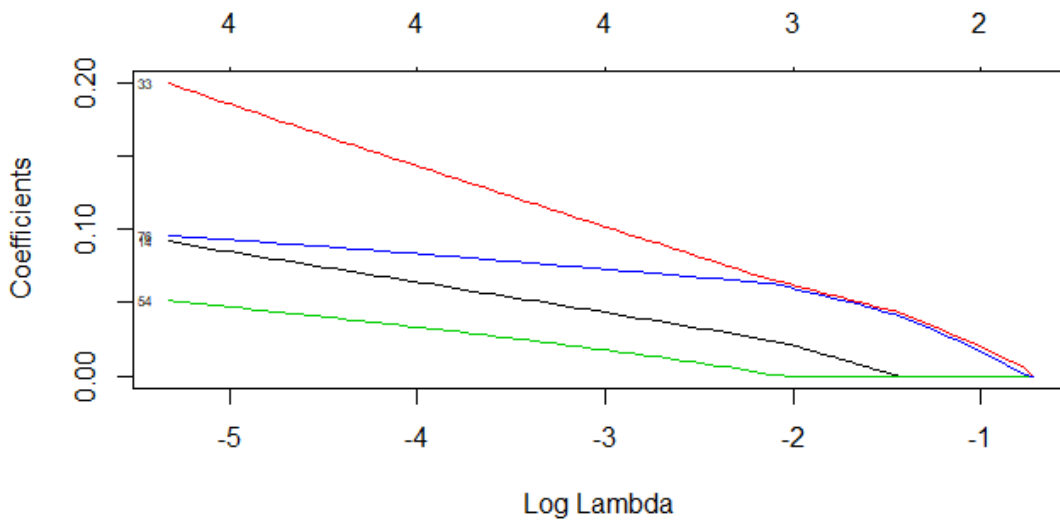


Figura 49: Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE1

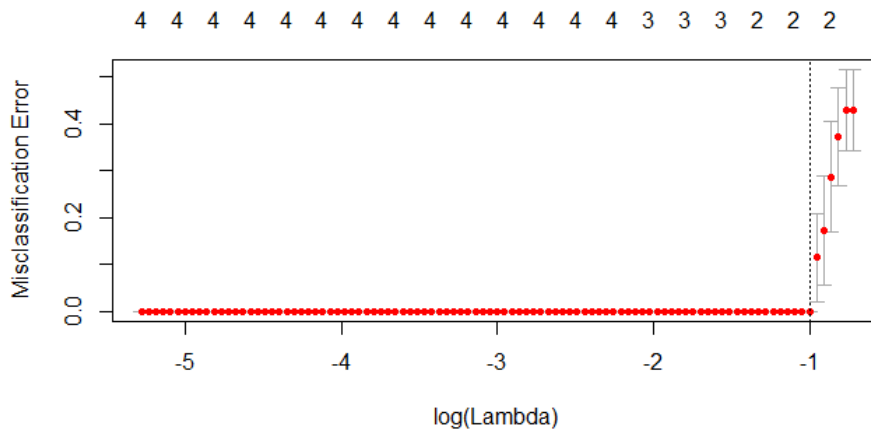


Figura 50: Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE1



Observamos como el modelo estará definido por pocas variables ( $\sim 2$ ) y sus porcentajes de clasificación aparente y de validación cruzada son 100 y 100 % respectivamente lo cual hace a este conjunto de variables muy interesante ya que es el que posee el porcentaje de validación cruzada más elevado.

Las variables que definen el modelo son:

BSF		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
2	+10	2.10
4	+10	4.10

Tabla 18: Variables del modelo del análisis BSF

### 6.3.5.2. E0 vs E1 vs E2 vs E3 vs E4

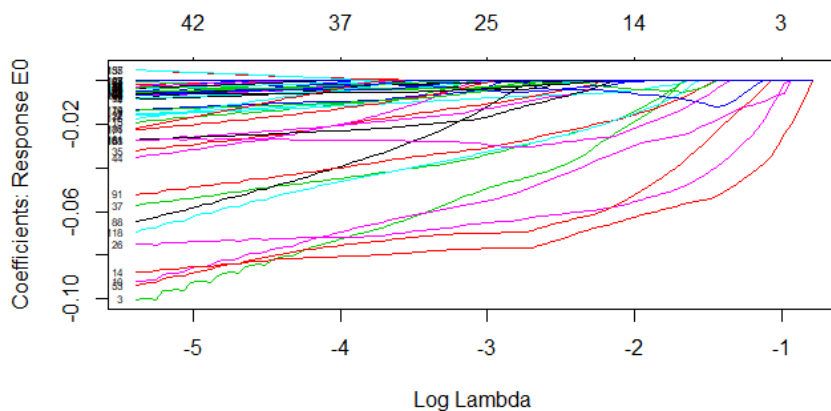


Figura 51: Plot resultante del análisis multiclase AB1-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

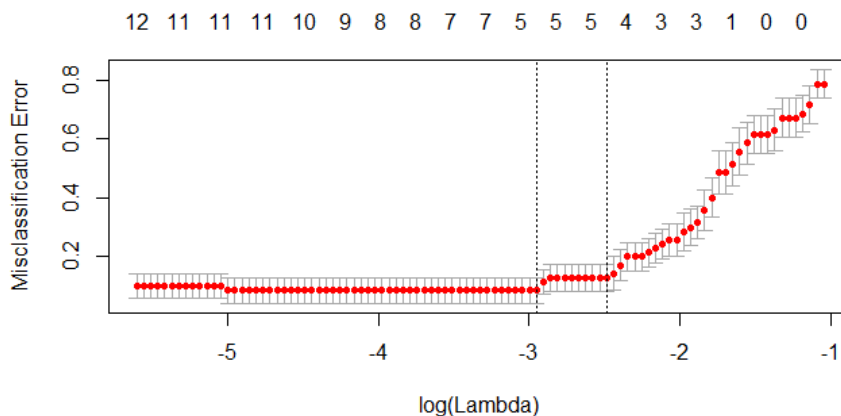


Figura 52: Plot resultante del análisis multiclase AB1-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

Las variables resultantes de la regresión multinomial son las siguientes:

BSF		
ORDEN DEL ARMÓNICO	BANDA	NOMENCLATURA EN LOS ANÁLISIS
1	+10	1.10
2	+2	2.2
4	+5	4.5
6	-5	6_5
6	-7	6_7
8	-2	8_2
8	+2	8.2
8	-5	8_5

*Tabla 19: Variables del modelo del análisis BSF para la regresión multiclase*

Si observamos el porcentaje de validación cruzada (89,44 %) podemos ver que es el mayor porcentaje de entre los conjuntos de variables por separado y, comparándolo con el análisis completo, solamente se encuentra en dos puntos porcentuales por abajo por lo que el conjunto BSF parece, a primera vista, el conjunto más interesante para realizar el análisis del variador AB1.

## 6.4. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS

Una vez finalizado el apartado 6.3 donde hemos explicado brevemente para un variador (AB1) una de las comparaciones de la regresión logística binaria (E0vsE1) así como los resultados de la regresión logística multinomial, presentamos, a continuación, tanto un conjunto de gráficos como una tabla resumen donde se podrá observar con mayor detenimiento la evolución del porcentaje de clasificación de validación cruzada así como el número de variables presentes en cada comparación y para cada variador.

### 6.4.1. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN BINARIA

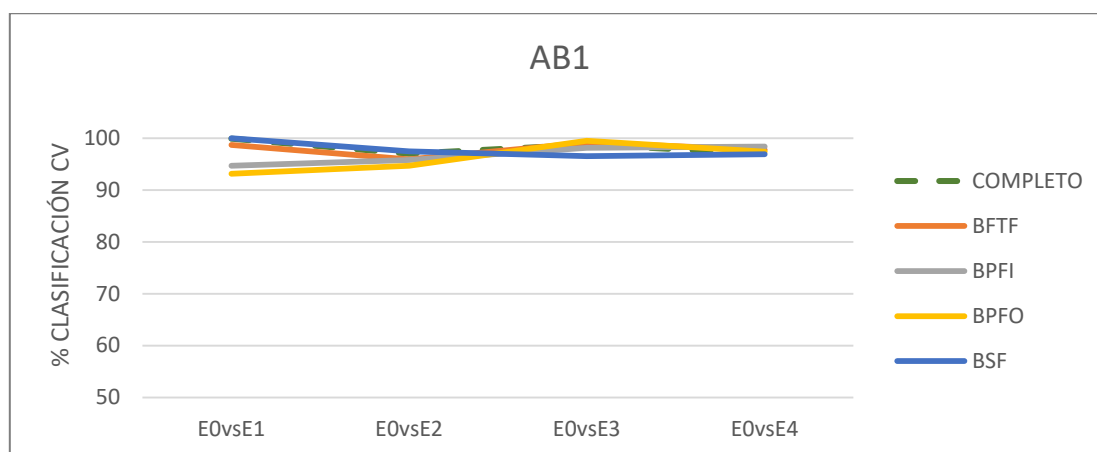


Figura 53: Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB1 en la regresión binaria

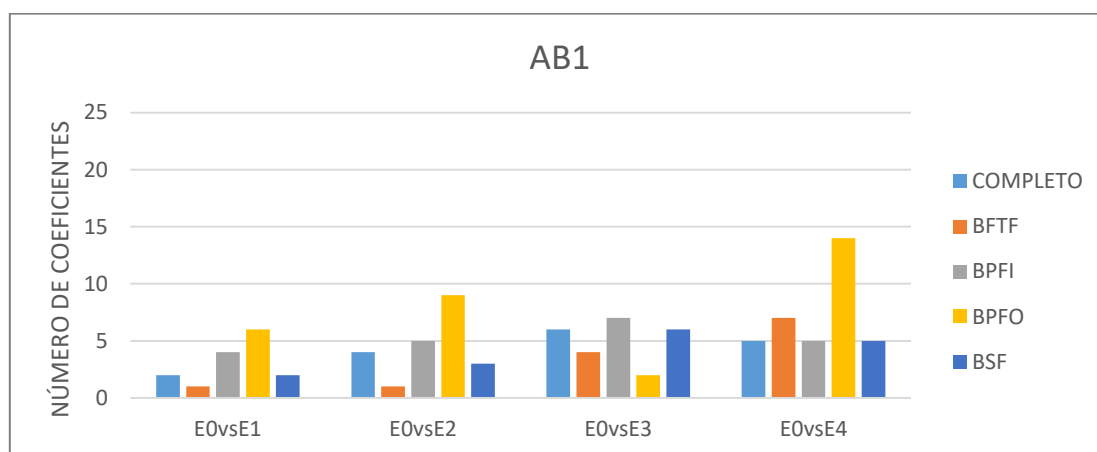


Figura 54: Número de coeficientes AB1 en la regresión binaria

En la primera gráfica podemos observar la evolución a lo largo de las distintas comparaciones binarias el valor del porcentaje de clasificación obtenido mediante validación cruzada (*Cross Validation*) mientras que en el segundo gráfico encontramos el número de coeficientes presentes en el modelo resultante para las diferentes comparaciones.

En este caso, podemos apreciar claramente cómo ningún conjunto de variables es el que domina, pues en el primer gráfico todos superan el 90 % de clasificación correcta para las diferentes comparaciones. En cuanto en el segundo gráfico, podemos ver como el número de variables siempre es inferior a 10 excepto en el caso de BPF0 para E0vsE4. Parece evidente que para AB1 no existe un conjunto de variables dominante pudiendo utilizar cualquiera de ellos.

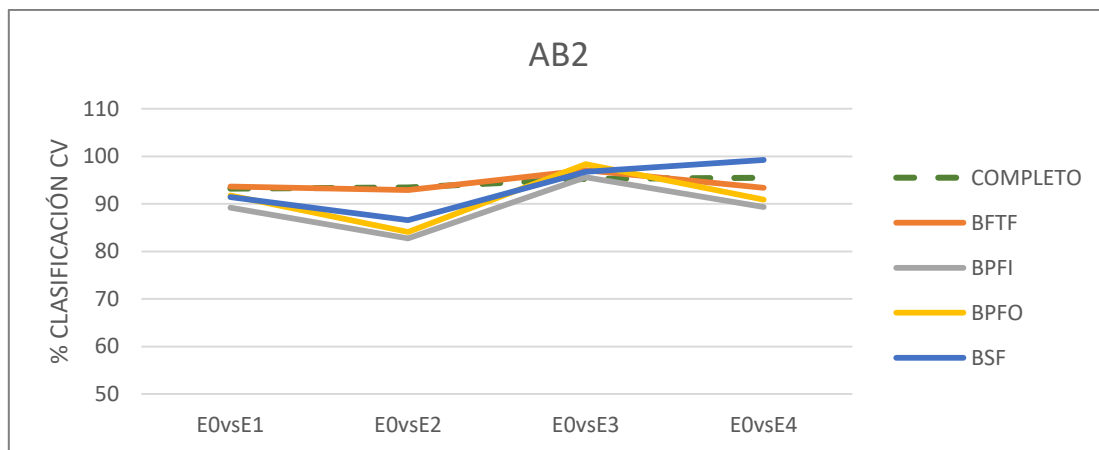


Figura 55: Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB2 en la regresión binaria

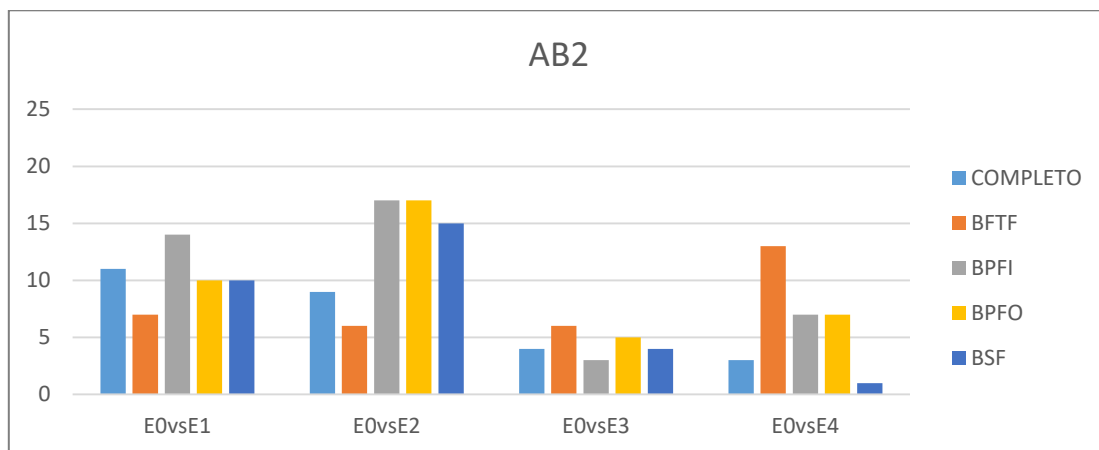


Figura 56: Número de coeficientes AB2 en la regresión binaria

Para este variador parece interesante realizar los análisis con las variables BFTF pues siempre explica más del 90% en las diferentes comparaciones siendo probablemente la más lineal junto con el análisis completo. No obstante, y como hemos mencionado anteriormente, no existen evidencias que indiquen que el análisis completo es mejor que el análisis de un conjunto de variables por lo que por eso nos decantamos por el BFTF.

Asimismo, si observamos el número de coeficientes presentes en el modelo podemos ver que nos otorga modelos sencillos, siempre inferior a 15 variables excepto para la comparación E0vsE4 lo cual tiene sentido pues estamos comparando dos casos extremos, cuando el motor está completamente sano y completamente roto.

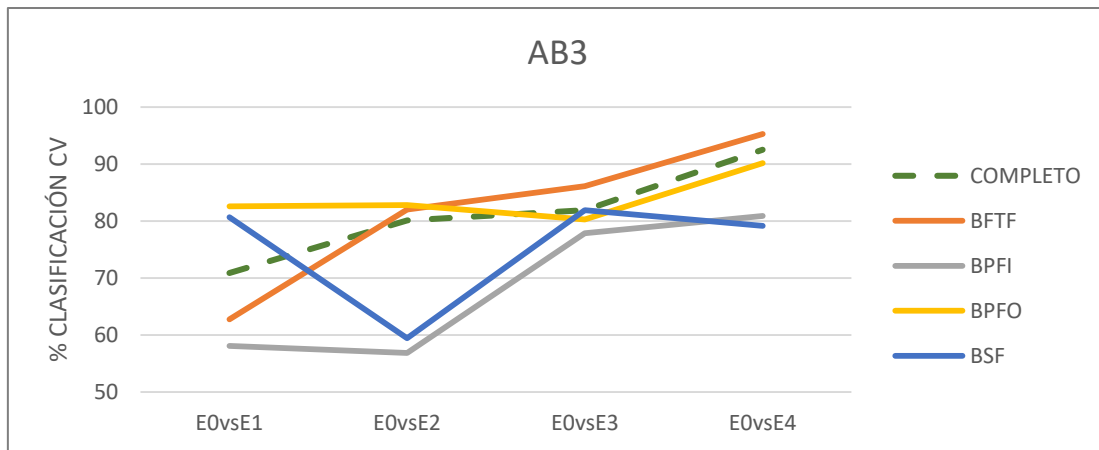


Figura 57: Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB3 en la regresión binaria

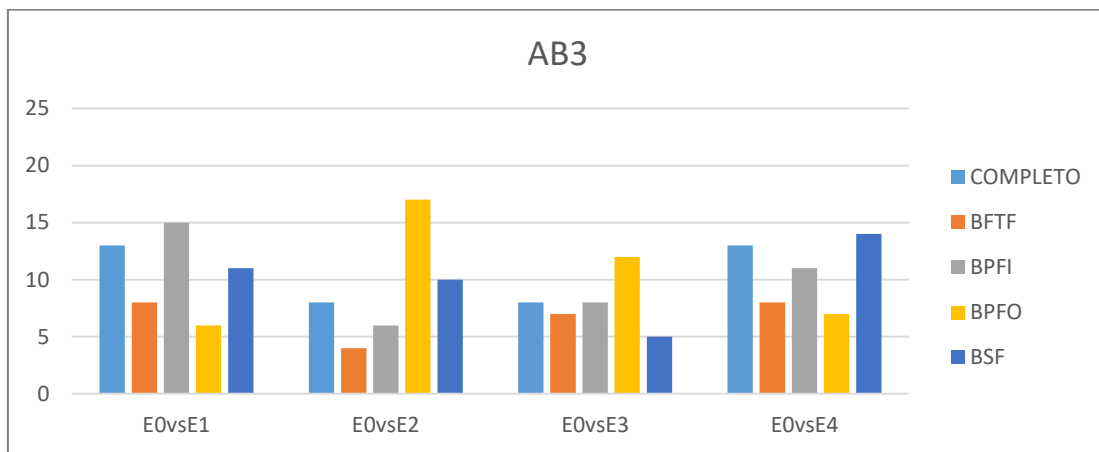


Figura 58: Número de coeficientes AB3 en la regresión binaria

En este caso del variador Allen-Bradley parece beneficioso realizar los análisis con el conjunto BPFO pues en el primer gráfico observamos como es el conjunto más lineal con porcentajes siempre superiores al 80 % mientras que en el segundo confirmamos que es un modelo en el que no intervienen muchas variables.

Podemos tener la duda de utilizar otro conjunto de variables pues en determinadas comparaciones tiene un porcentaje de clasificación superior como puede ser BFTF. No obstante, en la comparación E0vsE1, el error es aproximadamente del 40 %. Por lo que si tenemos que escoger un conjunto de variables para todos los análisis elegiríamos el mencionado anteriormente: BPFO.

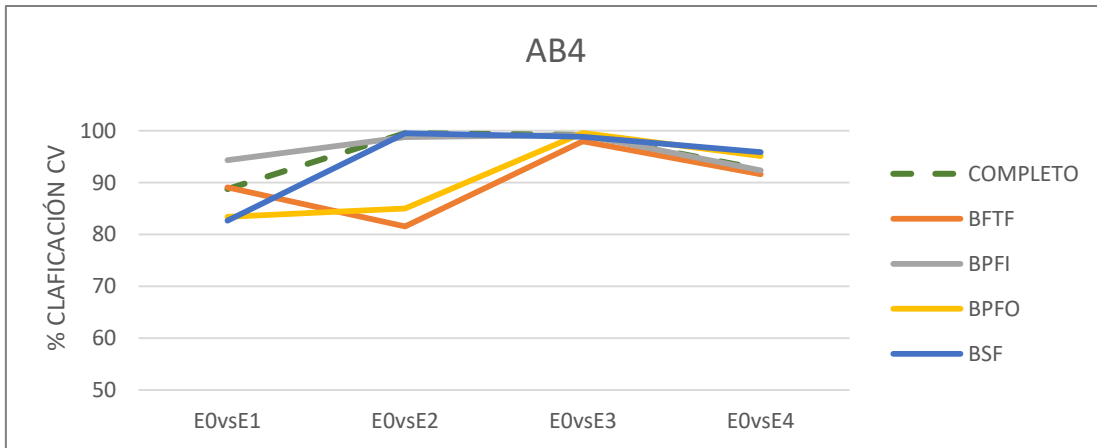


Figura 59: Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB4 en la regresión binaria

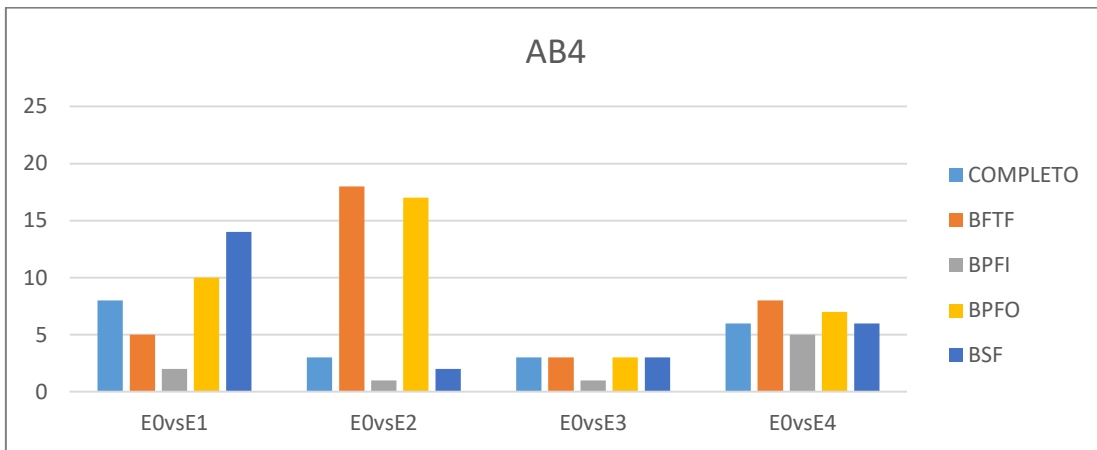


Figura 60: Número de coeficientes AB4 en la regresión binaria

Si empezamos fijándonos en el segundo gráfico podemos observar como BPFI es un modelo que nos otorga menos variables y por lo tanto es más sencillo que el resto pero para poder elegir este conjunto de variables nos debemos fijar en el primer gráfico.

En este primer gráfico podemos observar como todos los conjuntos están por encima del 80 % de clasificación por lo que, en principio, cualquiera de ellos podría ser útil. De nuevo, al igual que en el caso anterior, si queremos obtener el mejor porcentaje de clasificación para las cuatro comparaciones escogeremos aquel conjunto que sea más lineal. En este caso, y siendo también el que menor número de variables aporta al modelo, escogeríamos el conjunto BPFI.

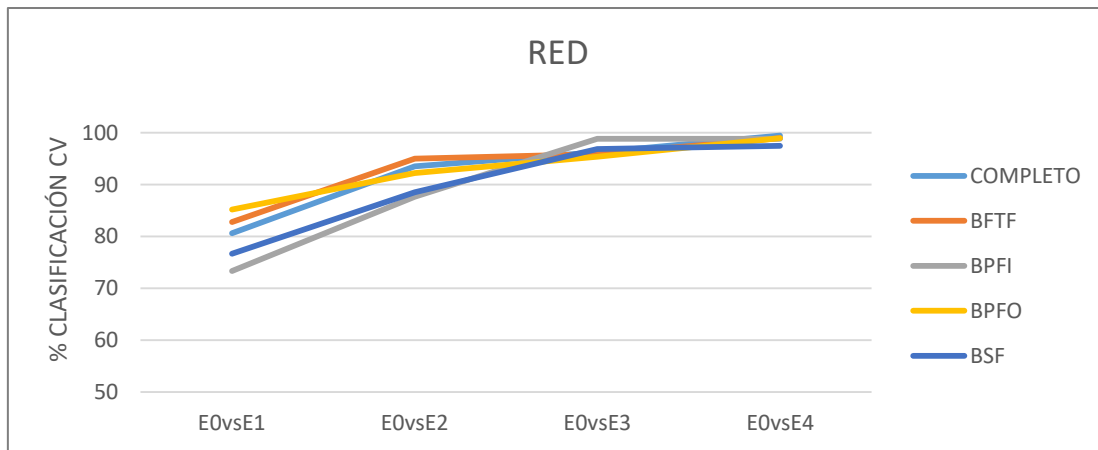


Figura 61: Evolución del porcentaje de clasificación cv para RED en la regresión binaria

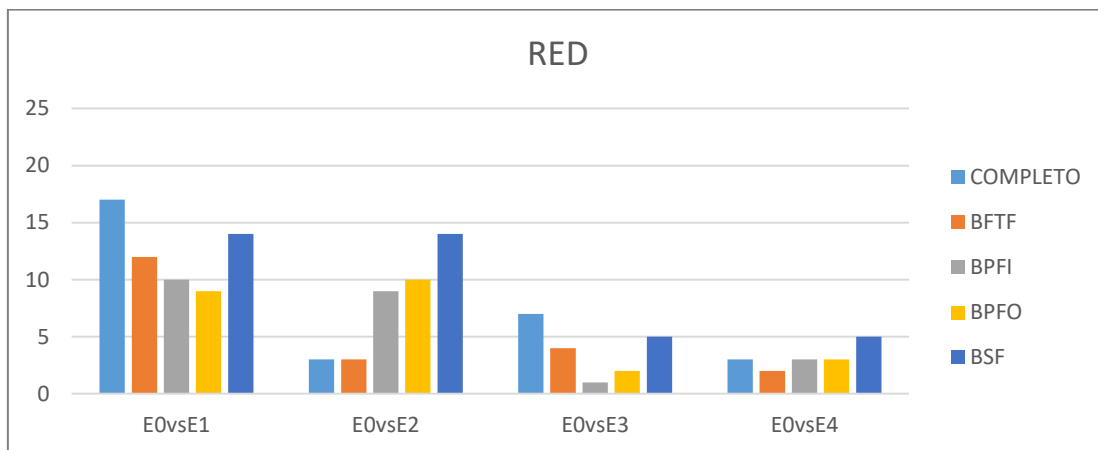


Figura 62: Número de coeficientes RED en la regresión binaria

Para el variador RED parece beneficioso escoger cualquiera del conjunto de variables excepto BPFI y BSF pues ambos son los que para las diferentes comparaciones tienen menor porcentaje de clasificación llegando a bajar del 80 % en la E0vsE1. Entre el resto de análisis, el completo, el BFTF y el BPFO podemos descartar el primero pues la complejidad que requiere es bastante superior a los otros dos debido al número de variables que intervendrían.

En resumen, se podría utilizar cualquiera de los análisis de BFTF y BPFO para el variador RED.

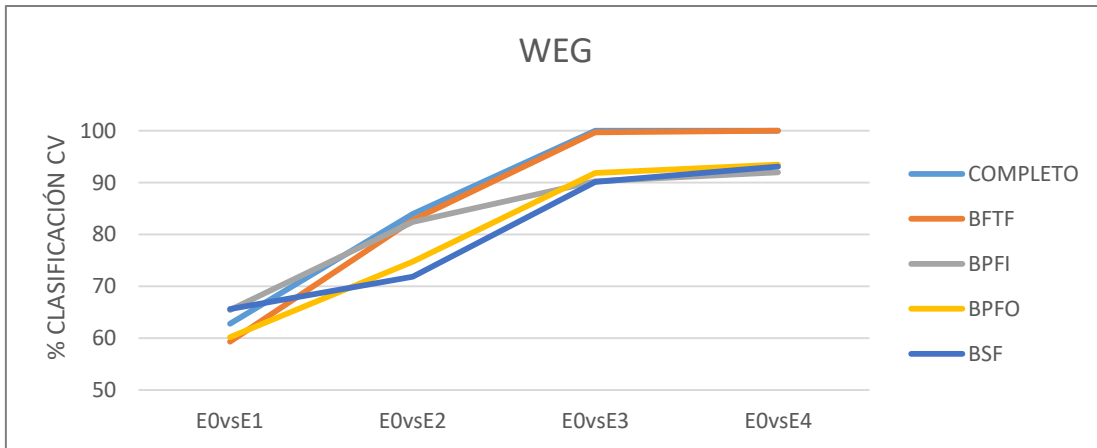


Figura 63: Evolución del porcentaje de clasificación cv para WEG en la regresión binaria

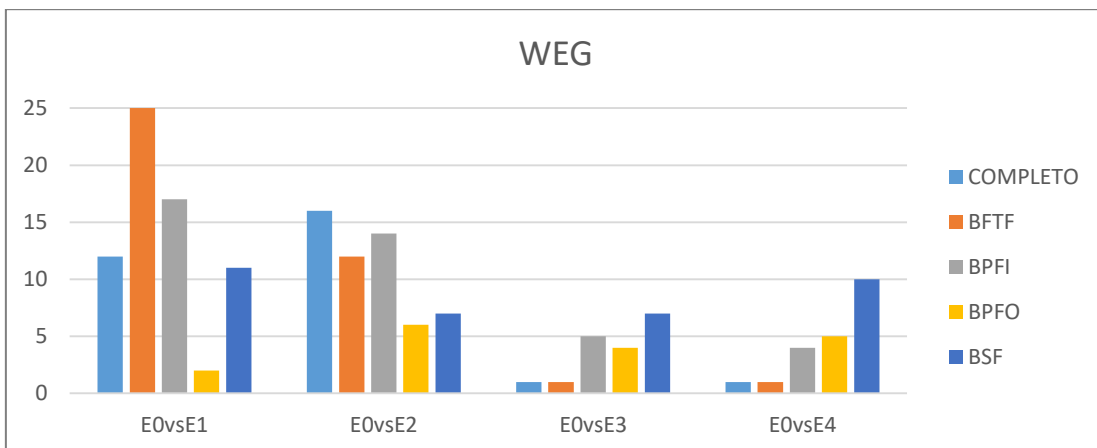


Figura 64: Número de coeficientes WEG en la regresión binaria

En el primer gráfico podemos observar como para las variables BSF y BPFO obtenemos peores porcentajes de clasificación por lo que no sería beneficioso hacer uso de ellos. Si descartamos el análisis completo con todas las variables por razones comentadas anteriormente, tendríamos el conjunto formado por las variables BFTF y BPFI.

A pesar de que para la primera comparación BPFI tiene menos variables y un porcentaje de clasificación superior, parece que el conjunto formado por BFTF es más interesante a la hora de realizar los análisis pues en las comparaciones E0vsE3 y E0vsE4 nos otorga un porcentaje de prácticamente del 100 % y con un número de variables en el modelo muy bajo.



Tras realizar este estudio gráfico en el que hemos llegado a diversas conclusiones, presentamos una tabla donde se encuentra resumido de manera numérica los porcentajes de clasificación de la validación cruzada así como el número de coeficientes para las distintas comparaciones binarias en cada uno de los variadores y por cada análisis efectuado:



		ANÁLISIS COMPLETO		BFTF		BPFI		BPFO		BSF	
		% CV	COEFICIENTES	% CV	COEFICIENTES	% CV	COEFICIENTES	% CV	COEFICIENTES	% CV	COEFICIENTES
AB1	E0vsE1	99,8888900	2	98,66667	1	94,66667	4	93,11111	6	100	2
	E0vsE2	97	4	95,888890	1	95,77778	5	94,6667	9	97,4444	3
	E0vsE3	98,75	6	99,125	4	98,125	7	99,5	2	96,5	6
	E0vsE4	97	5	97,75	7	98,375	5	97,375	14	96,875	5
AB2	E0vsE1	93,22222	11	93,66667	7	89,22222	14	91,77778	10	91,44444	10
	E0vsE2	93,44444	9	92,88889	6	82,77778	17	84,1111	17	86,55556	15
	E0vsE3	95,25	4	97,125	6	95,625	3	98,375	5	96,75	4
	E0vsE4	95,5	3	93,375	13	89,375	7	90,875	7	99,25	1
AB3	E0vsE1	70,88889	13	62,77778	8	58,11111	15	82,556	6	80,6667	11
	E0vsE2	80,11111	8	82	4	56,88889	6	82,7778	17	59,4444	10
	E0vsE3	81,875	8	86,125	7	77,875	8	80,25	12	81,8750	5
	E0vsE4	92,5	13	95,25	8	80,875	11	90,125	7	79,125	14
AB4	E0vsE1	88,77778	8	89,1111	5	94	2	83,4444	10	82,6667	14
	E0vsE2	99,55556	3	81,5556	18	98,77778	1	85	17	99,5556	2
	E0vsE3	99,25	3	98	3	99,25	1	99,625	3	99	3
	E0vsE4	92,62500	6	91,6250	8	92,375	5	95,125	7	95,875	6
RED	E0vsE1	80,6667	17	82,77778	12	73,3333	10	85,2222	9	76,6667	14
	E0vsE2	93,5556	3	95	3	87,6667	9	92,2222	10	88,55556	14
	E0vsE3	96,25	7	95,875	4	98,8750	1	95,375	2	96,875	5
	E0vsE4	99,5	3	99	2	98,875	3	99	3	97,5	5
WEG	E0vsE1	62,7778	12	59,3333	25	65,4444	17	60,2222	2	65,66667	11
	E0vsE2	84	16	82,77778	12	82	14	74,7778	6	71,8889	7
	E0vsE3	100	1	99,75	1	90,25	5	91,875	4	90,125	7
	E0vsE4	100	1	100	1	92	4	93,5	5	93,125	10

Tabla 20: Resultados de la regresión binaria.

## 6.4.2. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN MULTINOMIAL

Tras analizar los resultados de la regresión binaria, analizamos los resultados obtenidos mediante la regresión multiclase comparándolos con los obtenidos con la regresión binaria.

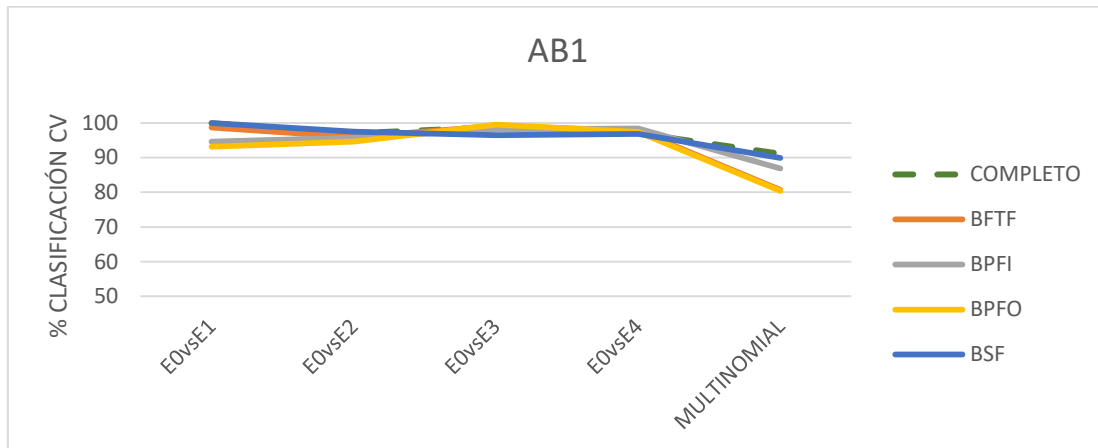


Figura 65: Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB1 en la regresión multiclase

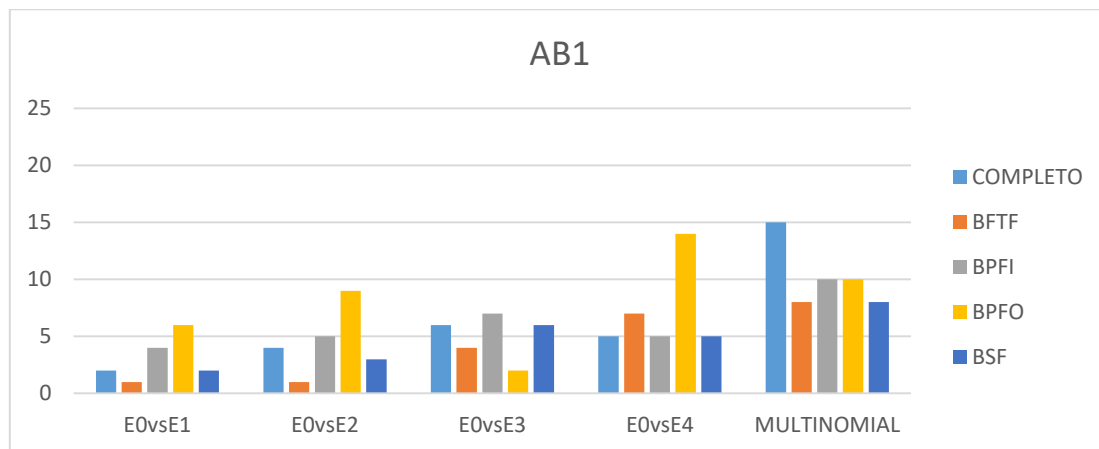


Figura 66: Número de coeficientes AB1 en la regresión multiclase

La regresión multiclase para el variador AB1 puede ser muy interesante ya que valor del porcentaje de clasificación mediante validación cruzada siempre se encuentra por encima del 80 %. Si nos fijamos en el número de coeficientes presentes en los modelos, siempre sería inferior a 10 excepto en el caso del análisis completo (el cual hemos visto que, de forma general, no suele ser mejor que los análisis con solamente un conjunto de variables). Por lo tanto, para este variador la regresión multiclase será mejor opción ya que mediante un análisis podremos obtener el estado del rodamiento sin necesidad de hacer las cuatro regresiones binarias.

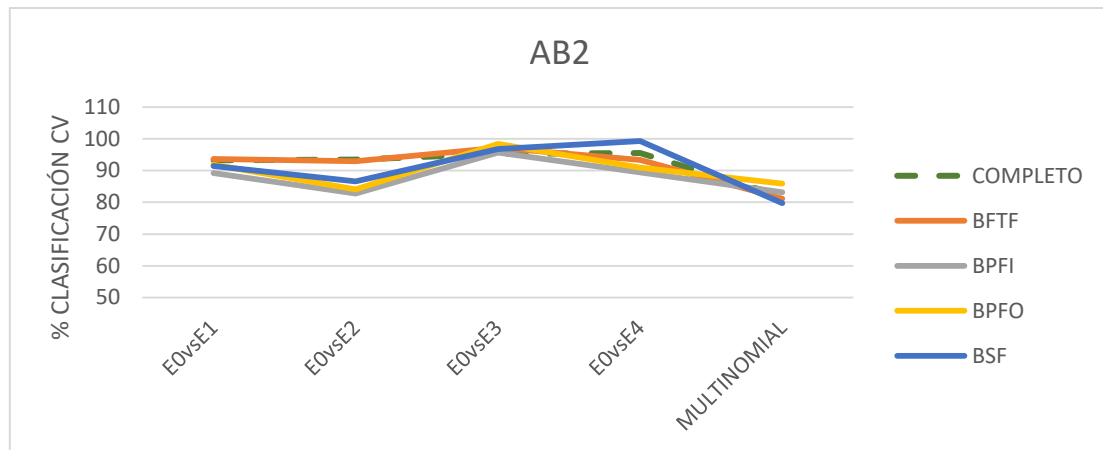


Figura 67: Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB2 en la regresión multiclase

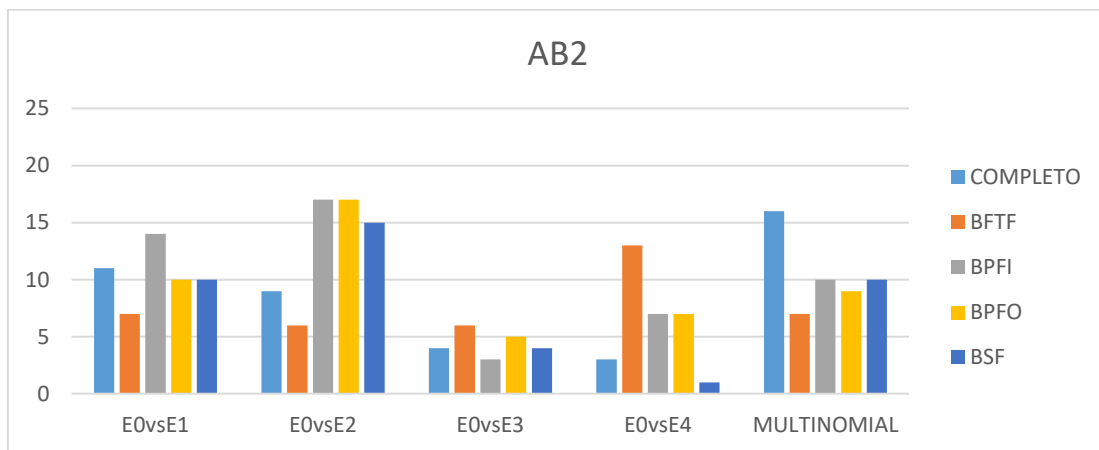


Figura 68: Número de coeficientes AB2 en la regresión multiclase

Para el variador AB2 ocurre prácticamente lo mismo que en el variador AB1. Cuando analizábamos la regresión binaria elegimos como mejor opción el análisis con BFTF pues era la evolución más lineal y siempre se encontraba por encima del 90 %. En esta regresión multiclase, BFTF sigue siendo de las mejores opciones pues su porcentaje se encuentra por encima del 80 % de clasificación y obtendríamos un modelo relativamente sencillo con menos de 10 variables.

Al igual que ocurría con el variador AB1, el análisis multinomial puede ser el más interesante a la hora de realizar una predicción futura del estado del rodamiento.

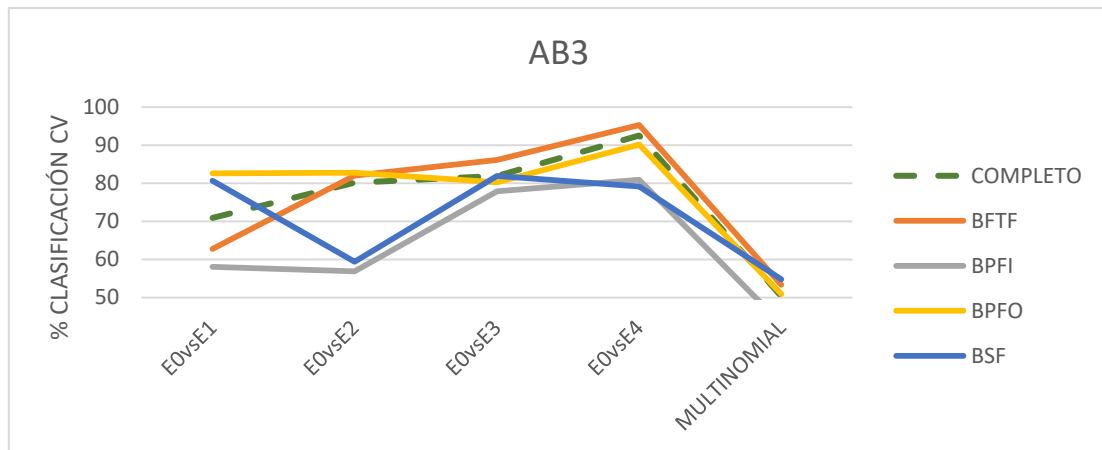


Figura 69: Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB3 en la regresión multiclase

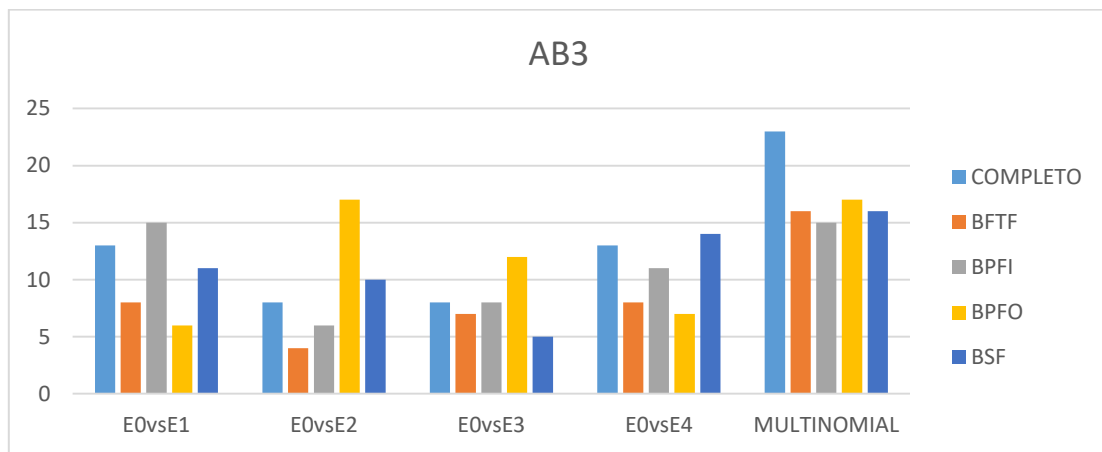


Figura 70: Número de coeficientes AB3 en la regresión multiclase

En este caso, parece evidente, que el aplicar la regresión multiclase no es lo adecuado pues los porcentajes de clasificación disminuyen hasta un 50 %, lo que equivaldría a decir que el modelo acertaría la predicción 1 de cada 2 veces. Por lo tanto, lo adecuado para este caso concreto del variador Allen Bradley sería utilizar la regresión binaria y, como comentamos anteriormente, el conjunto de variables más adecuado sería el BPFO pues su evolución del porcentaje de clasificación es el más lineal, siempre situado por encima del 80 %.

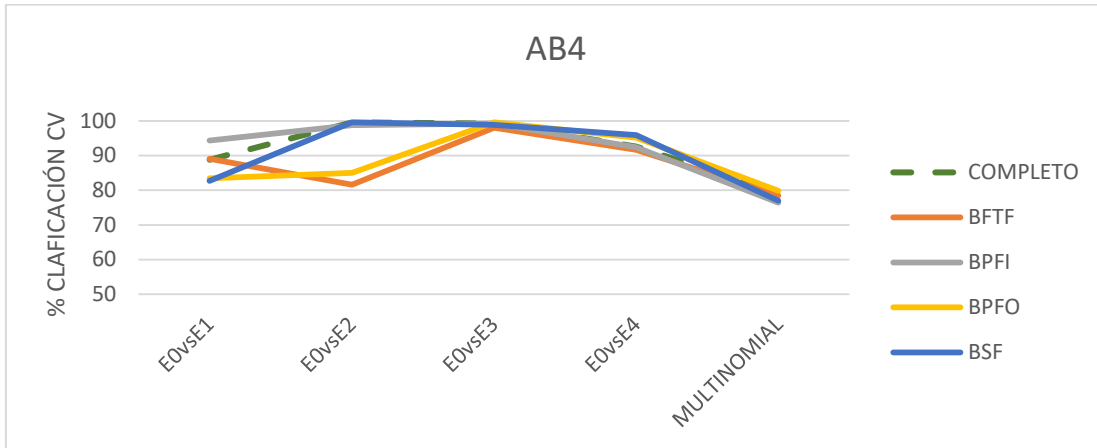


Figura 71: Evolución del porcentaje de clasificación cv para AB4 en la regresión multiclase

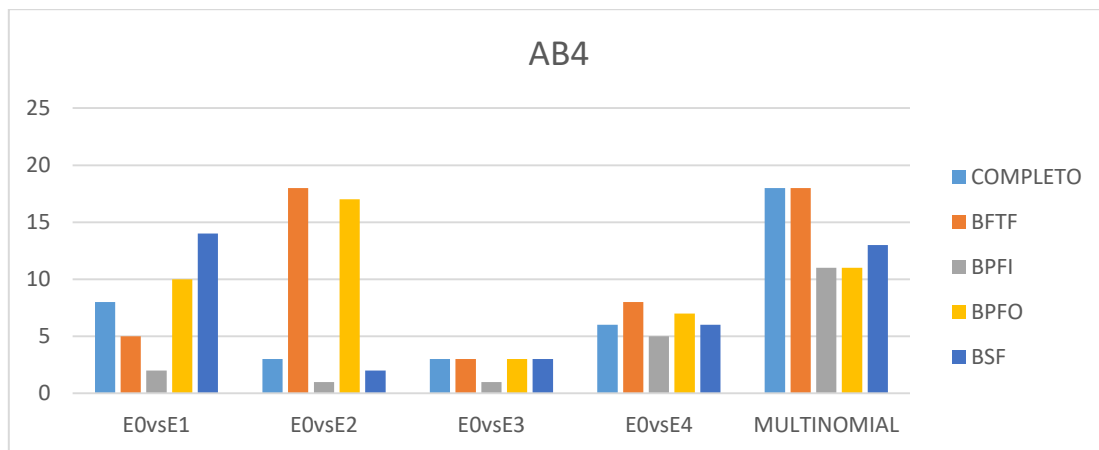


Figura 72: Número de coeficientes AB4 en la regresión multiclase

Para el variador AB4 se obtienen, como ocurría con AB1 y AB2, valores de clasificación lo suficientemente elevados como para decantarnos por esta opción.

Para elegir el conjunto de variables adecuada debemos hacer uso del segundo gráfico pues en el primero, prácticamente todos presentan porcentajes parecidos siendo a primera vista el conjunto BPFO el que presenta mayor porcentaje de clasificación. Observando el gráfico de los coeficientes vemos como BPFO junto con BPFI son los que nos otorgarían modelos más sencillos por lo que el conjunto más adecuado, teniendo en cuenta el primer gráfico, sería BPFO.

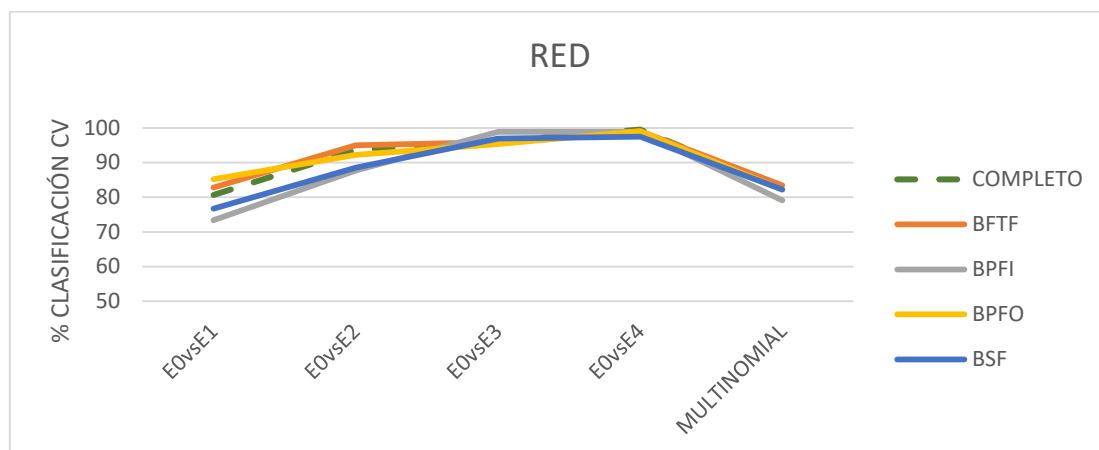


Figura 73: Evolución del porcentaje de clasificación cv para RED en la regresión multiclase

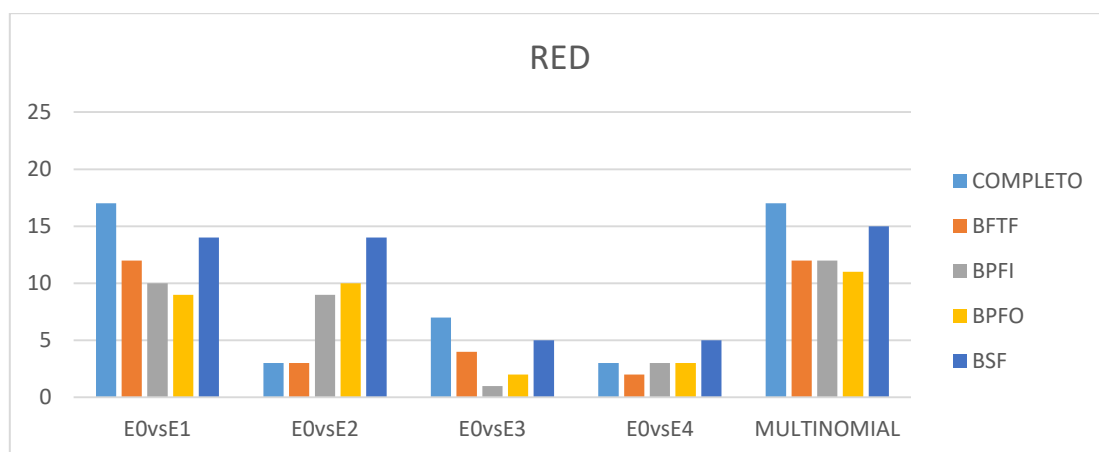


Figura 74: Número de coeficientes RED en la regresión multiclase

Para la alimentación directamente desde la RED, en la regresión binaria nos decantamos por los conjuntos de variables BFTF o BPFO pues eran los que otorgaban porcentajes más elevados a lo largo de las diferentes comparaciones. Para la regresión multiclase, parece que podemos utilizar cualquier análisis excepto BPFI (también podríamos hacer uso de él si se requiriera pero se ha descartado por que es el que menor porcentaje presenta) De entre los demás conjuntos podríamos elegir uno en concreto si nos fijásemos en la segunda gráfica y dado que buscamos el modelo más sencillo, nos decantaríamos por BPFO siendo BFTF también válido.

Si comparásemos puramente la regresión binaria con la multiclase, podemos ver como esta última sería más interesante ya que se mantienen porcentajes de clasificación bastante altos (~80 %)



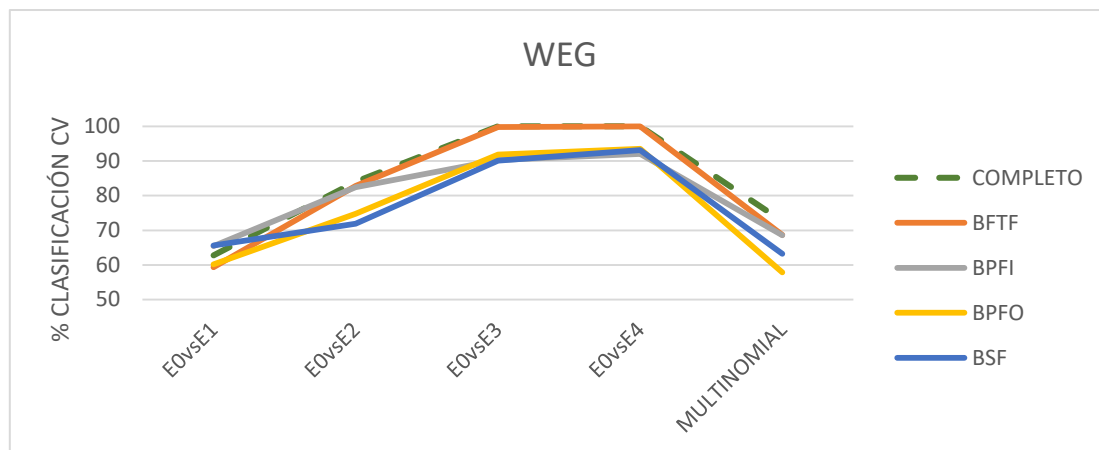


Figura 75: Evolución del porcentaje de clasificación cv para WEG en la regresión multiclase

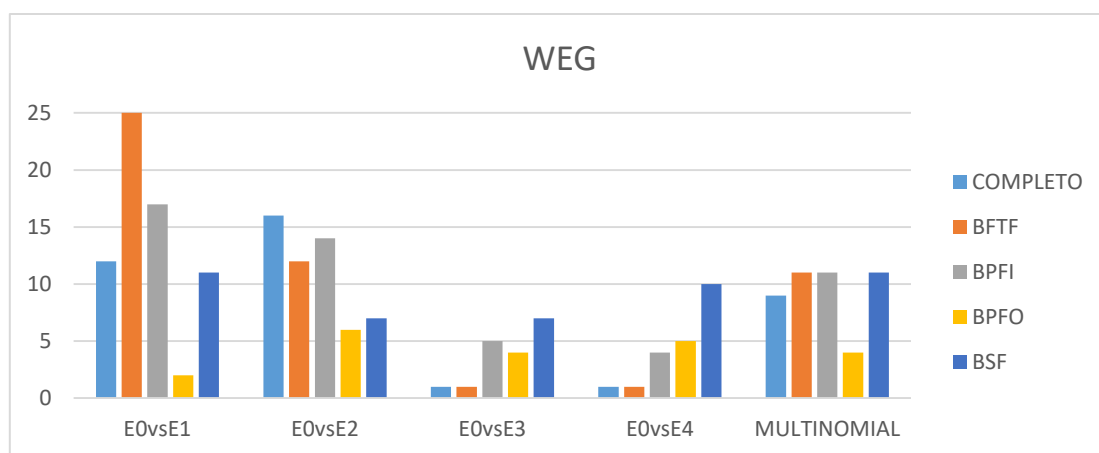


Figura 76: Número de coeficientes WEG en la regresión multiclase

Observando el primer gráfico podemos ver como sí hay diferencias en el porcentaje de clasificación en función del conjunto de variables que empleemos. Descartando BPFO y BSF debido a que sus porcentajes son los más bajos, tendríamos que elegir entre el análisis completo, el cual otorga el mejor porcentaje de clasificación, el conjunto BFTF o el conjunto BPF1, que tienen porcentajes ligeramente inferiores. Si consideramos la complejidad que requiere utilizar el análisis completo, nos decantaríamos por cualquier conjunto de variables, bien BFTF o bien BPF1 a pesar de que sus porcentajes de clasificación son ligeramente inferiores.

Tras realizar este estudio gráfico de la regresión multinomial donde la hemos comparado con la regresión binaria presentamos una tabla donde se encuentra resumido de manera numérica los porcentajes de clasificación de la validación cruzada así como el número de coeficientes para las distintas comparaciones binarias en cada uno de los variadores y por cada análisis efectuado:

		ANÁLISIS COMPLETO		BTF		BPFI		BPFO		BSF	
		% CV	COEFICIENTES	% CV	COEFICIENTES	% CV	COEFICIENTES	% CV	COEFICIENTES	% CV	COEFICIENTES
AB1	E0vsE1	99,8888900	2	98,66667	1	94,66667	4	93,11111	6	100	2
	E0vsE2	97	4	95,888890	1	95,77778	5	94,6667	9	97,4444	3
	E0vsE3	98,75	6	99,125	4	98,125	7	99,5	2	96,5	6
	E0vsE4	97	5	97,75	7	98,375	5	97,375	14	96,875	5
	MULTICLASE	91,11111	15	80,7222	8	86,8889	10	80,4444	10	89,9444	8
AB2	E0vsE1	93,22222	11	93,66667	7	89,22222	14	91,77778	10	91,44444	10
	E0vsE2	93,44444	9	92,88889	6	82,77778	17	84,1111	17	86,55556	15
	E0vsE3	95,25	4	97,125	6	95,625	3	98,375	5	96,75	4
	E0vsE4	95,5	3	93,375	13	89,375	7	90,875	7	99,25	1
	MULTICLASE	81,88889	16	81,1111	7	83,1111	10	85,83333	9	79,7222	10
AB3	E0vsE1	70,88889	13	62,77778	8	58,11111	15	82,556	6	80,6667	11
	E0vsE2	80,11111	8	82	4	56,88889	6	82,7778	17	59,4444	10
	E0vsE3	81,875	8	86,125	7	77,875	8	80,25	12	81,8750	5
	E0vsE4	92,5	13	95,25	8	80,875	11	90,125	7	79,125	14
	MULTICLASE	50,3333	23	53,389	16	43,22220	15	50,94444	17	54,778	16
AB4	E0vsE1	88,77778	8	89,1111	5	94	2	83,4444	10	82,6667	14
	E0vsE2	99,55556	3	81,5556	18	98,77778	1	85	17	99,5556	2
	E0vsE3	99,25	3	98	3	99,25	1	99,625	3	99	3
	E0vsE4	92,62500	6	91,6250	8	92,375	5	95,125	7	95,875	6
	MULTICLASE	79,2222	18	78,5	18	76,4444	11	79,8333	11	76,9444	13
RED	E0vsE1	80,6667	17	82,77778	12	73,3333	10	85,2222	9	76,6667	14
	E0vsE2	93,5556	3	95	3	87,6667	9	92,2222	10	88,55556	14
	E0vsE3	96,25	7	95,875	4	98,8750	1	95,375	2	96,875	5
	E0vsE4	99,5	3	99	2	98,875	3	99	3	97,5	5
	MULTICLASE	82,556	17	83,44444	12	79,1111	12	82,1667	11	82,2222	15
WEG	E0vsE1	62,7778	12	59,3333	25	65,4444	17	60,2222	2	65,66667	11
	E0vsE2	84	16	82,77778	12	82	14	74,7778	6	71,8889	7
	E0vsE3	100	1	99,75	1	90,25	5	91,875	4	90,125	7
	E0vsE4	100	1	100	1	92	4	93,5	5	93,125	10
	MULTICLASE	72,6667	9	68,66667	11	68,55556	11	57,8333	4	63,22222	11

Tabla 21: Resultados de la regresión multinomial.

---

## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

---

En este trabajo se ha realizado un estudio con el objetivo de analizar si es posible detectar fallos en los motores de inducción a partir de la corriente eléctrica y desarrollar un modelo de predicción a partir de las diferentes variables, determinadas por las frecuencias características de fallo y definidas por el orden del armónico y la banda (positiva o negativa) Para este estudio ha sido fundamental la aplicación de una de las técnicas de regresión, la cual la podemos clasificar como un método de regularización, conocida como LASSO.

Particularmente, el presente TFG se ha centrado en el estudio de los rodamientos, los cuales son la primera causa de fallo de dichos motores. La finalidad del estudio es observar si es posible clasificar el estado del rodamiento, desde su estado sano hasta su estado roto pasando por los posibles estados intermedios. Asimismo, pretendíamos comprobar la naturaleza de las variables y observar la posible influencia de los diferentes variadores.

Para desarrollar este trabajo nos hemos centrado en dos tipos de regresión: Logística Binaria y Logística Multinomial. Nuestro objetivo era comprobar si ambas proporcionaban conclusiones y resultados similares.

Las conclusiones a las que llegamos en el presente proyecto son las siguientes:

- Las variables, proporcionadas por el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid, son significativas para detectar los fallos en los rodamientos de motores de inducción tanto en las comparaciones binarias (donde comparamos el estado sano del rodamiento frente a un estado en concreto) como en la comparación multinomial (donde buscamos clasificar cualquiera de los cinco estados del rodamiento. La única fuente de alimentación que ha generado problemas ha sido la configuración 3 del Allen Bradley llamada AB3 ya que, de manera general, hemos obtenido peores porcentajes de clasificación así como modelos con más variables por lo que sería interesante estudiar el porqué de esta diferencia con respecto al resto de configuraciones de AB: AB1, AB2, AB4.

- El número de variables que definen los diferentes modelos es muy relevante ya que cabe recordar empezamos con un total de, aproximadamente, 809 variables y los modelos no superan en ninguna ocasión las 25 variables. A continuación, podemos

ver una tabla resumen donde observamos el número de coeficientes que obtendríamos para cada variador y comparación:

		ANÁLISIS COMPLETO	BFTF	BPFI	BPFO	BSF
		COEFICIENTES	COEFICIENTES	COEFICIENTES	COEFICIENTES	COEFICIENTES
AB1	E0vsE1	2	1	4	6	2
	E0vsE2	4	1	5	9	3
	E0vsE3	6	4	7	2	6
	E0vsE4	5	7	5	14	5
	MULTICLASE	15	8	10	10	8
AB2	E0vsE1	11	7	14	10	10
	E0vsE2	9	6	17	17	15
	E0vsE3	4	6	3	5	4
	E0vsE4	3	13	7	7	1
	MULTICLASE	16	7	10	9	10
AB3	E0vsE1	13	8	15	6	11
	E0vsE2	8	4	6	17	10
	E0vsE3	8	7	8	12	5
	E0vsE4	13	8	11	7	14
	MULTICLASE	23	16	15	17	16
AB4	E0vsE1	8	5	2	10	14
	E0vsE2	3	18	1	17	2
	E0vsE3	3	3	1	3	3
	E0vsE4	6	8	5	7	6
	MULTICLASE	18	18	11	11	13
RED	E0vsE1	17	12	10	9	14
	E0vsE2	3	3	9	10	14
	E0vsE3	7	4	1	2	5
	E0vsE4	3	2	3	3	5
	MULTICLASE	17	12	12	11	15
WEG	E0vsE1	12	25	17	2	11
	E0vsE2	16	12	14	6	7
	E0vsE3	1	1	5	4	7
	E0vsE4	1	1	4	5	10
	MULTICLASE	9	11	11	4	11

*Tabla 22: Resumen del número de coeficientes para cada variador en función de la regresión y del análisis realizado.*

Como se puede observar en la tabla anterior obtenemos modelos definidos por una sola variable (como es el caso de AB1 para el análisis BFTF y las comparaciones E0vsE1 y E0vsE2) y otros no tan sencillos pero que en ningún caso superan las 25 variables, siendo este el modelo más “complejo” que obtenemos en nuestro estudio. La sencillez de estos modelos la obtenemos gracias al método LASSO, ya que a diferencia de otros métodos como Ridge, nos permite penalizar aquellas variables que no intervienen en el modelo reduciéndolas a cero.

- A la hora de determinar un modelo de predicción/clasificación no es necesario utilizar todas las variables (~ 809) pues el hecho de centrarse en un determinado grupo (bien BFTF, bien BPF1, bien BPF0 o bien BSF) nos permitiría reducir la complejidad computacional y obtendríamos resultados igual o mejores que con todas las variables. La elección del grupo no está predeterminada y dependerá del variador utilizado como fuente de alimentación en cada caso. Por ejemplo, para el variador AB1 sería indiferente utilizar un grupo en concreto o todo el conjunto pues obtendríamos resultados similares. Sin embargo, si nos fijamos en el variador WEG, parece evidente que los conjuntos más interesantes son el BFTF o el BPF1 pues nos otorgan modelos más sencillos y con mejores porcentajes de clasificación. La elección que se ha escogido en cada variador se encuentra en el capítulo 6.4: Resultados de los análisis.

- Finalmente, y como comparación de la regresión binaria y multiclase, se ha observado que, en la mayor parte de los casos, la regresión multiclase otorga resultados igual de buenos que la regresión binaria por lo que está sería una buena elección para determinar el estado del rodamiento. Los variadores que no lo cumplen serían: la configuración 3 del Allen Bradley (AB3) donde obtenemos porcentajes de clasificación cercanos al 50 % así como el WEG. No obstante, este último tiene porcentajes comprendidos entre el 60 % y el 73 %.

Como posibles líneas de investigación futura planteamos:

- Comprobar si los resultados alcanzados en el proyecto se cumplen para otras fuentes de alimentación, más concretamente otros variadores como pueden ser el inversor ABB (*Asea Brown Boveri*) o el inversor SIE (*Siemens*).

- Utilizar otros procedimientos estadísticos como por ejemplo las redes elásticas para comprobar si se podrían reducir aún más el número de variables obtenidas en el modelo manteniendo la capacidad de clasificación.

- Ampliar el análisis realizado a otros posibles fallos de los motores eléctricos como pueden ser fallos en el rotor, en el estator o en los ejes.

- Estudiar la posible relación entre la fuente de alimentación y las frecuencias características de fallo, la cual no ha sido posible detectar en el presente TFG.
- Utilizar otra base de datos distinta para el diagnóstico de fallos en rodamientos de los motores inducción. Una alternativa posible sería analizar el ruido que producen los motores en sus diferentes estados para comprobar si a partir del ruido se puede clasificar el estado del motor.

---

## ANEXO A: RESULTADOS DETALLADOS DE TODOS LOS ANÁLISIS EFECTUADOS

---

En el siguiente Anexo se puede visualizar todas las gráficas correspondientes a los análisis tanto a la regresión binaria como multinomial.

### A1. ANÁLISIS DE AB1

#### A1.1 ANÁLISIS COMPLETO

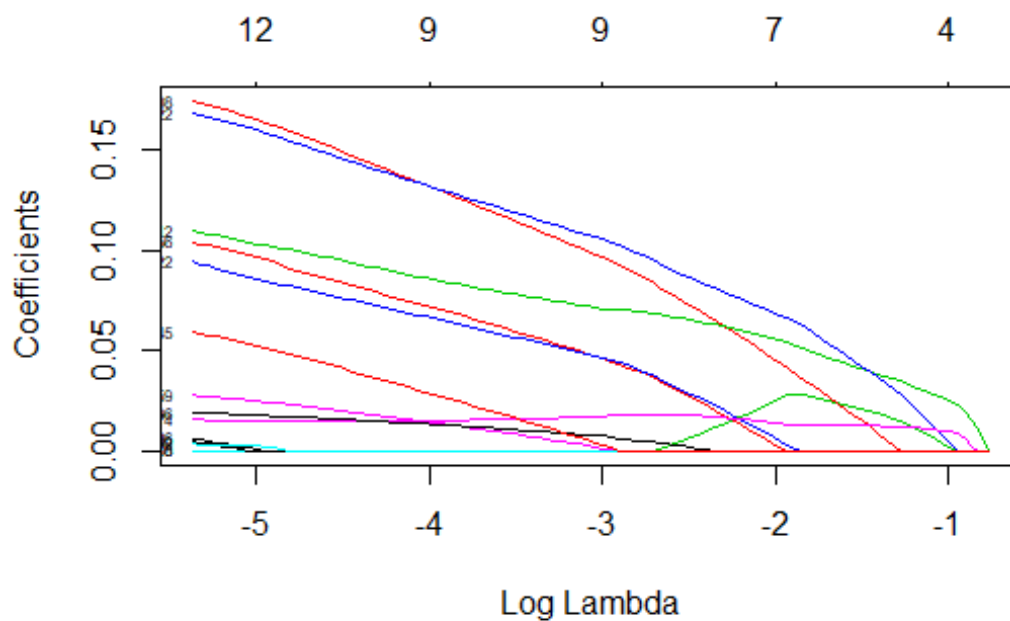


Figura 77: Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE2

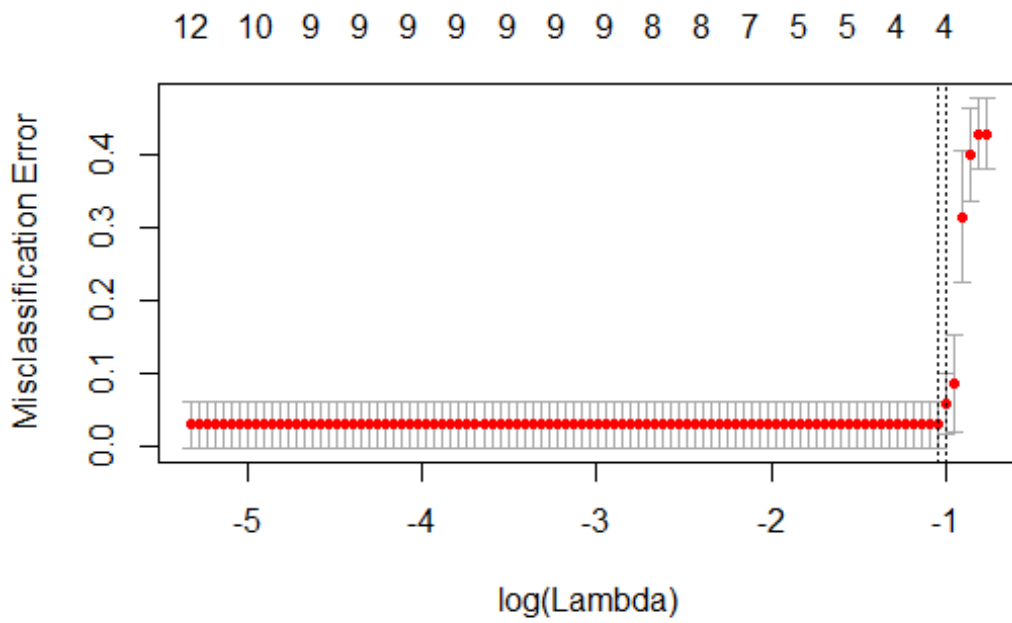


Figura 78: Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE2 (II)

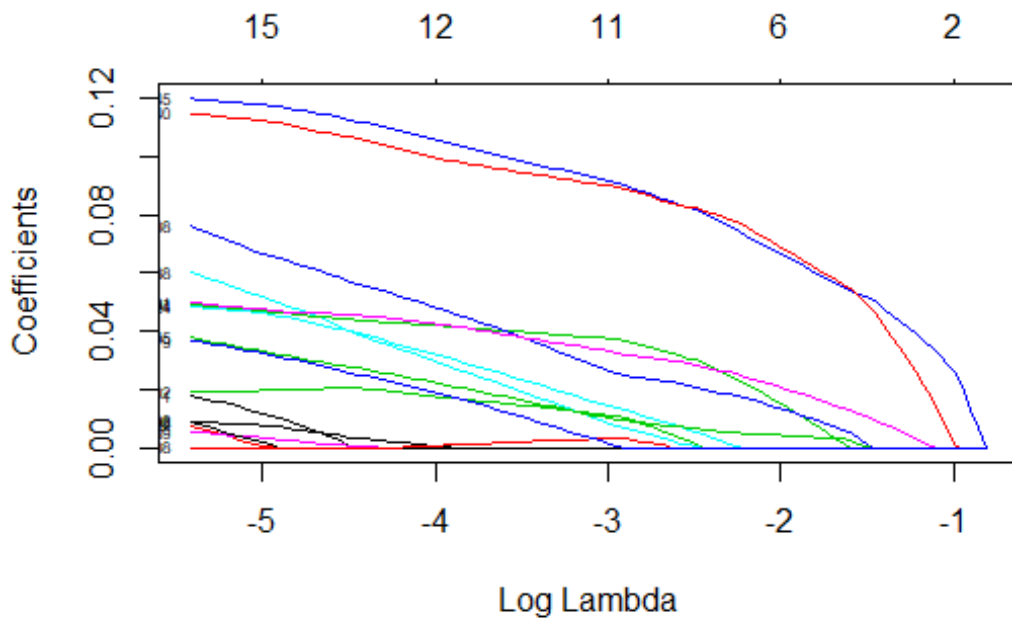


Figura 79: Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE3



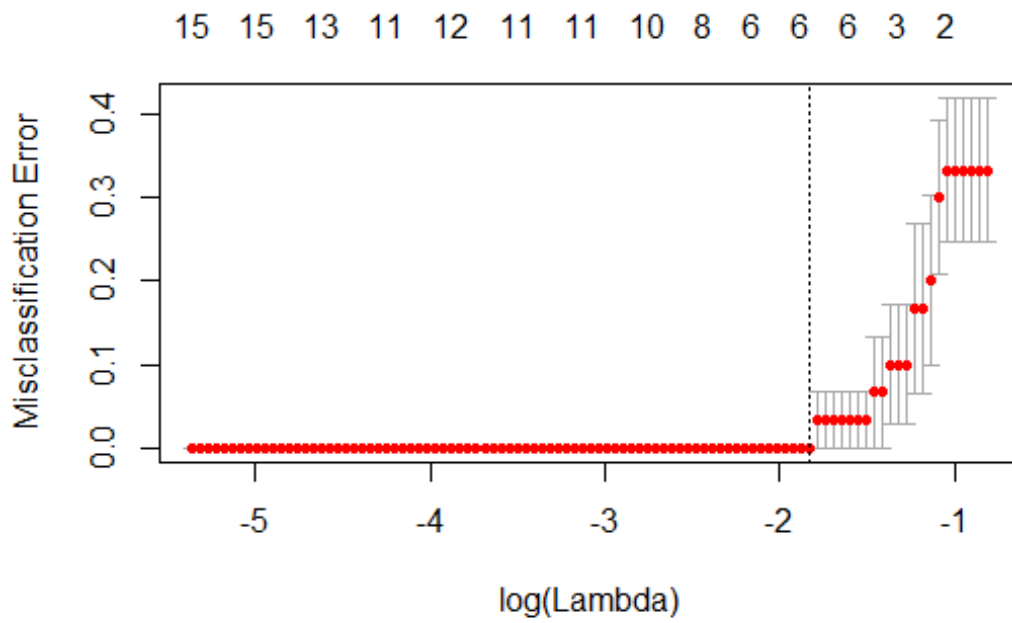


Figura 80: Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE3 (II)

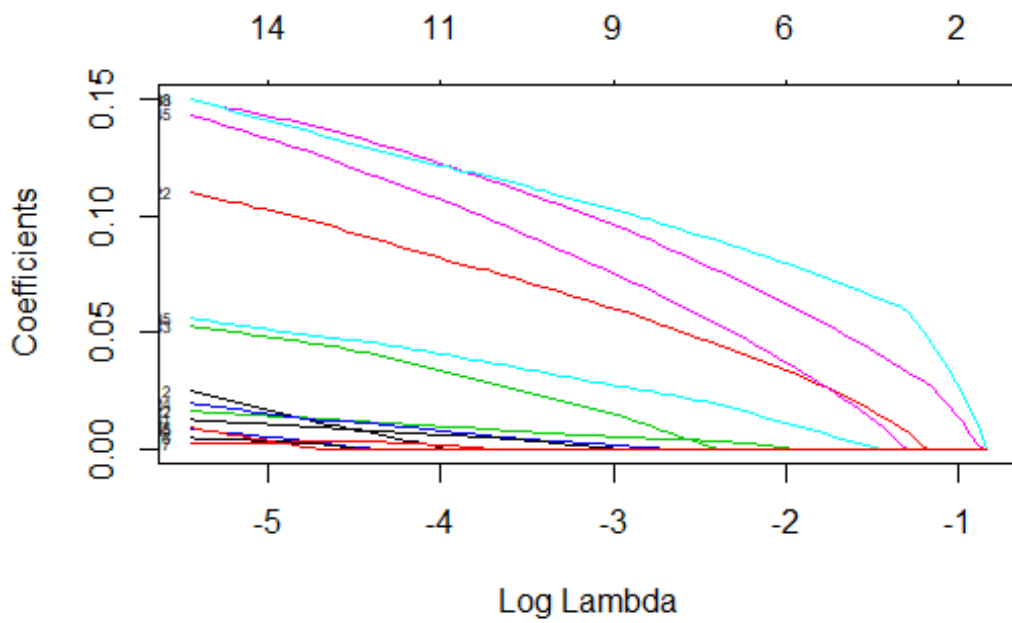


Figura 81: Plot correspondiente al análisis AB1.NC2-E0vsE4

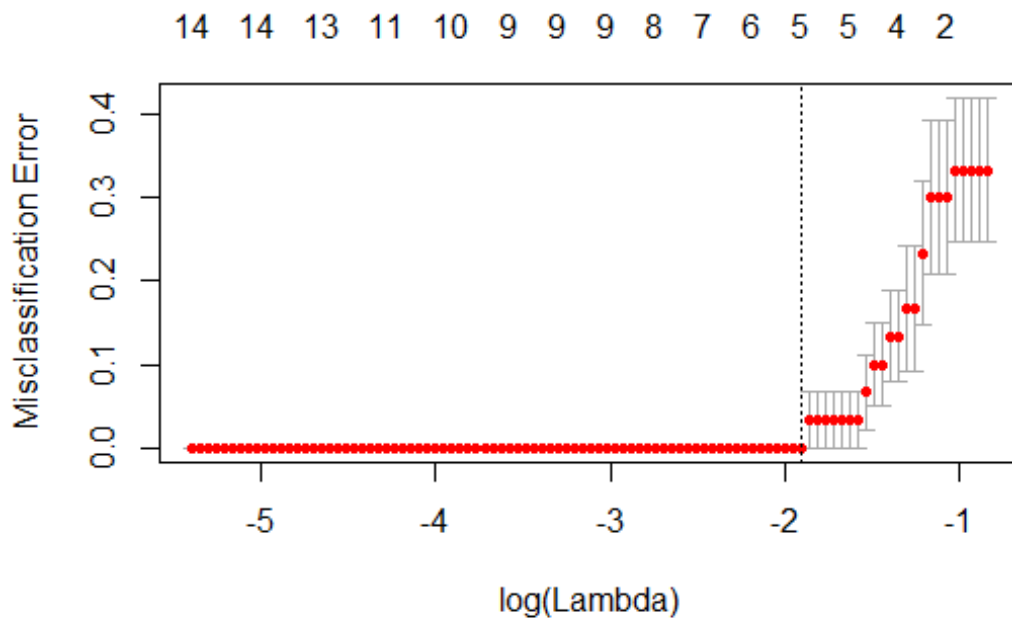


Figura 82: Plot correspondiente al análisis AB1-NC2-E0vsE4 (II)

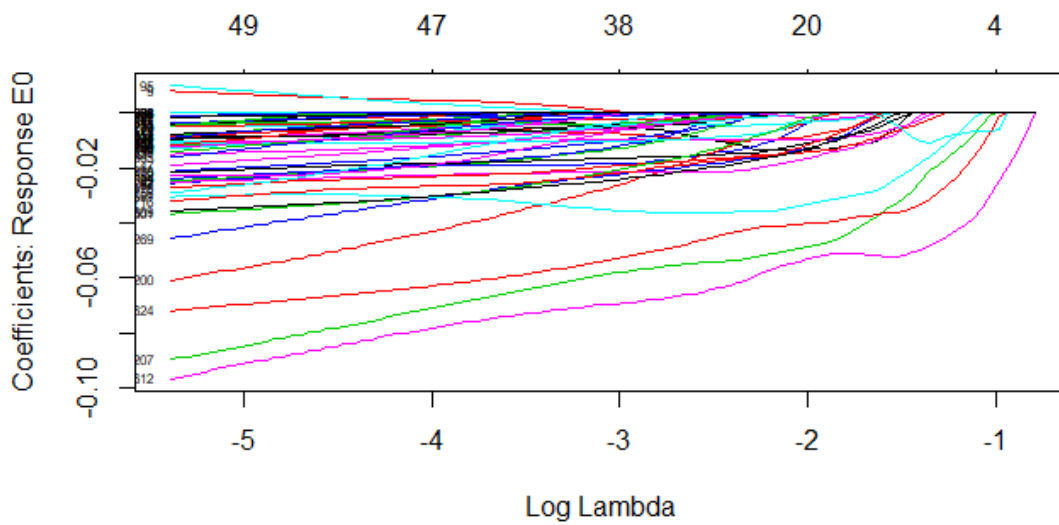


Figura 83: Plot correspondiente al análisis multiclase AB1-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4



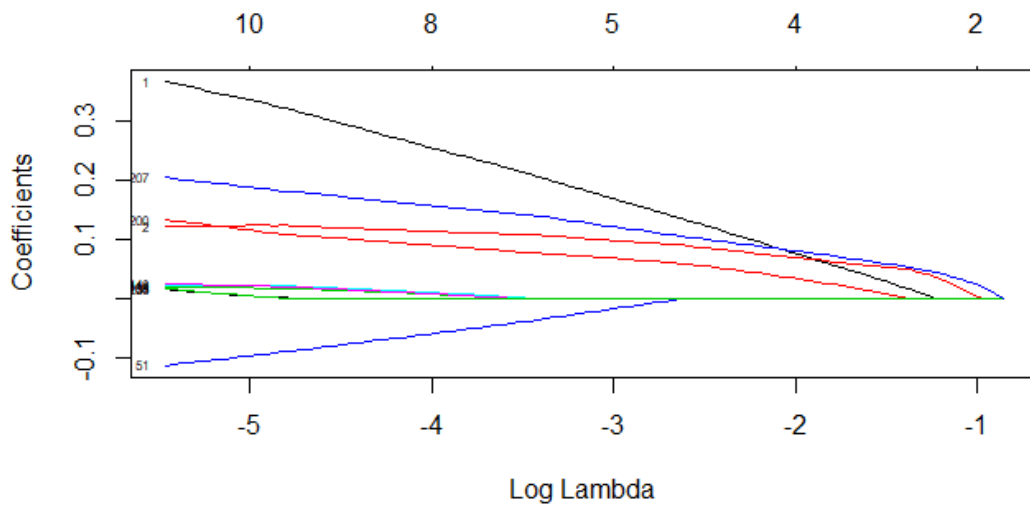


Figura 86: Plot correspondiente al análisis AB1-BTFE-E0vsE3

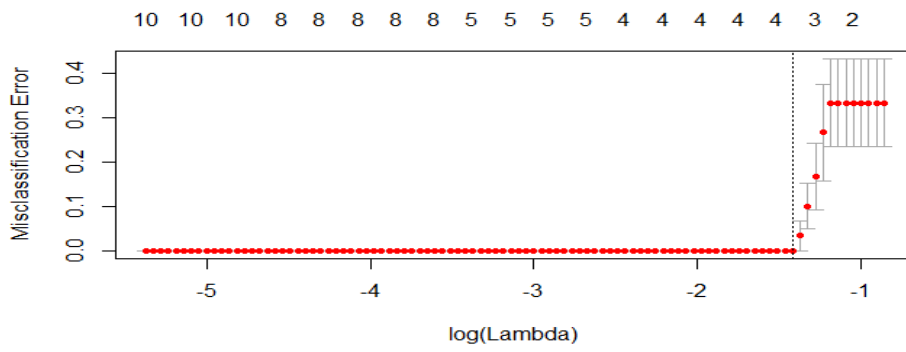


Figura 87: Plot correspondiente al análisis AB1-BTFE-E0vsE3 (II)

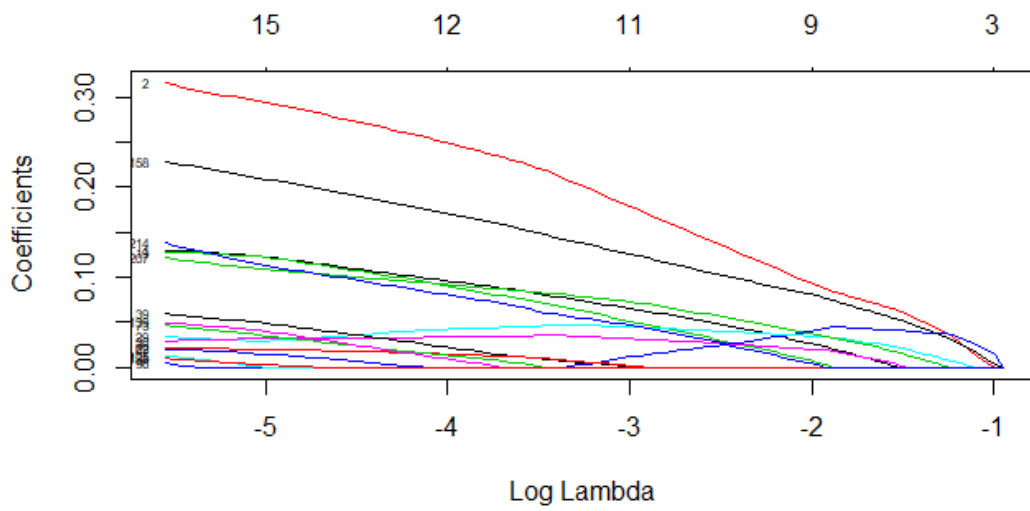


Figura 88: Plot correspondiente al análisis AB1-BTFE-E0vsE4

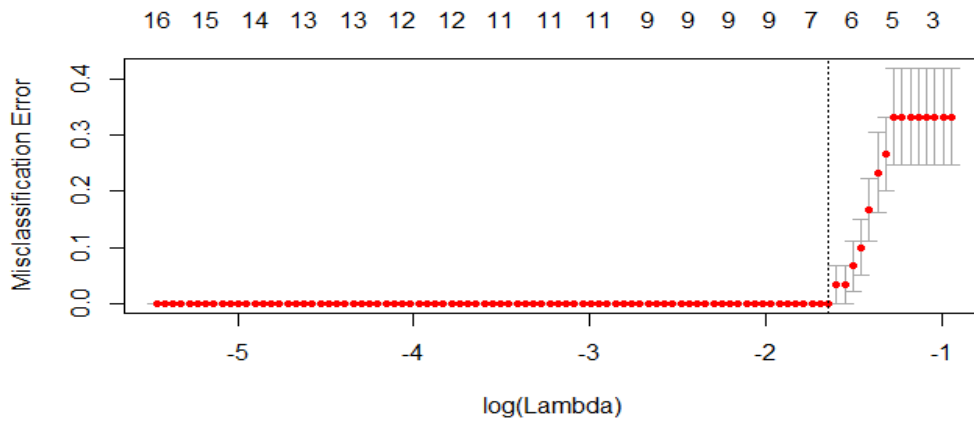


Figura 89: Plot correspondiente al análisis AB1-BTF-E0vsE4 (II)

### A1.3 ANÁLISIS BPF1

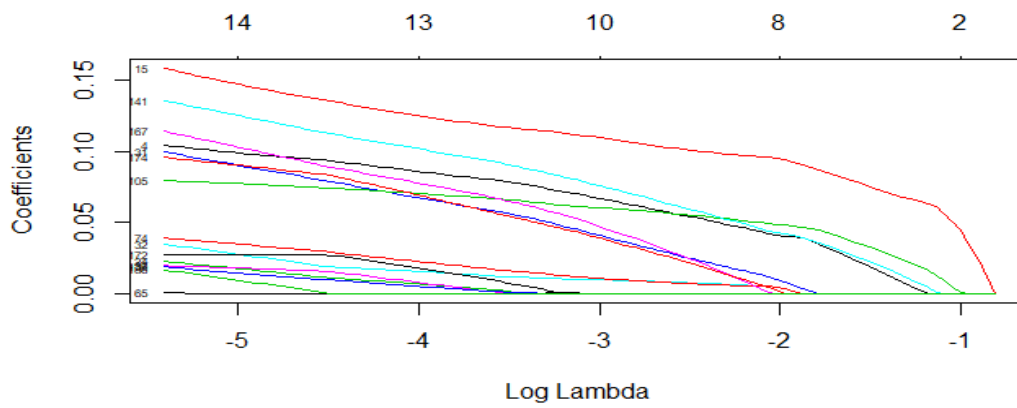


Figura 90: Plot correspondiente al análisis AB1-BPF1-E0vsE2

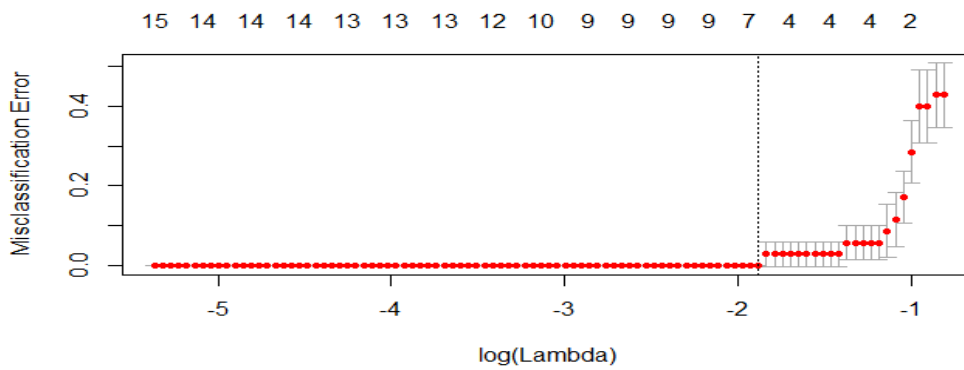


Figura 91: Plot correspondiente al análisis AB1-BPF1-E0vsE2 (II)

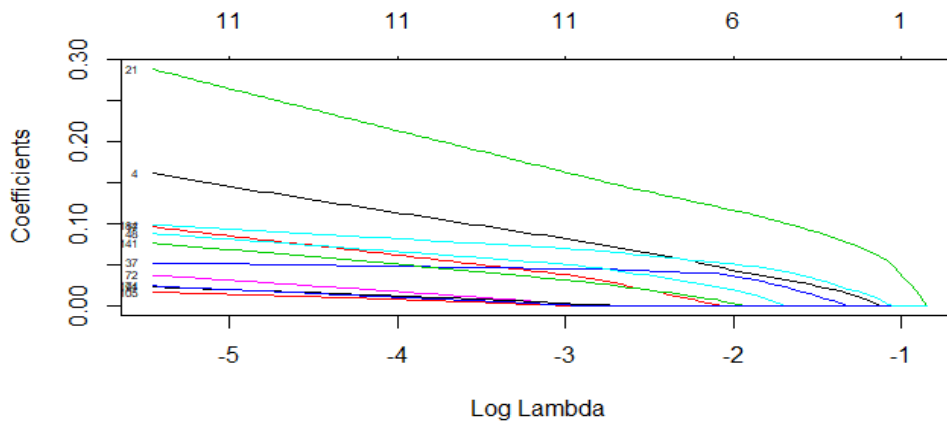


Figura 92: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE3

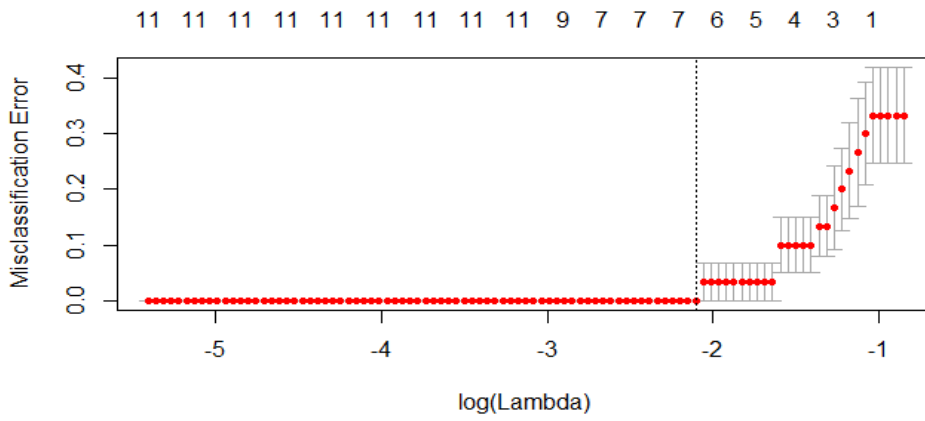


Figura 93: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE3 (II)

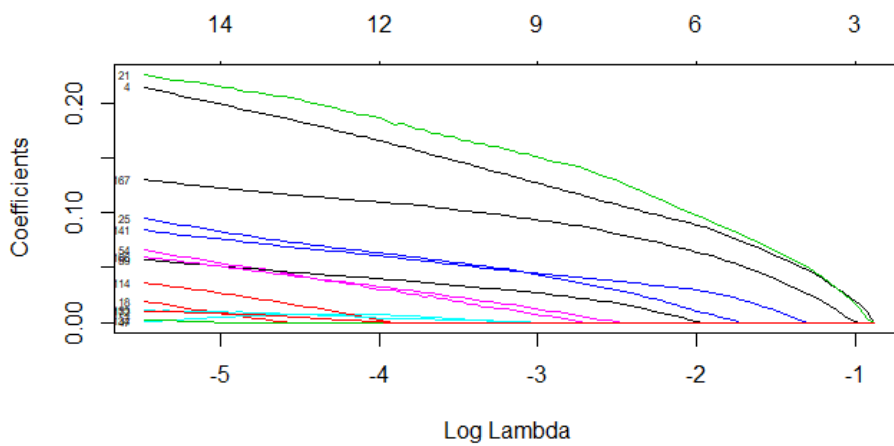


Figura 94: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE4

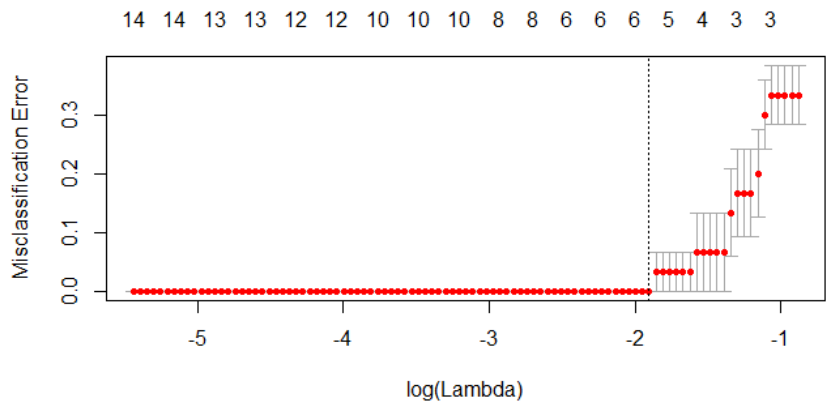


Figura 95: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFI-E0vsE4 (II)

### A1.4 ANÁLISIS BPFO

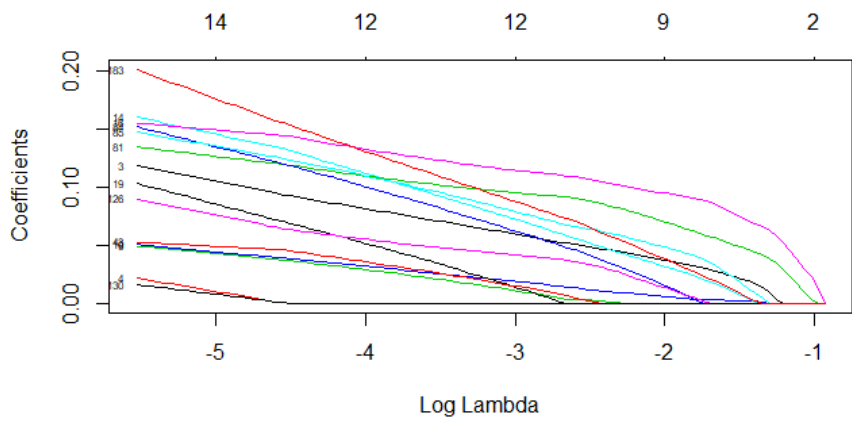


Figura 96: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE2

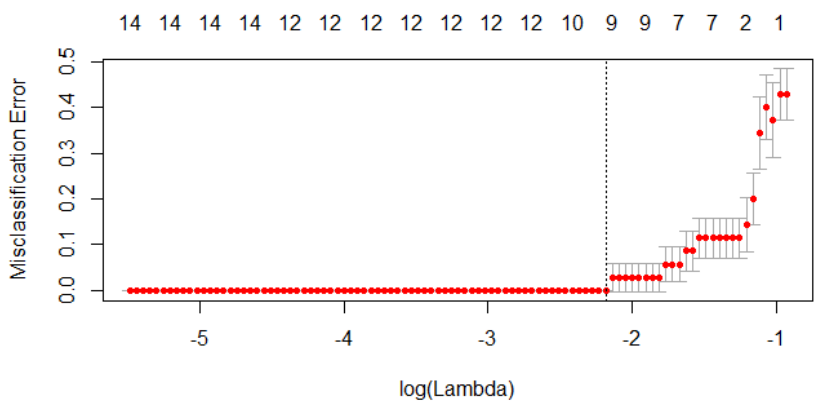


Figura 97: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE2 (II)

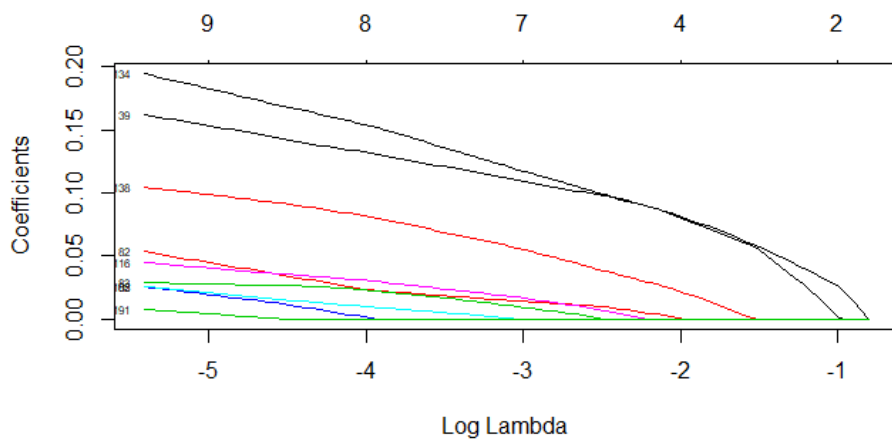


Figura 98: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE3

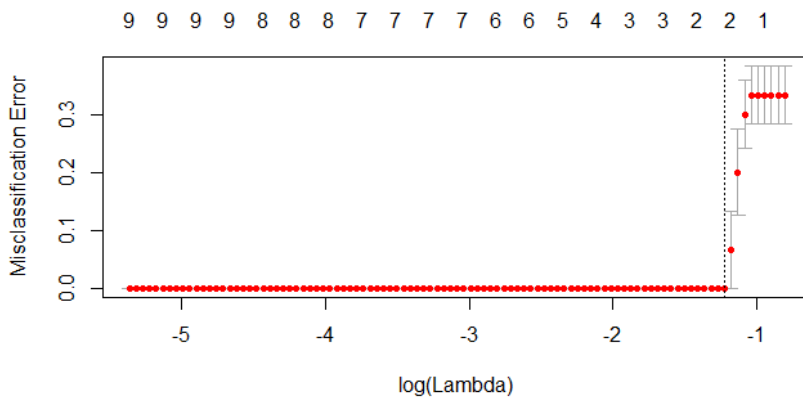


Figura 99: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE3 (II)

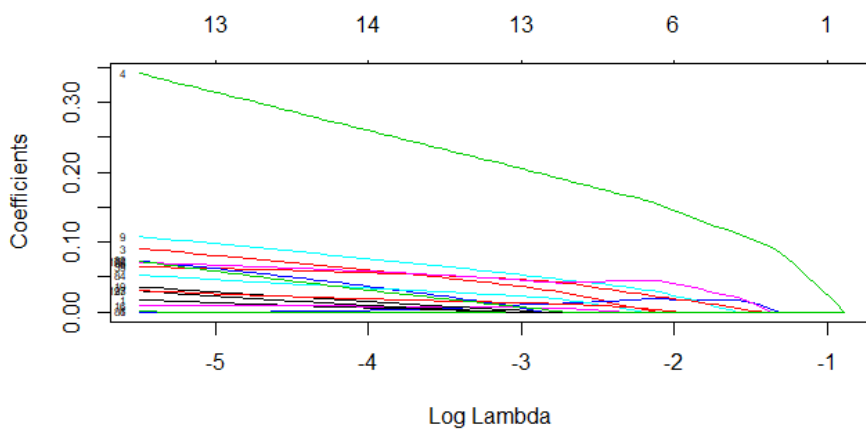


Figura 100: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE4 (II)



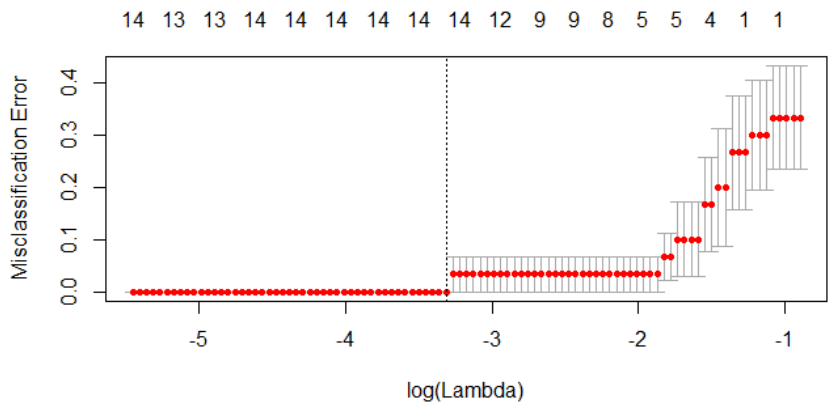


Figura 101: Plot correspondiente al análisis AB1-BPFO-E0vsE4 (II)

### A1.5 ANÁLISIS BSF

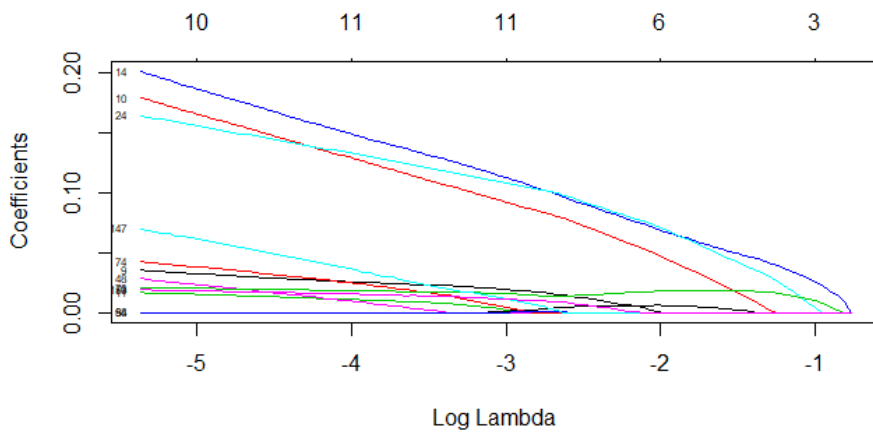


Figura 102: Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE2

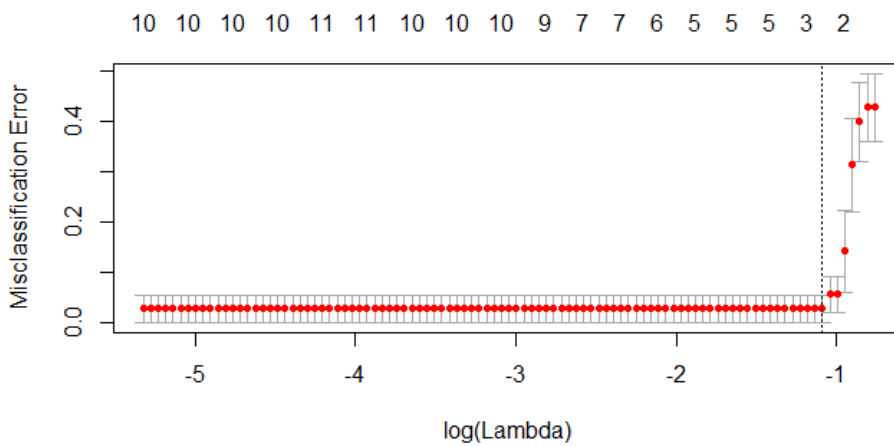


Figura 103: Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE2 (II)

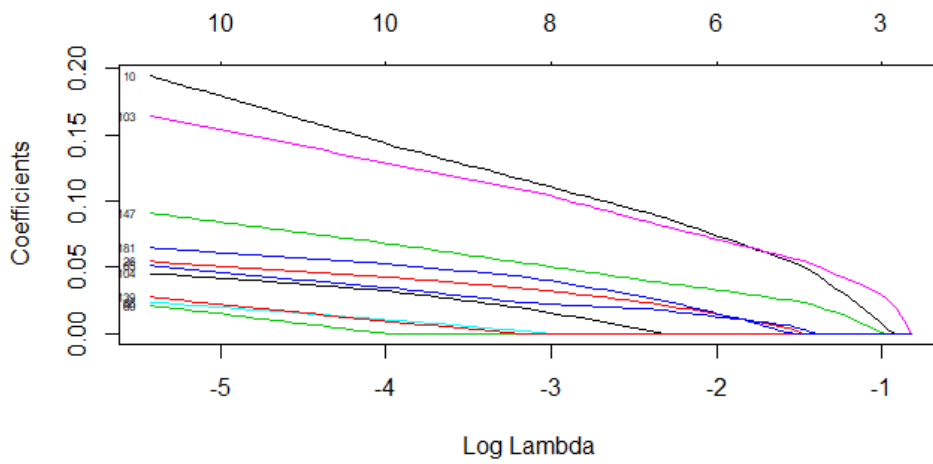


Figura 104: Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE3

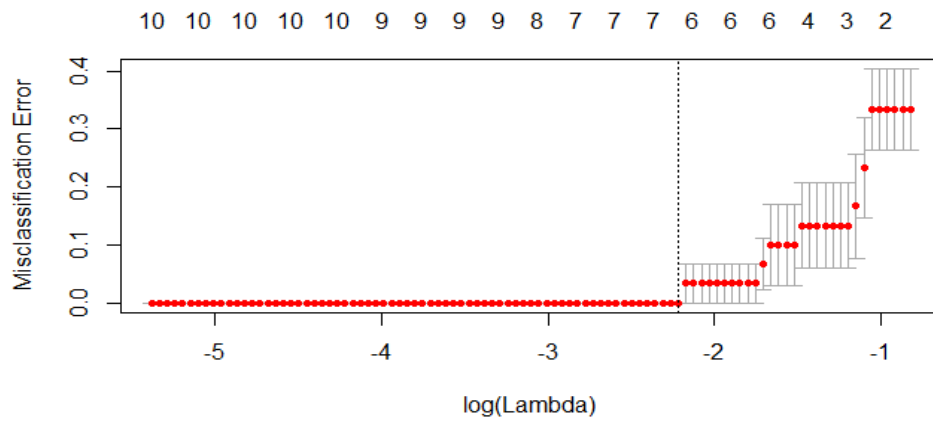


Figura 105: Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE3 (II)

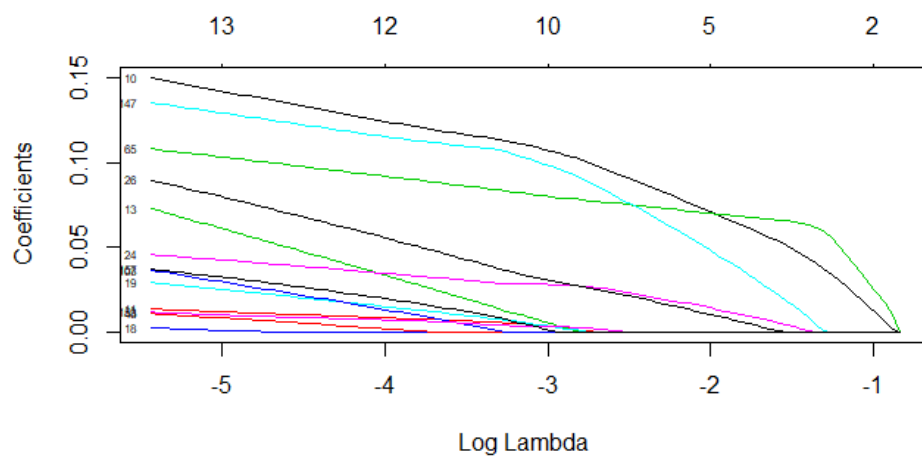


Figura 106: Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE4

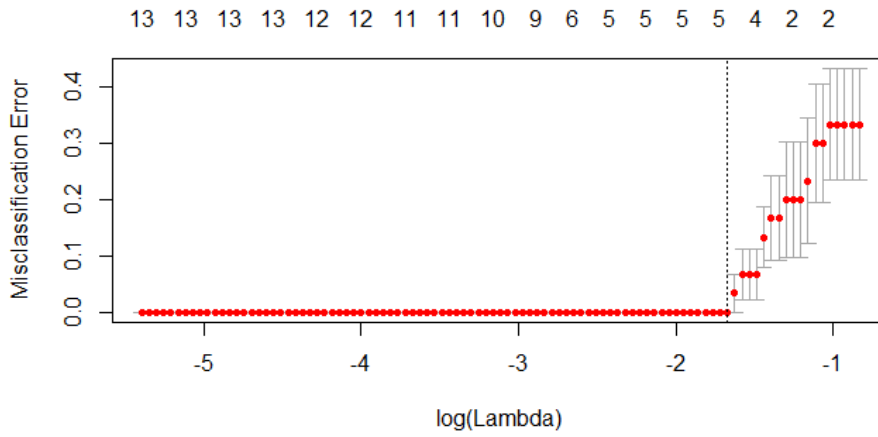


Figura 107: Plot correspondiente al análisis AB1-BSF-E0vsE4 (II)

## A2. ANÁLISIS DE AB2

### A2.1 ANÁLISIS COMPLETO

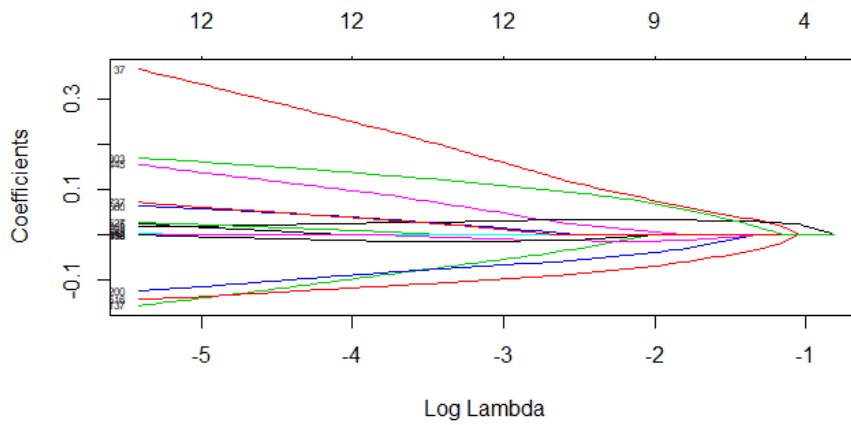


Figura 108: Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE1

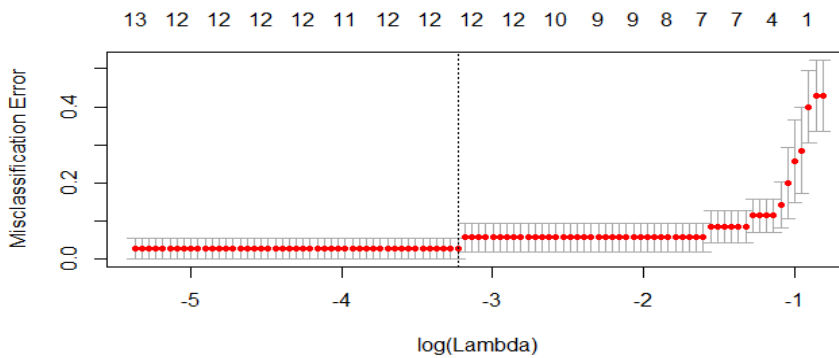


Figura 109: Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE1 (II)

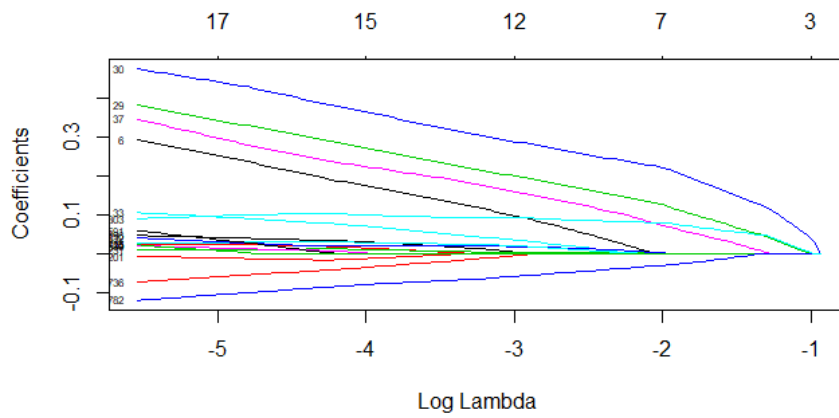


Figura 110: Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE2

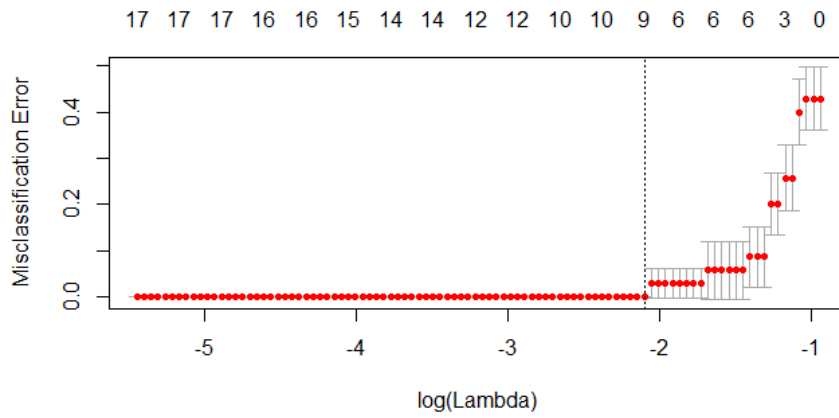


Figura 111: Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE2 (II)

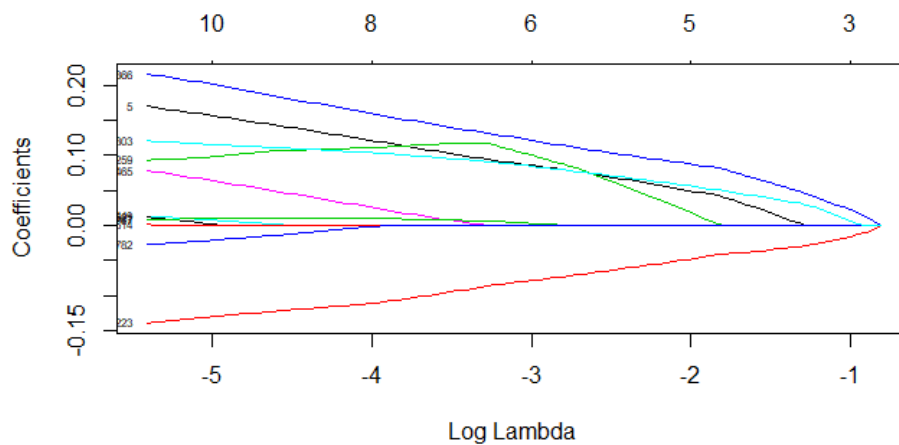


Figura 112: Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE3

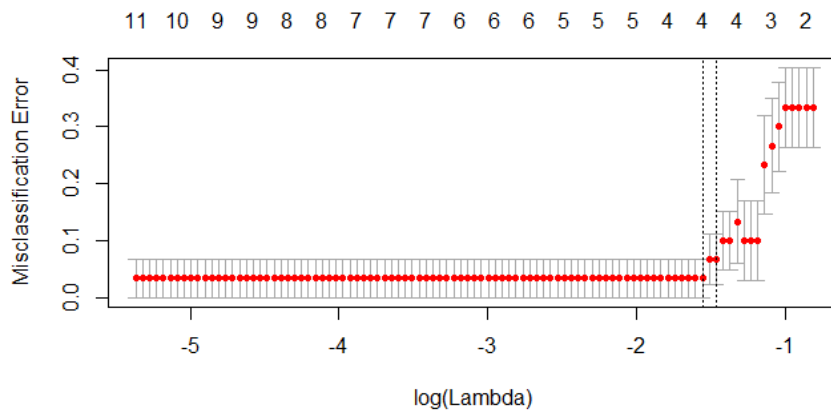


Figura 113: Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE3 (II)

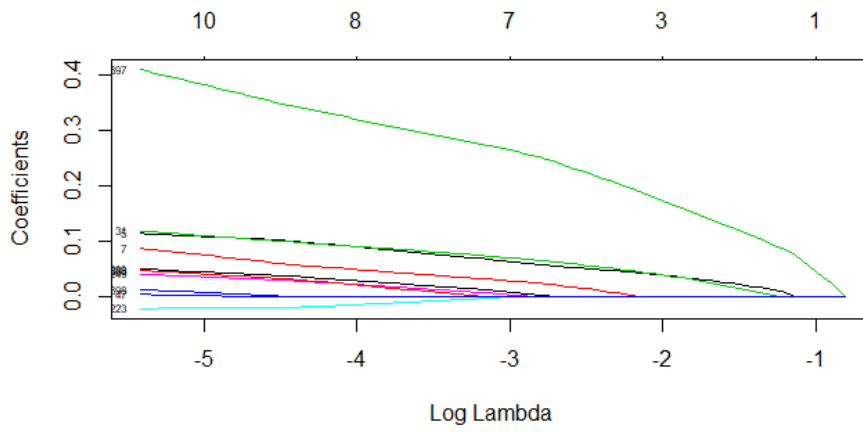


Figura 114: Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE4

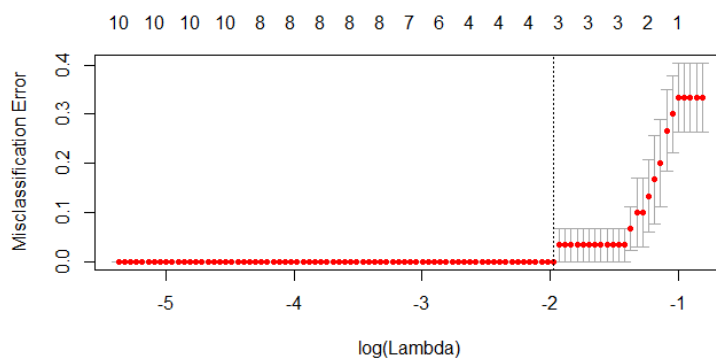


Figura 115: Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE4 (II)

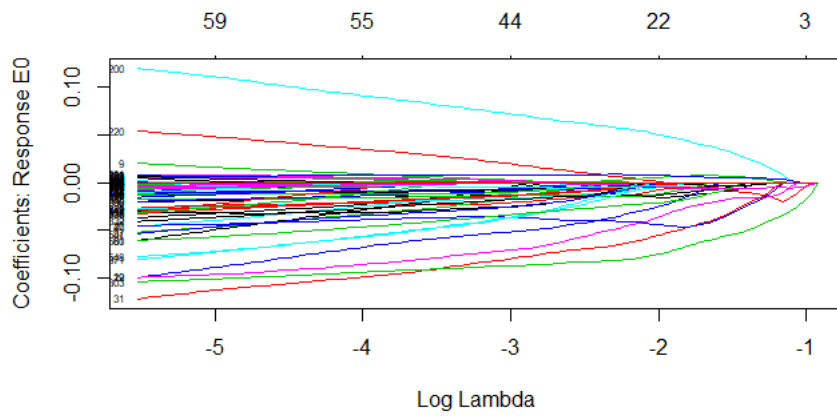


Figura 116: Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

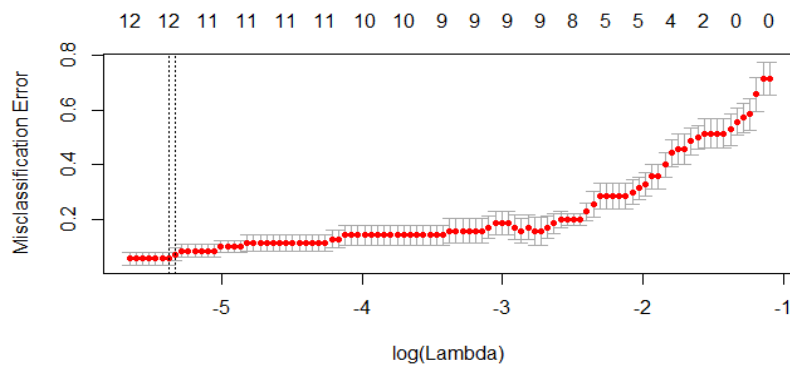


Figura 117: Plot correspondiente al análisis AB2-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A2.2 ANÁLISIS BFTF

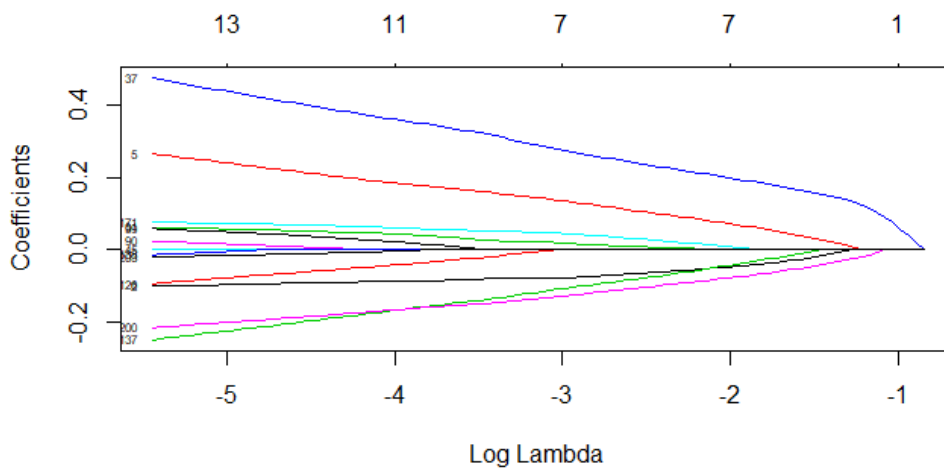


Figura 118: Plot correspondiente al análisis AB2-BFTF-E0vsE1

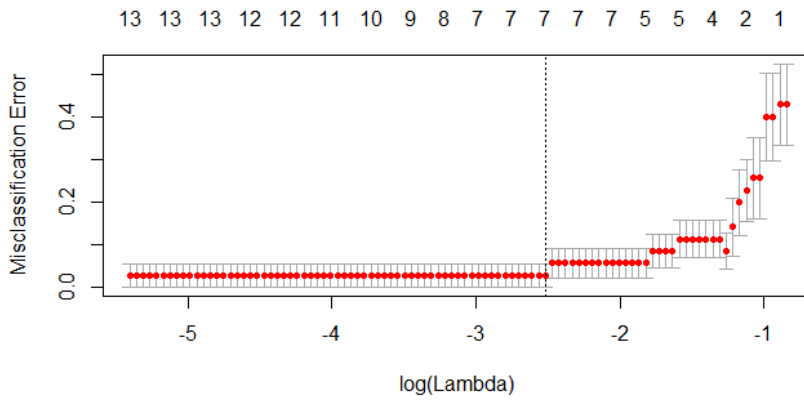


Figura 119: Plot correspondiente al análisis AB2-BFTF-E0vsE1 (II)

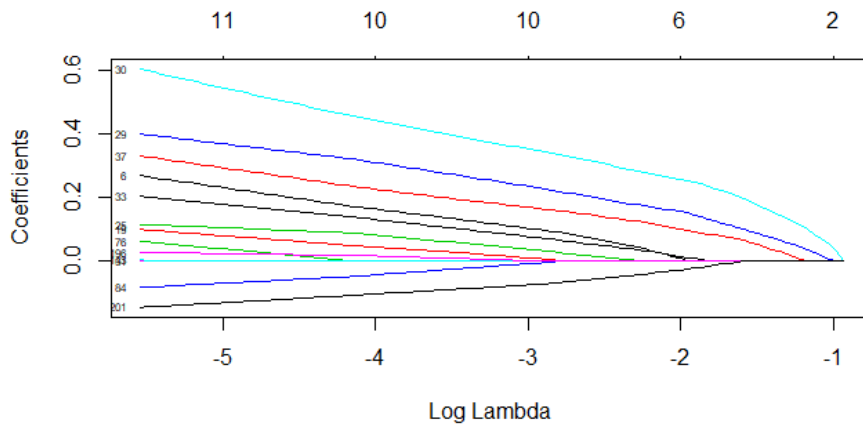


Figura 120: Plot correspondiente al análisis AB2-BFTF-E0vsE2

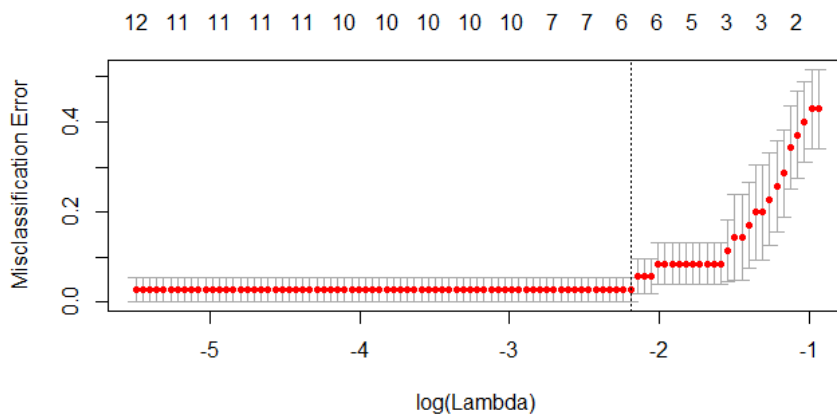


Figura 121: Plot correspondiente al análisis AB2-BFTF-E0vsE2 (II)

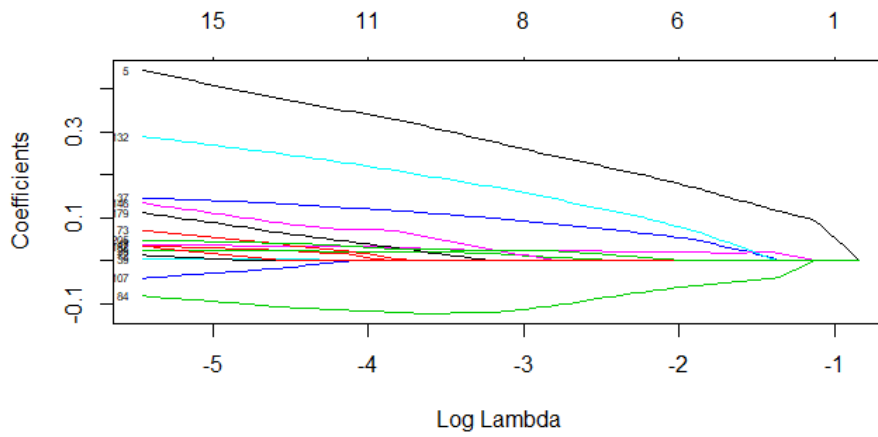


Figura 122: Plot correspondiente al análisis AB2-BFTF-E0vsE3

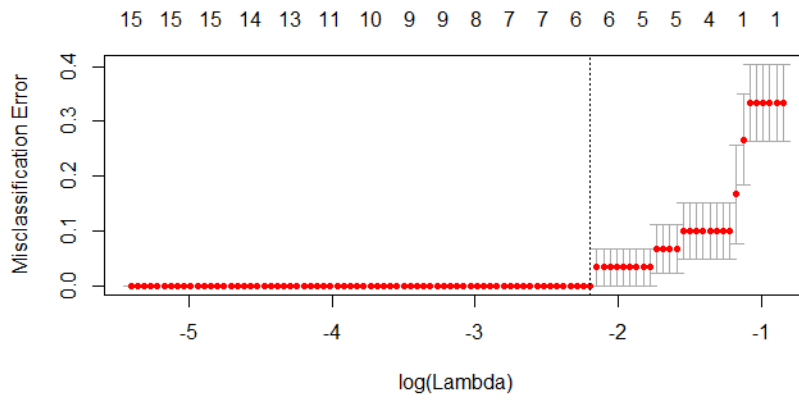


Figura 123: Plot correspondiente al análisis AB2-BFTF-E0vsE3 (II)

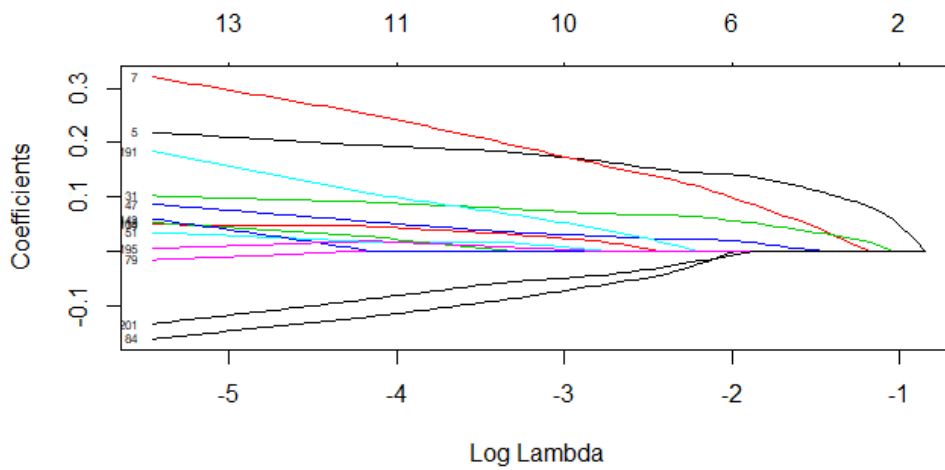


Figura 124: Plot correspondiente al análisis AB2-BFTF-E0vsE4



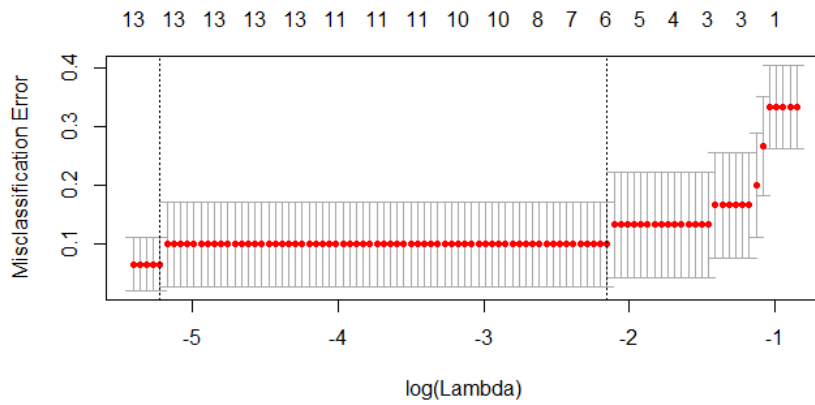


Figura 125: Plot correspondiente al análisis AB2-BFTF-E0vsE4 (II)

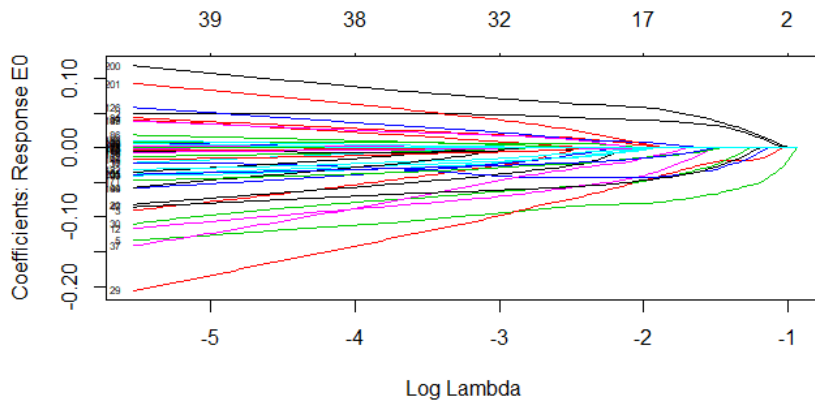


Figura 126: Plot correspondiente al análisis AB2-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

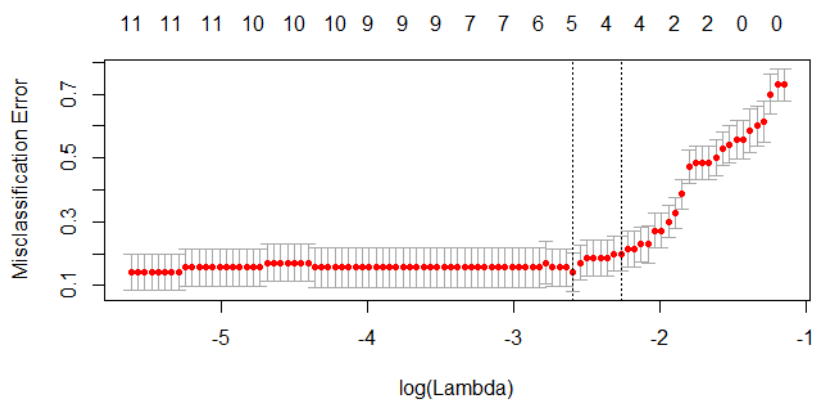


Figura 127: Plot correspondiente al análisis AB2-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A2.3 ANÁLISIS BPFI

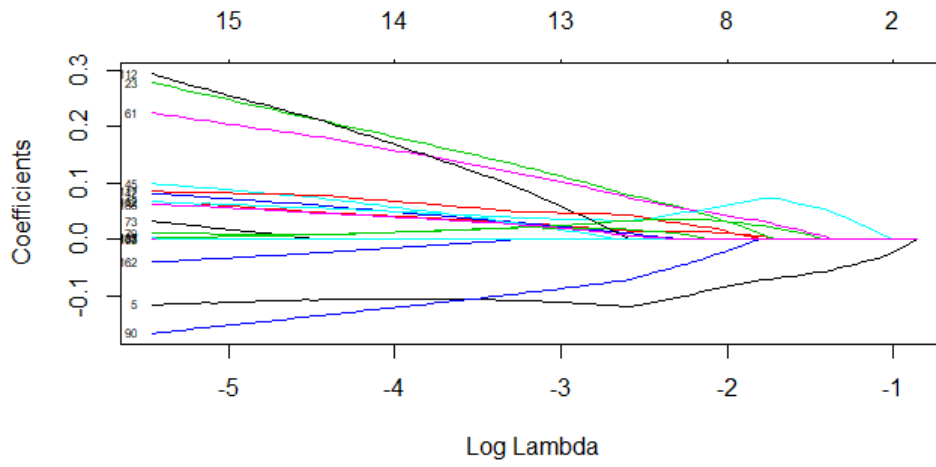


Figura 128: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE1

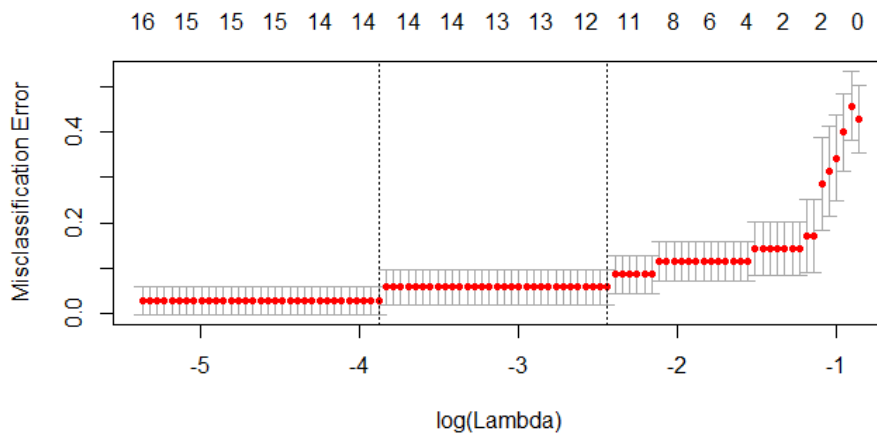


Figura 129: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE1 (II)

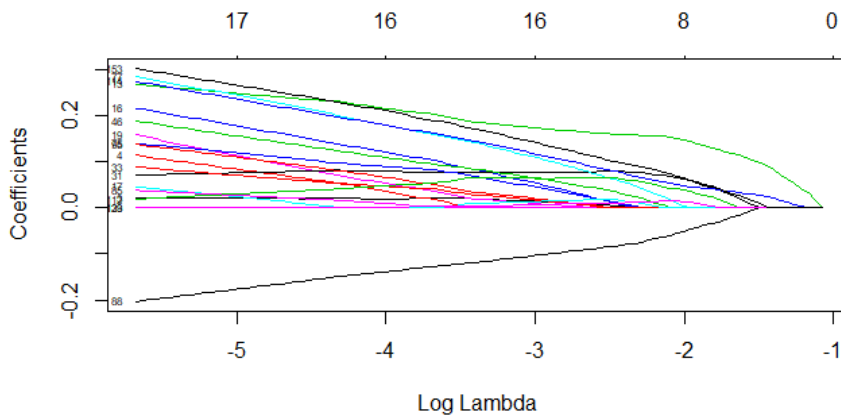


Figura 130: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE2

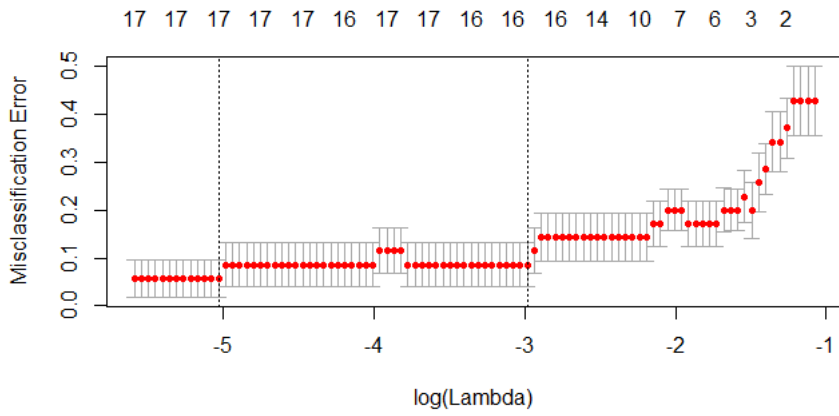


Figura 131: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE2 (II)

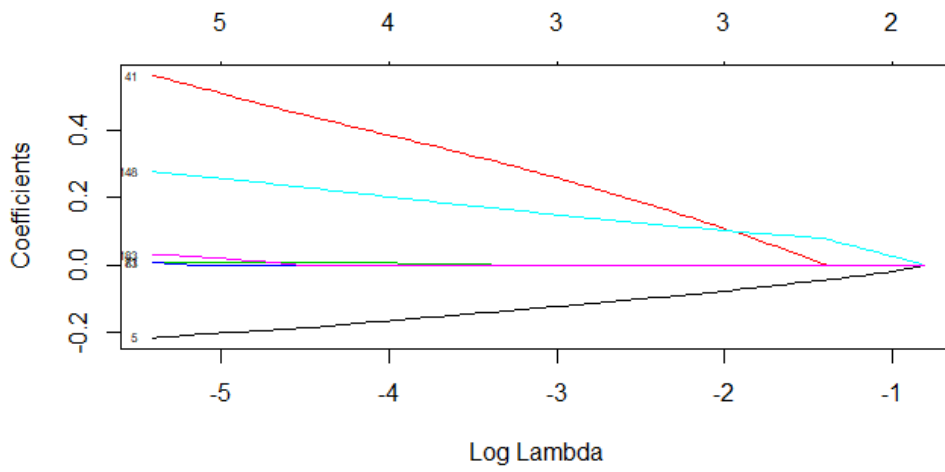


Figura 132: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE3

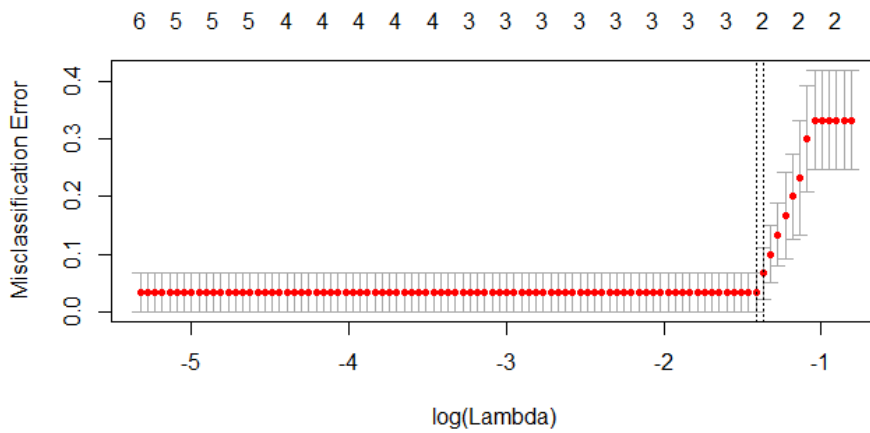


Figura 133: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE3 (II)

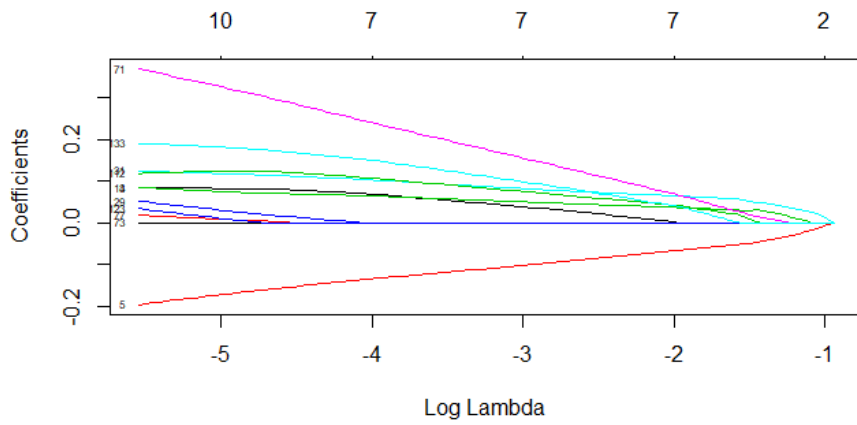


Figura 134: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE4

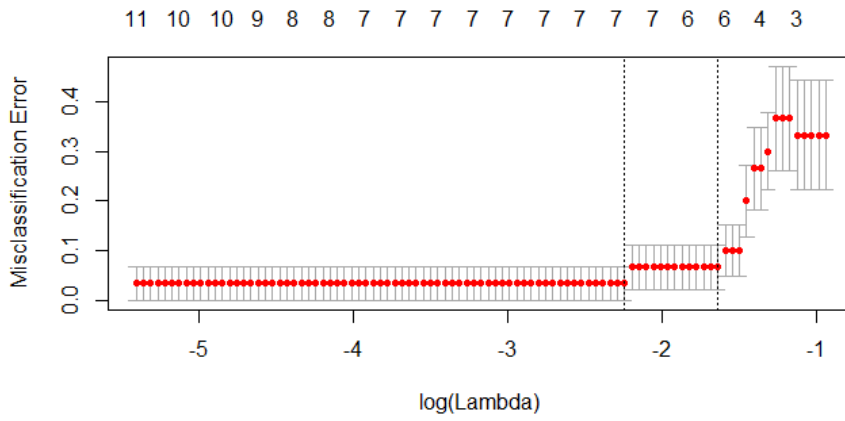


Figura 135: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE4 (II)

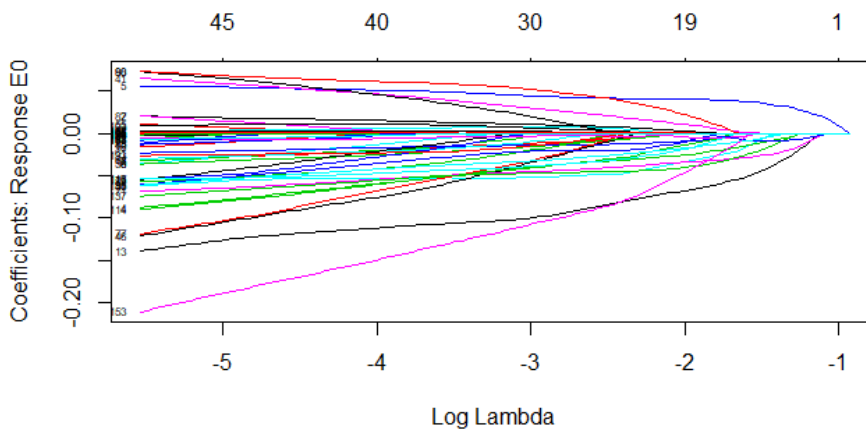


Figura 136: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

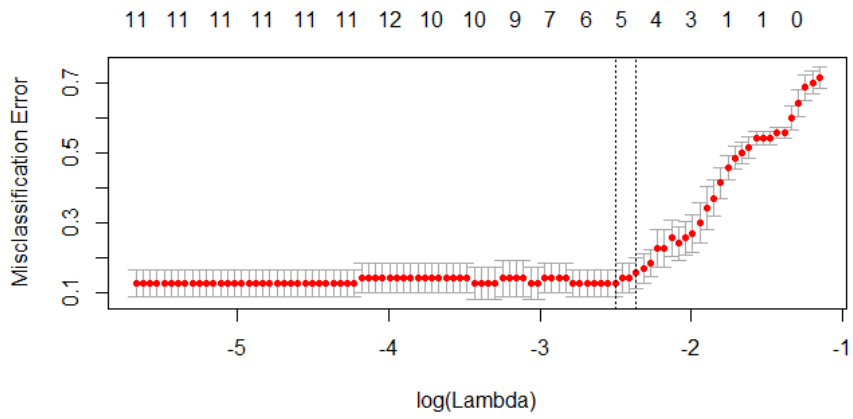


Figura 137: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A2.4 ANÁLISIS BPFO

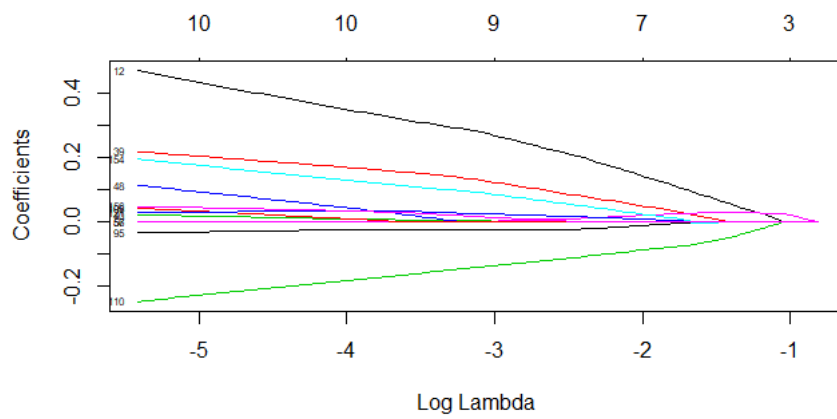


Figura 138: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE1

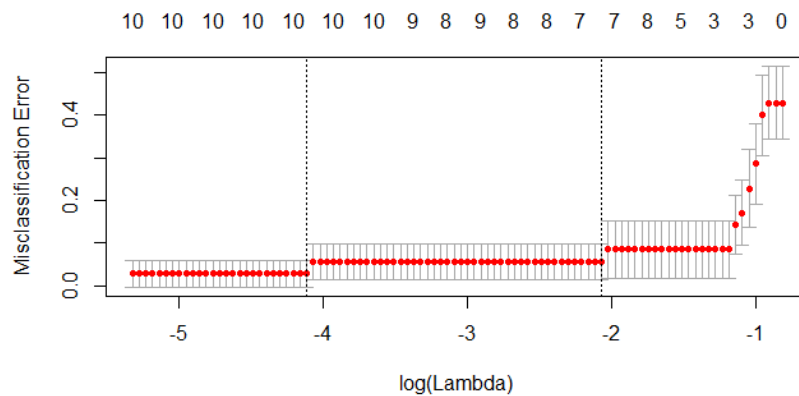


Figura 139: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE1 (II)

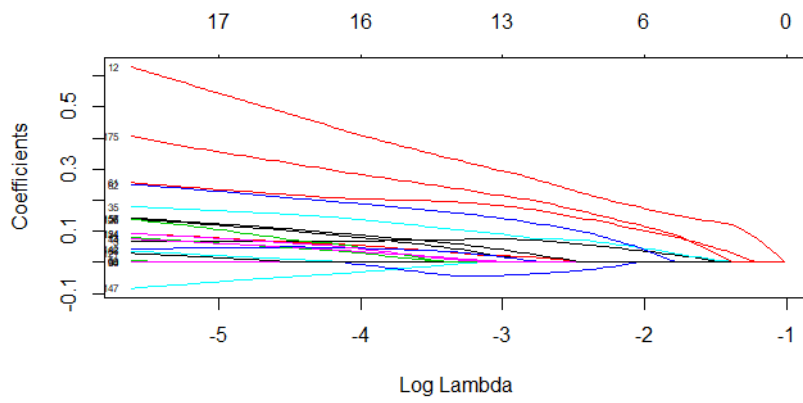


Figura 140: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE2

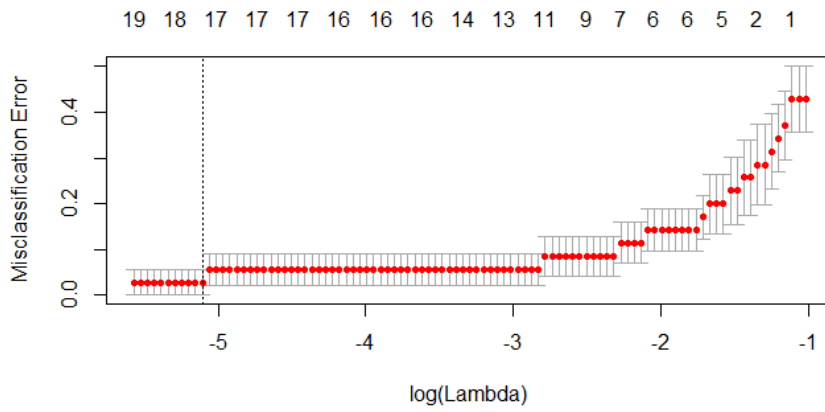


Figura 141: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE2 (II)

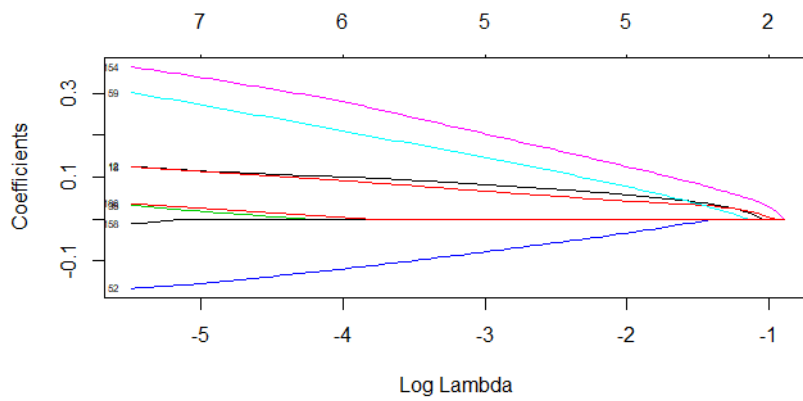


Figura 142: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE3

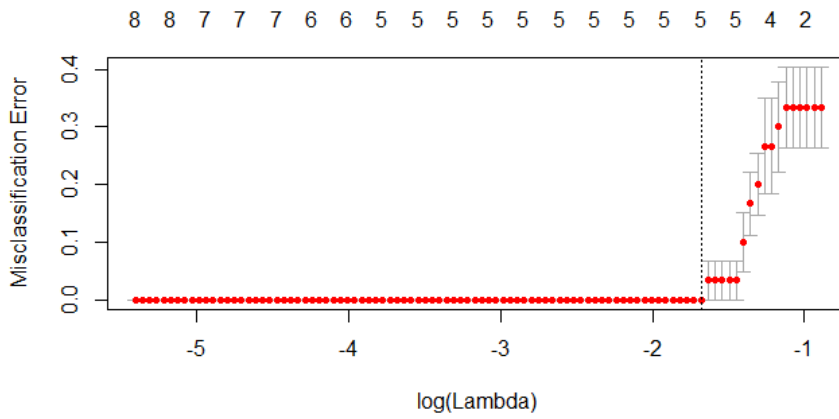


Figura 143: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE3 (II)

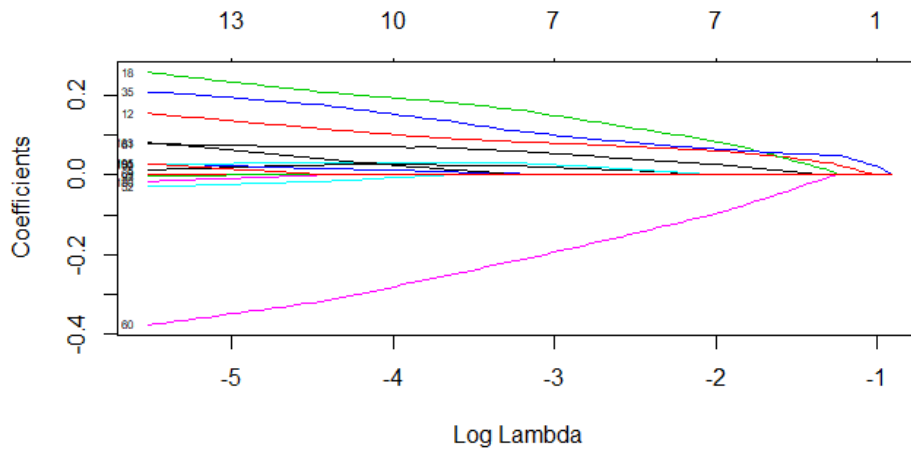


Figura 144: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE4

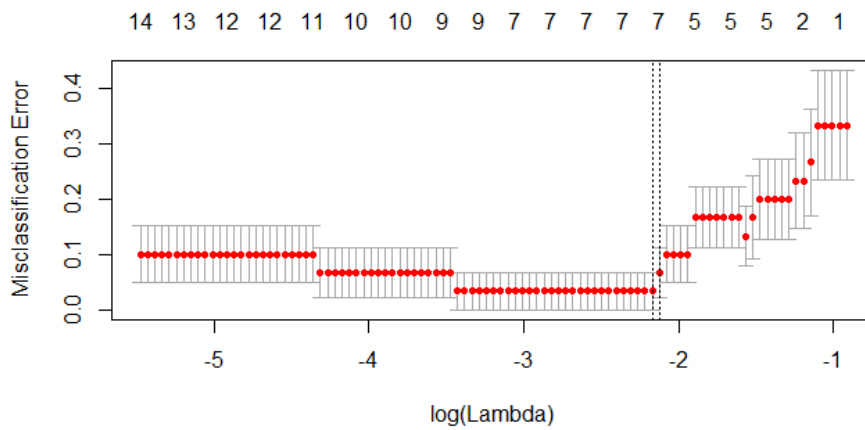


Figura 145: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE4 (II)

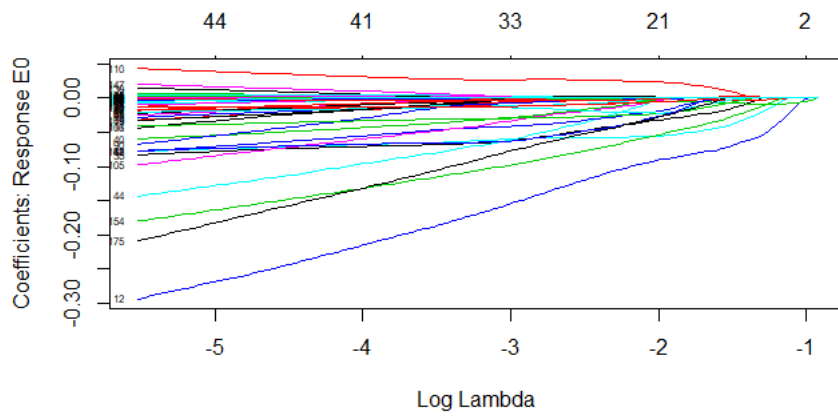


Figura 146: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

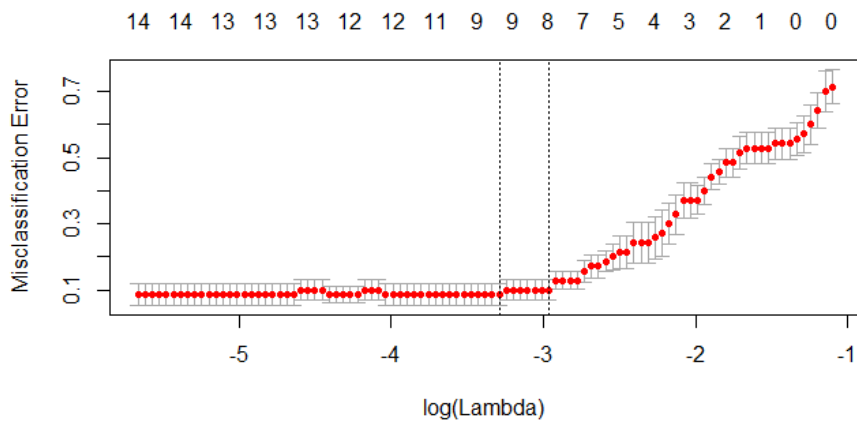


Figura 147: Plot correspondiente al análisis AB2-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A2.5 ANÁLISIS BSF

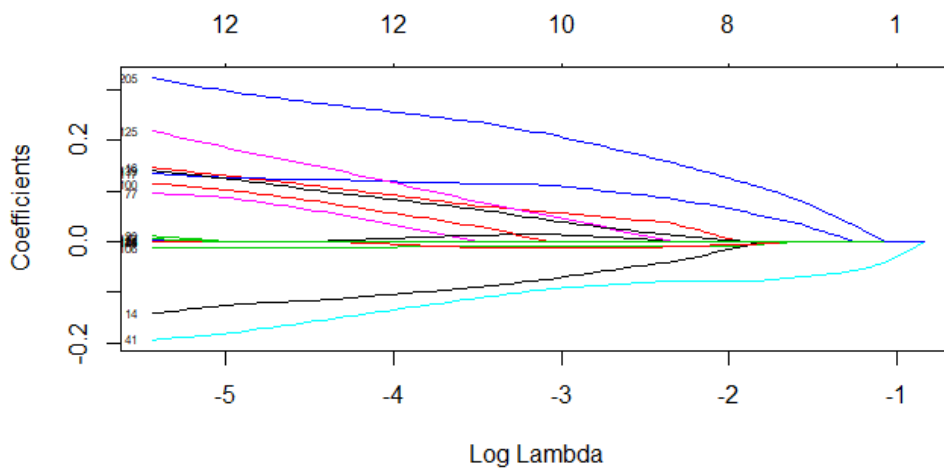


Figura 148: Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE1



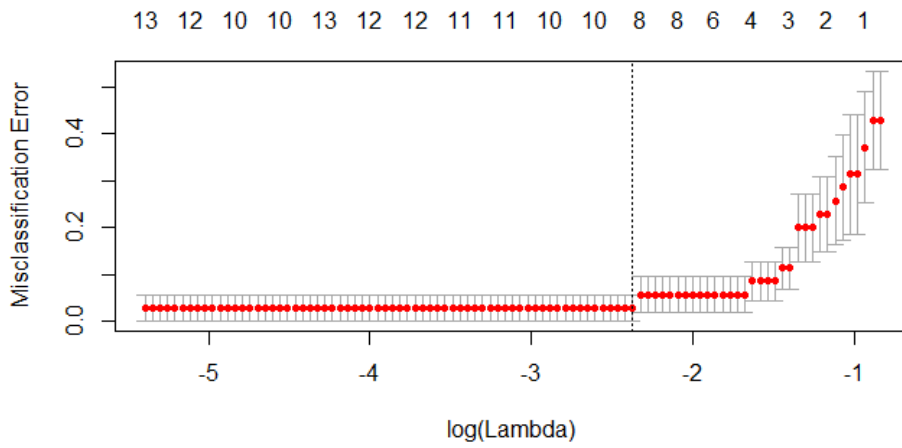


Figura 149: Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE1 (II)

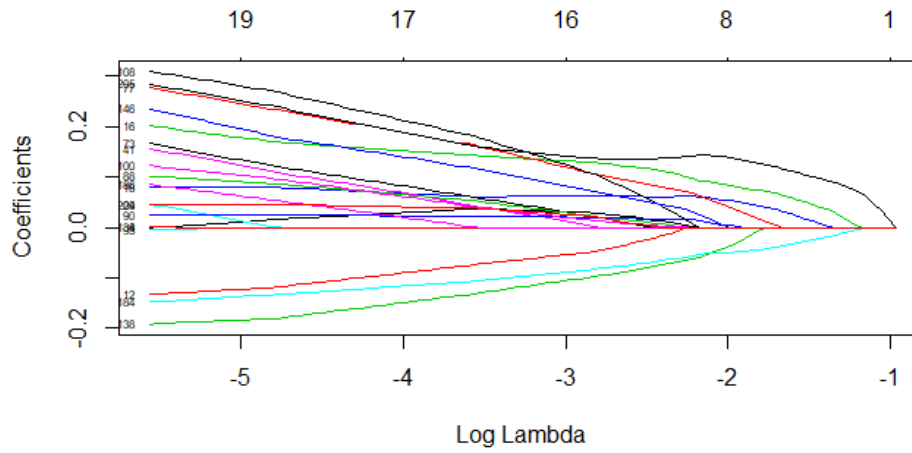


Figura 150: Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE2

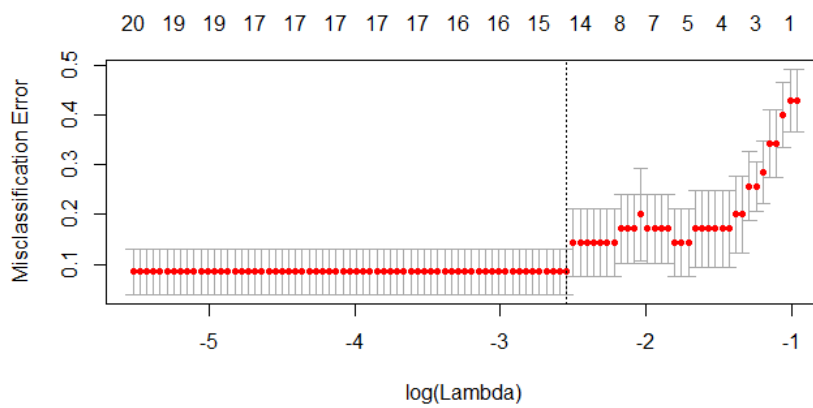


Figura 151: Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE2 (II)

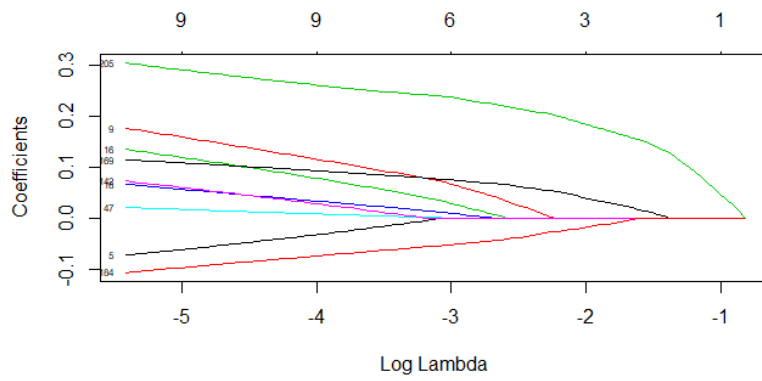


Figura 152: Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE3

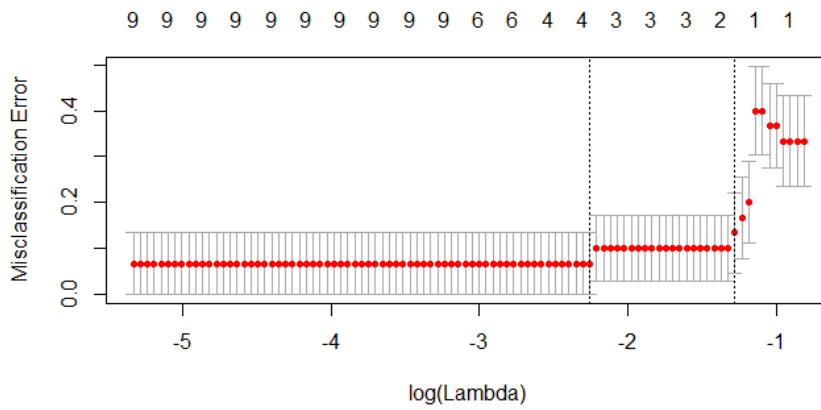


Figura 153: Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE3 (II)

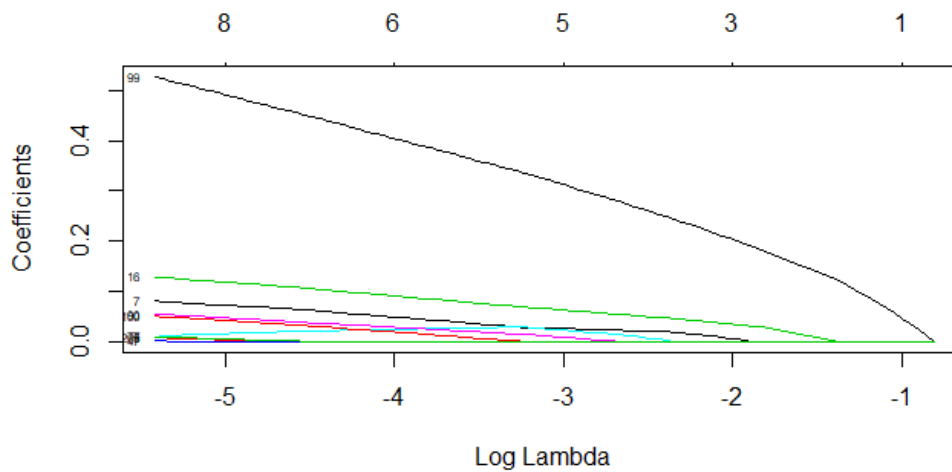


Figura 154: Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE4

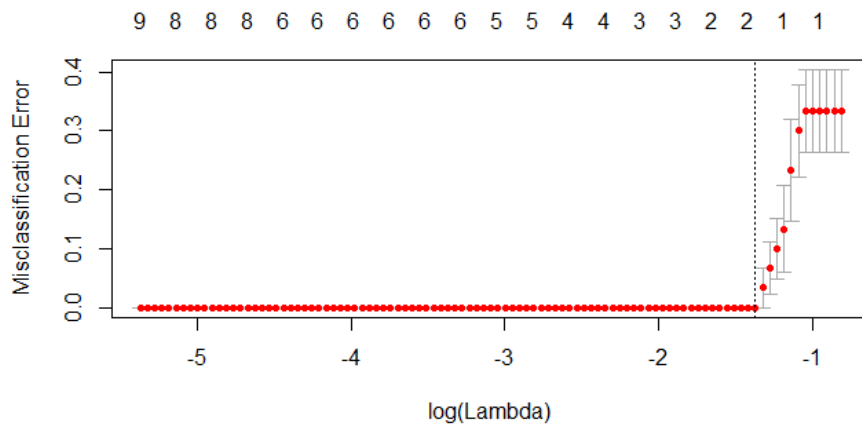


Figura 155: Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE4 (II)

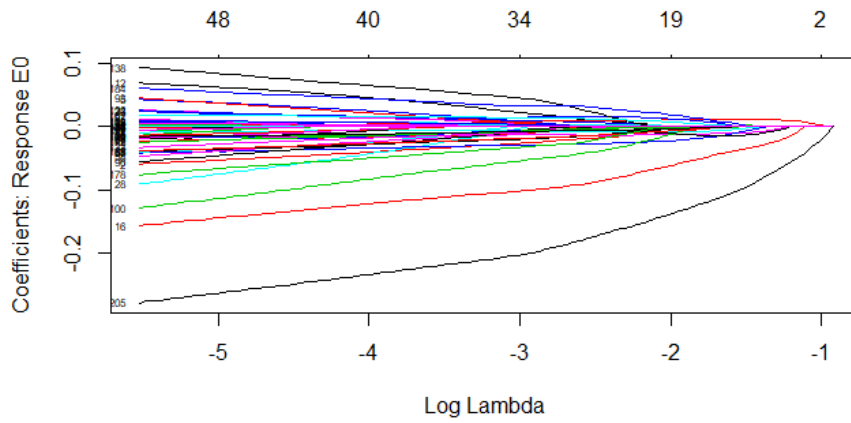


Figura 156: Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

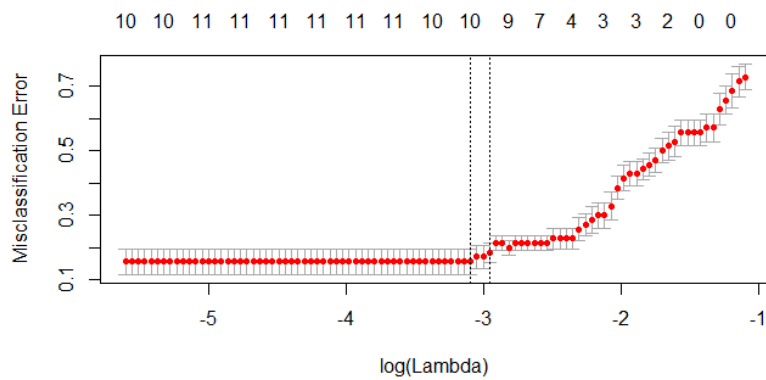


Figura 157: Plot correspondiente al análisis AB2-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A3. ANÁLISIS DE AB3

### A3.1 ANÁLISIS COMPLETO

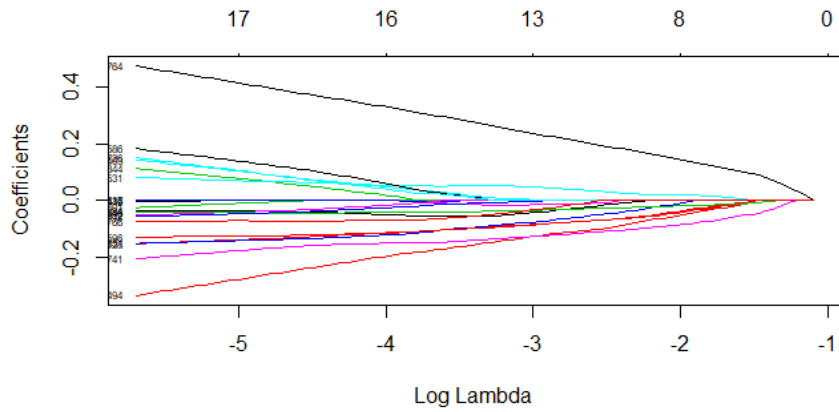


Figura 158: Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE1

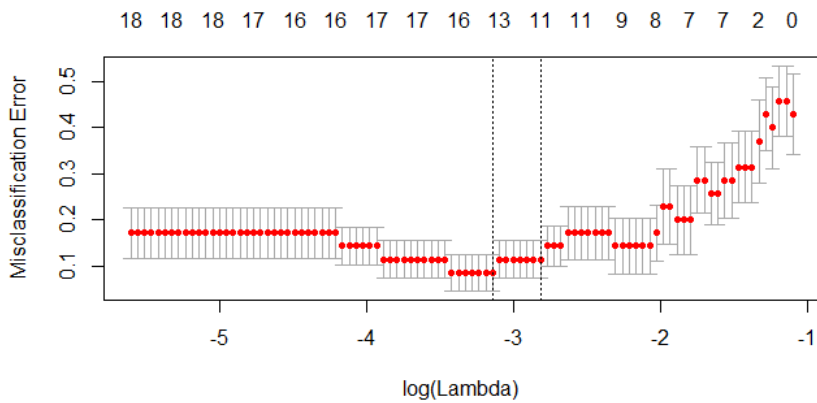


Figura 159: Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE1 (II)

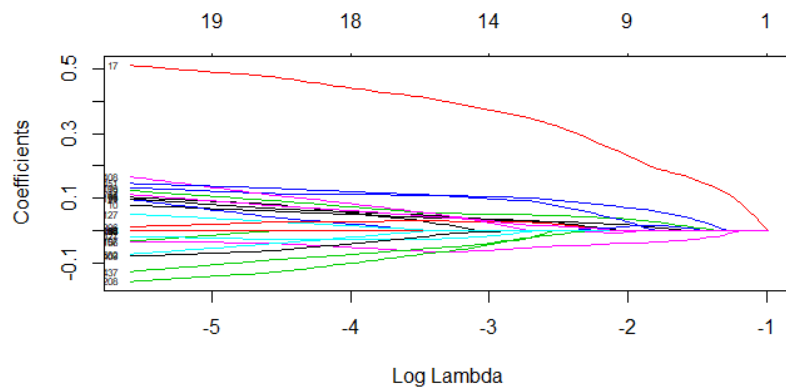


Figura 160: Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE2

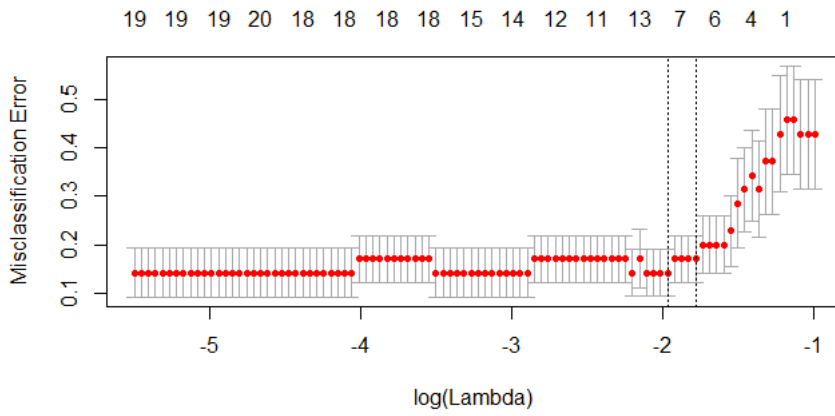


Figura 161: Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE2 (II)

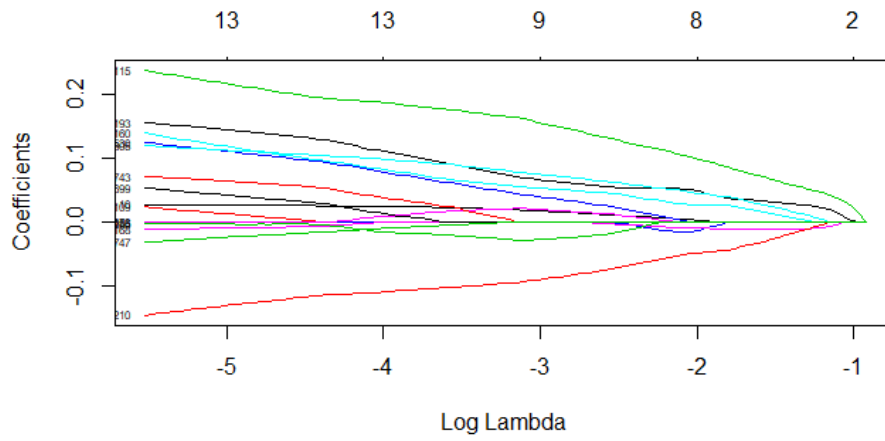


Figura 162: Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE3

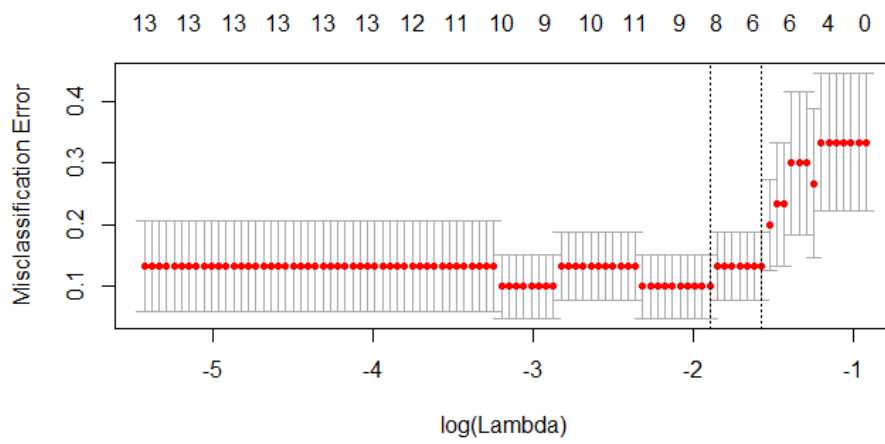


Figura 163: Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE3 (II)

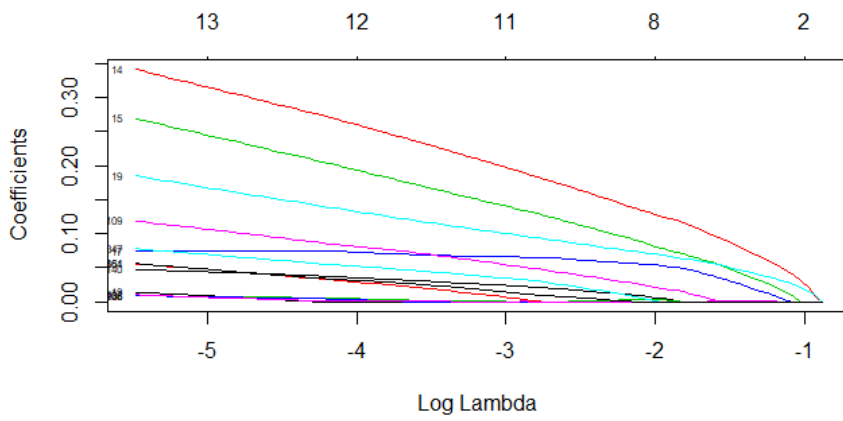


Figura 164: Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE4

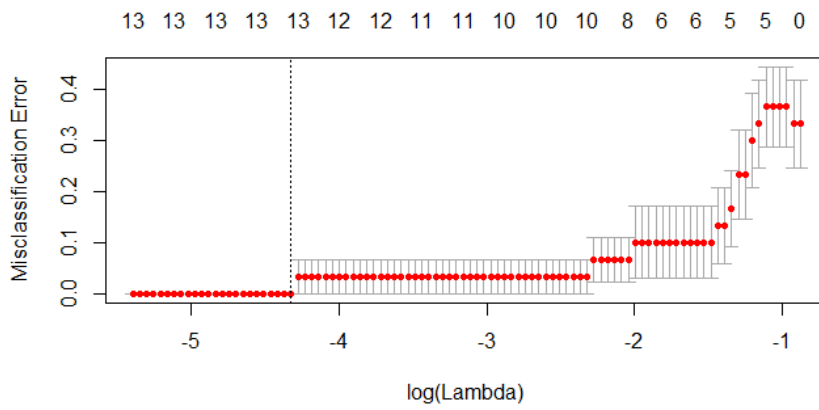


Figura 165: Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE4 (II)

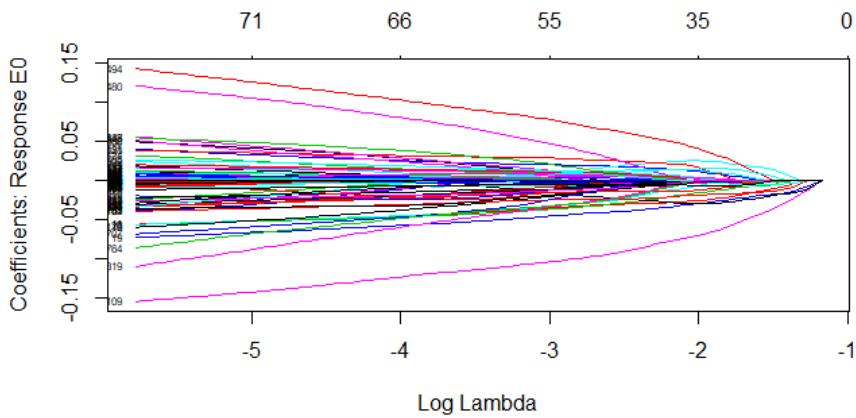


Figura 166: Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

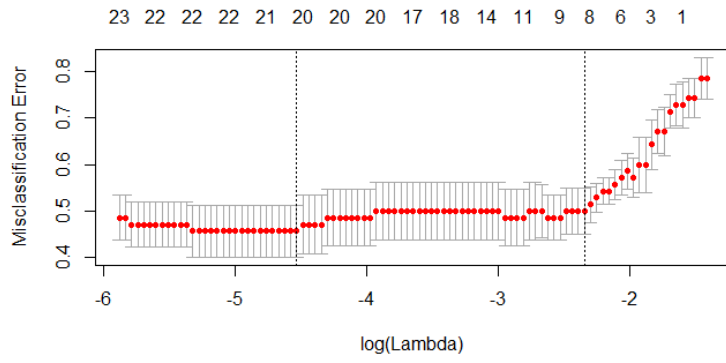


Figura 167: Plot correspondiente al análisis AB3-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

### A3.2 ANÁLISIS BFTF

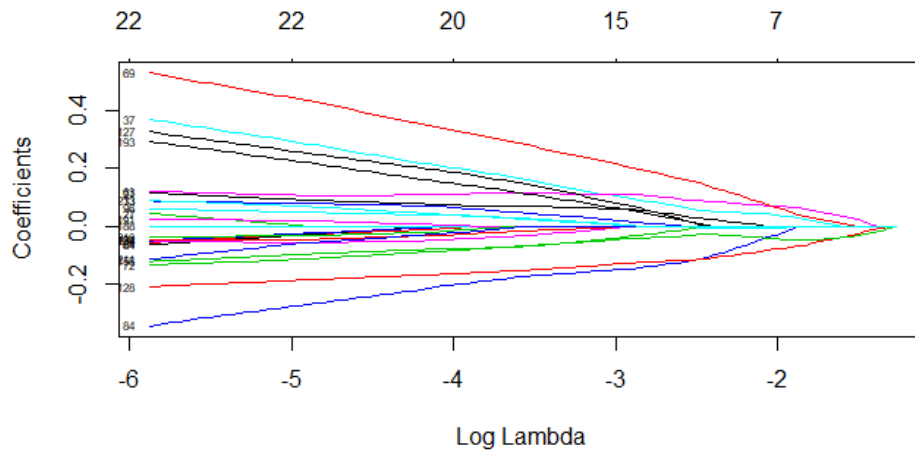


Figura 168: Plot correspondiente al análisis AB3-BFTF-E0vsE1

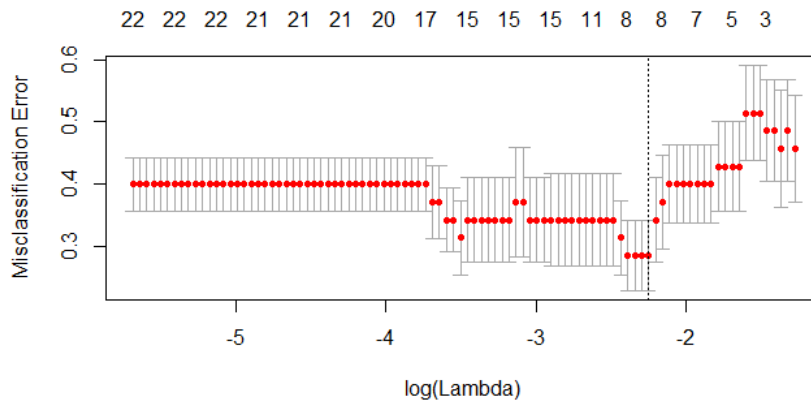


Figura 169: Plot correspondiente al análisis AB3-BFTF-E0vsE1 (II)

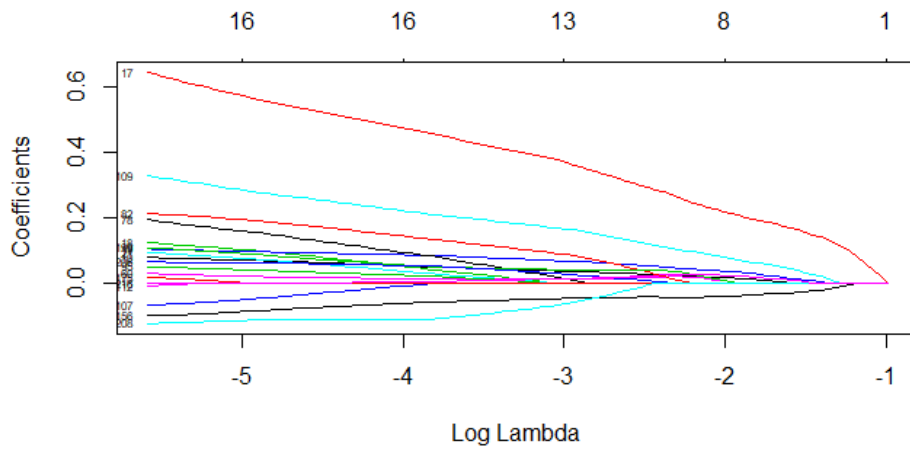


Figura 170: Plot correspondiente al análisis AB3-BFTF-E0vsE2

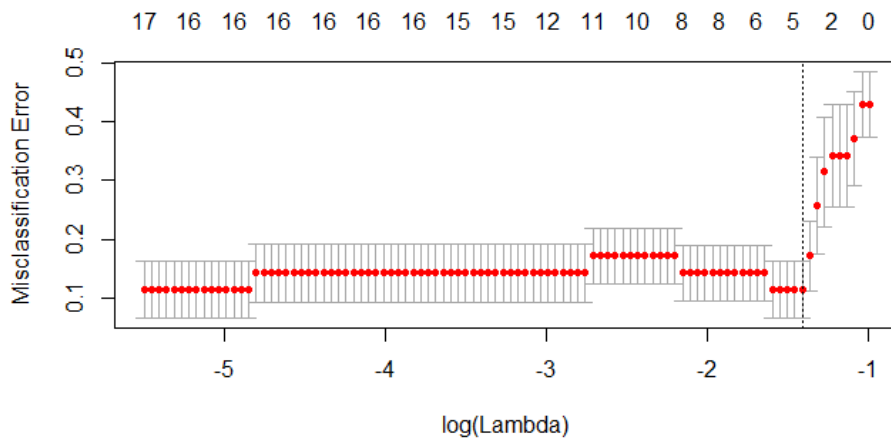


Figura 171: Plot correspondiente al análisis AB3-BFTF-E0vsE2 (II)

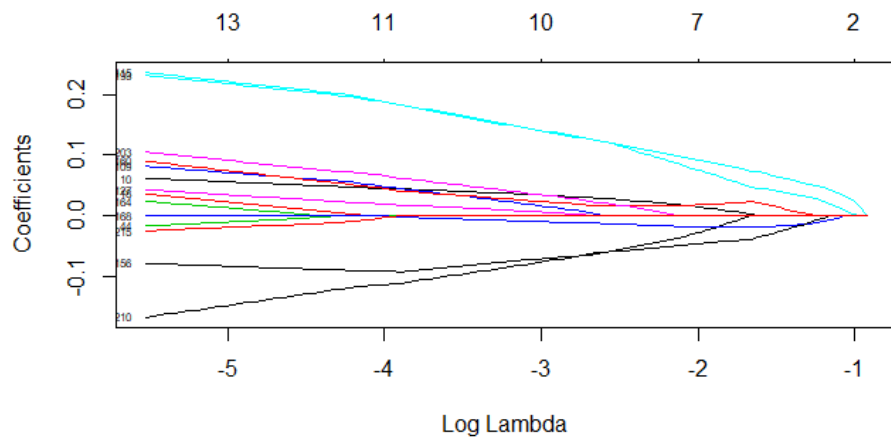


Figura 172: Plot correspondiente al análisis AB3-BFTF-E0vsE3



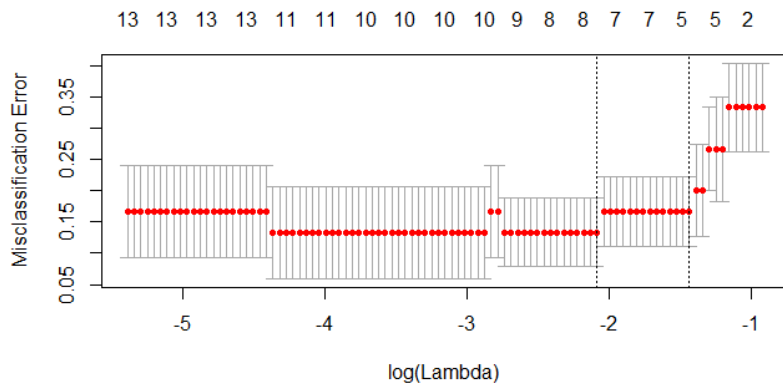


Figura 173: Plot correspondiente al análisis AB3-BFTF-E0vsE3 (II)

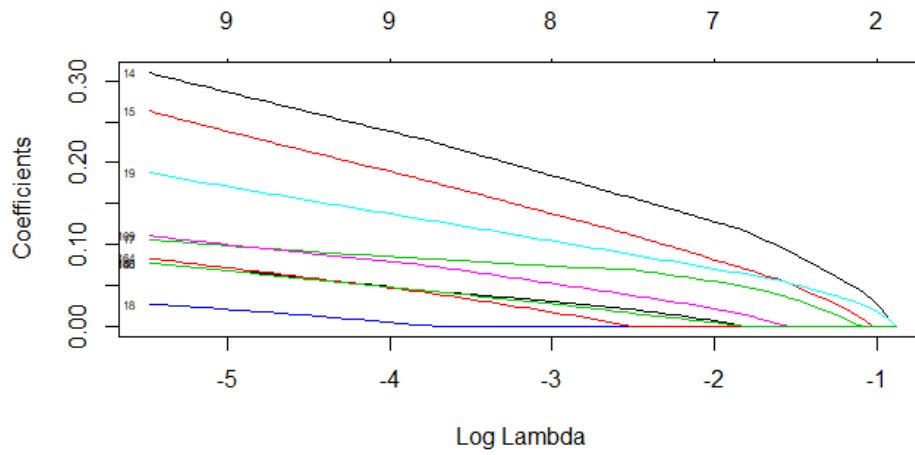


Figura 174: Plot correspondiente al análisis AB3-BFTF-E0vsE4

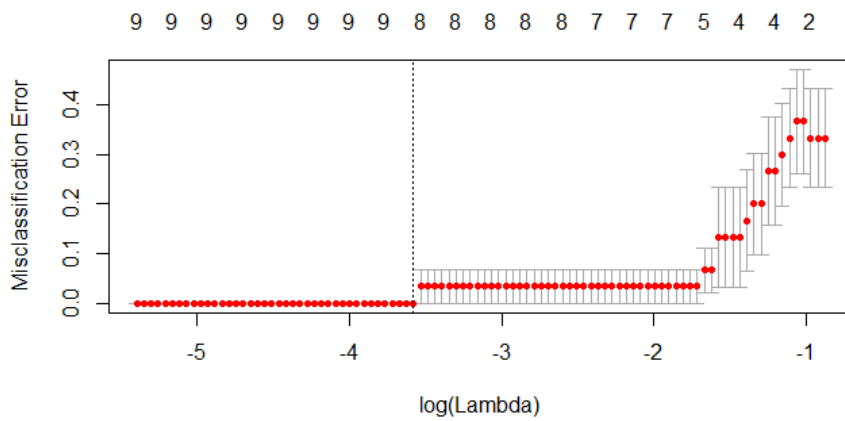


Figura 175: Plot correspondiente al análisis AB3-BFTF-E0vsE4 (II)

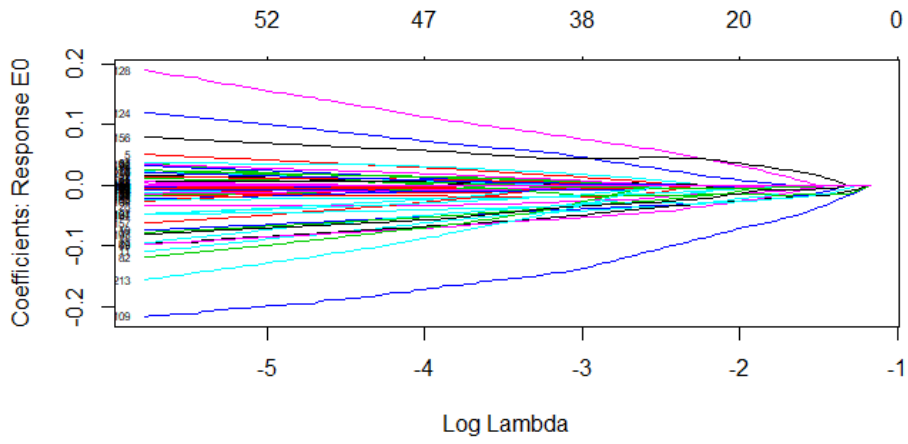


Figura 176: Plot correspondiente al análisis AB3-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

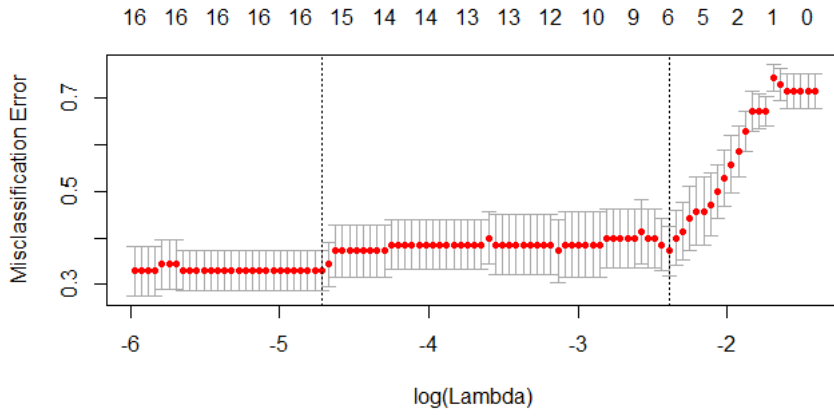


Figura 177: Plot correspondiente al análisis AB3-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

### A3.3 ANÁLISIS BPGI

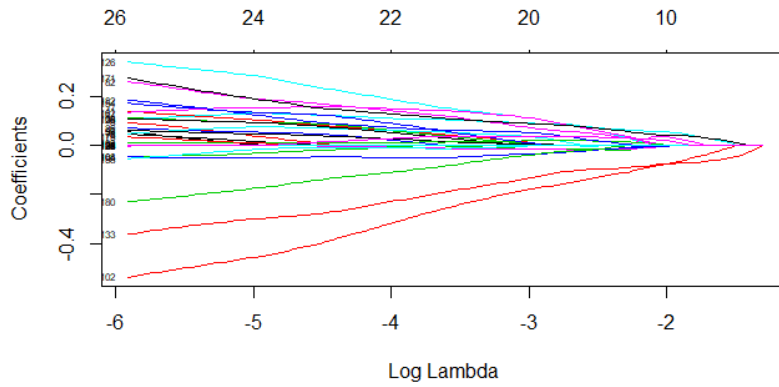


Figura 178: Plot correspondiente al análisis AB3-BPGI-E0vsE1

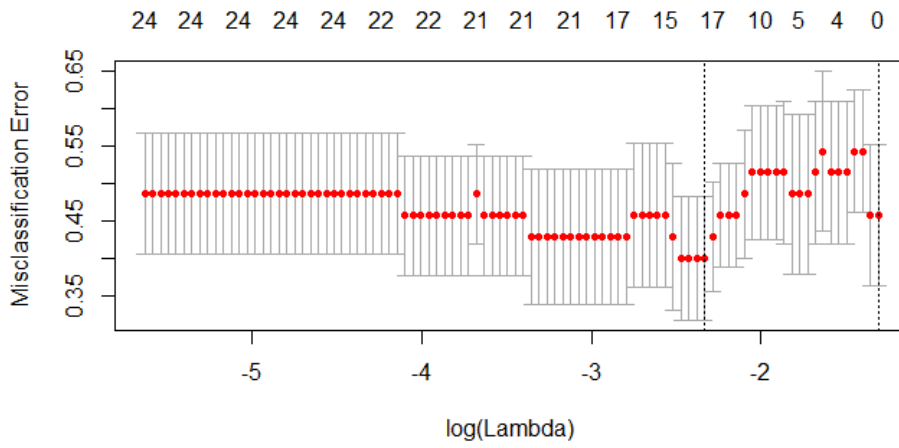


Figura 179: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE1 (II)

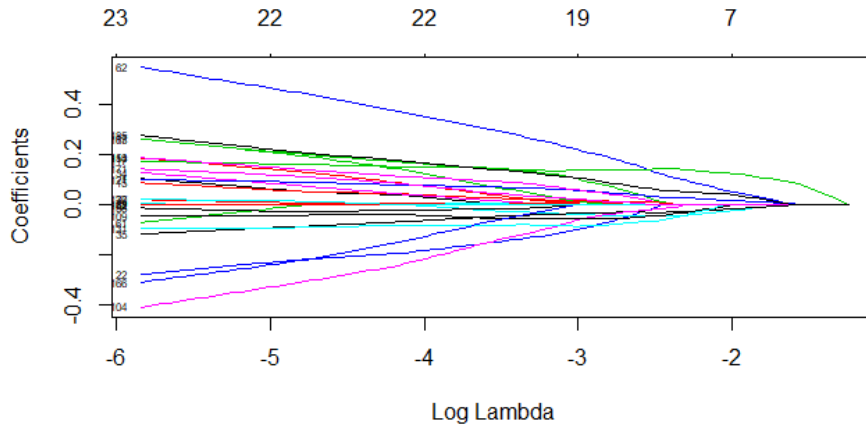


Figura 180: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE2

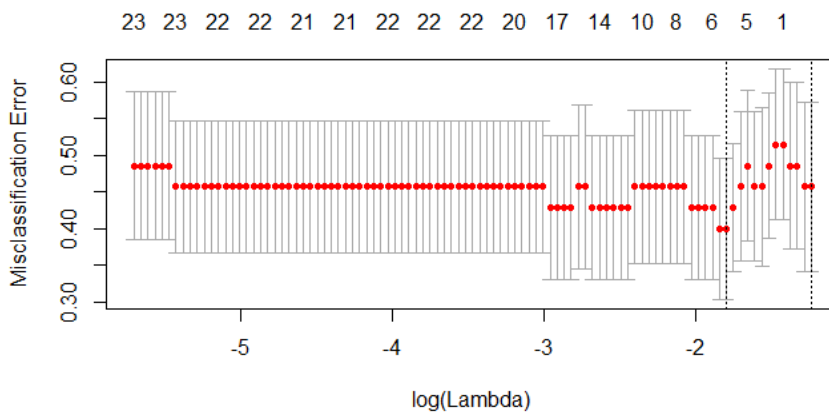


Figura 181: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE2 (II)

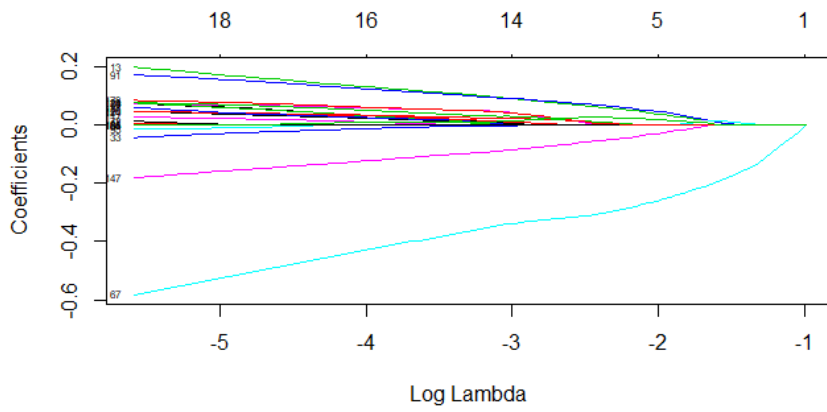


Figura 182: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE3

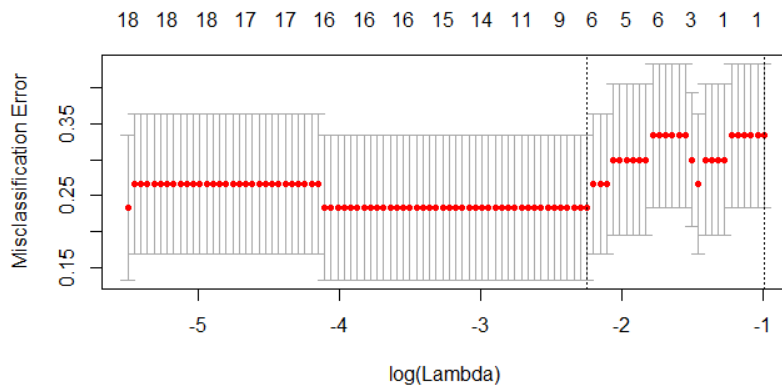


Figura 183: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE3 (II)

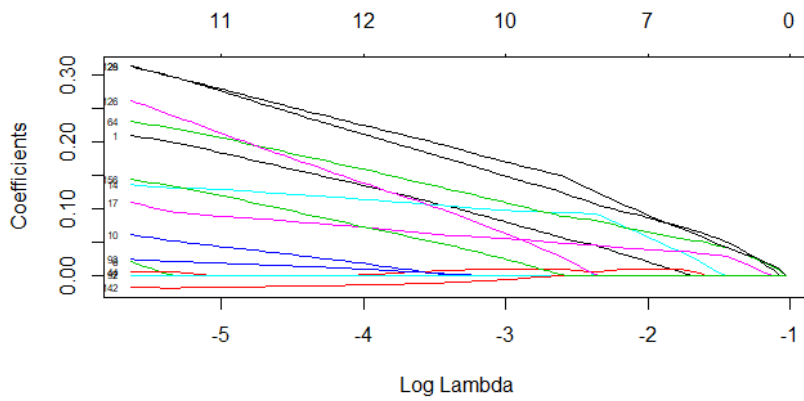


Figura 184: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE4

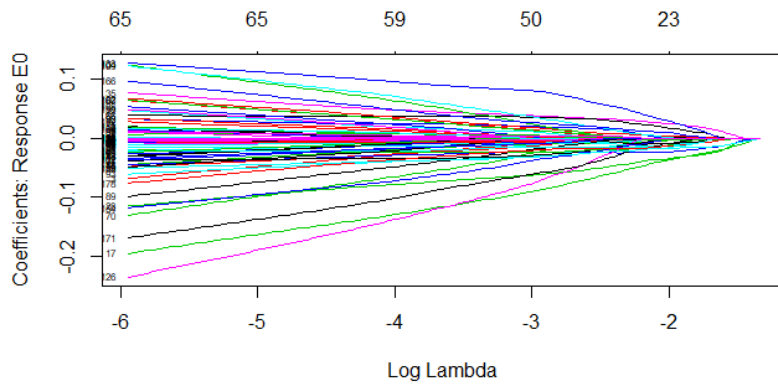


Figura 185: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

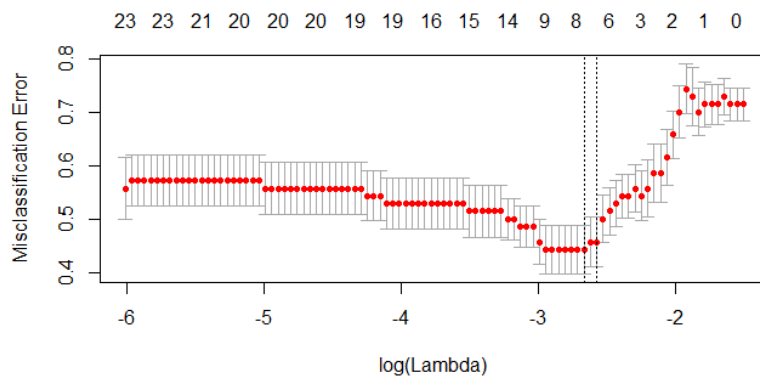


Figura 186: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

### A3.4 ANÁLISIS BPFO

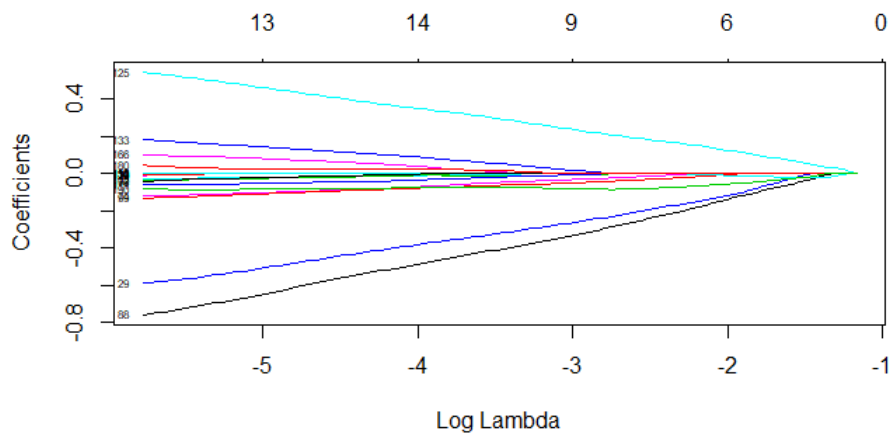


Figura 187: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE1

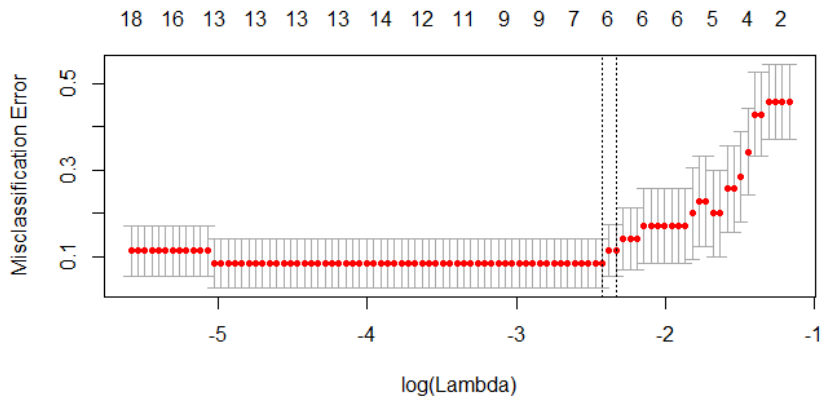


Figura 188: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE1 (II)

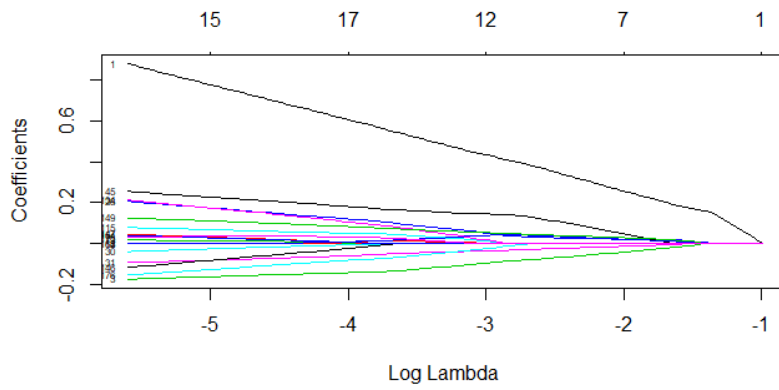


Figura 189: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE2

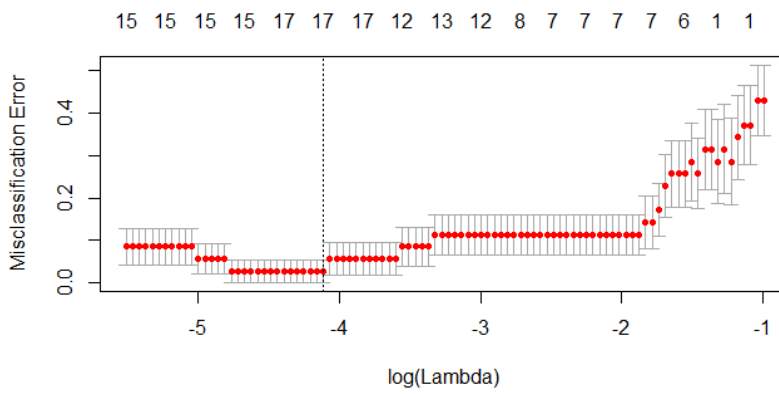


Figura 190: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE2 (II)

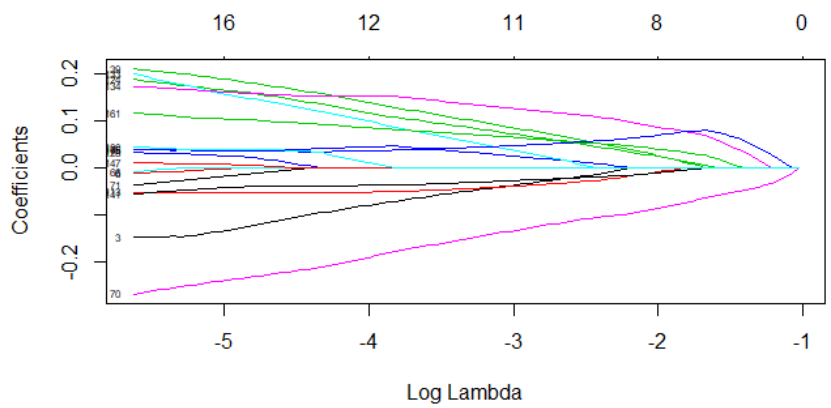


Figura 191: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE3

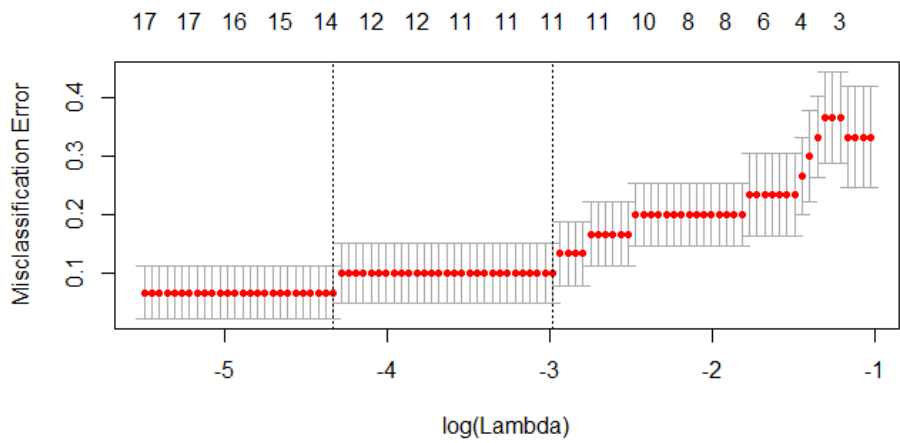


Figura 192: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE3 (II)

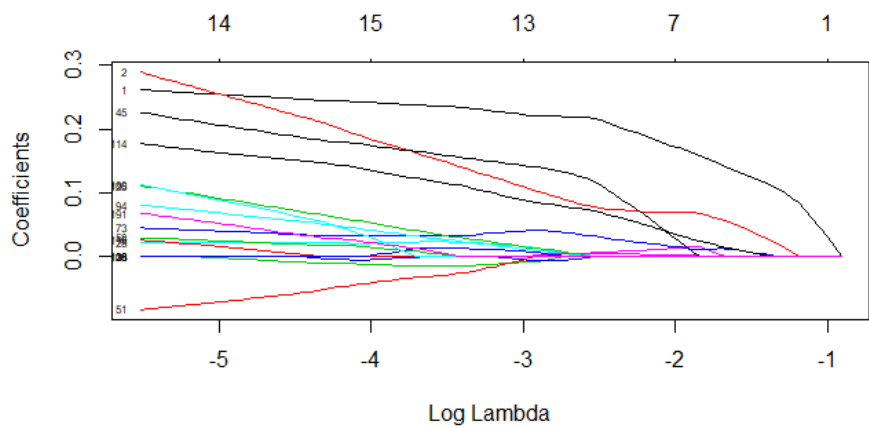


Figura 193: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE4

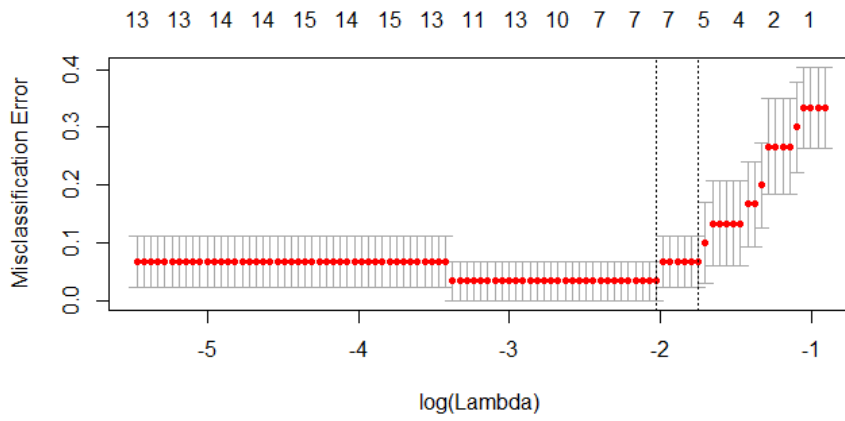


Figura 194: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE4 (II)

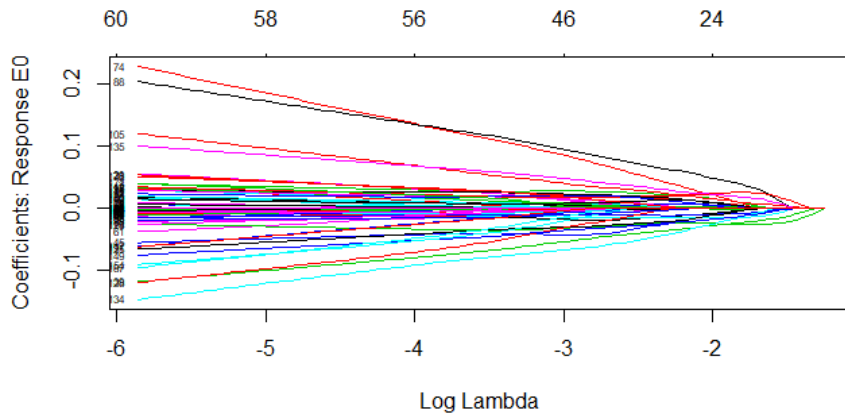


Figura 195: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

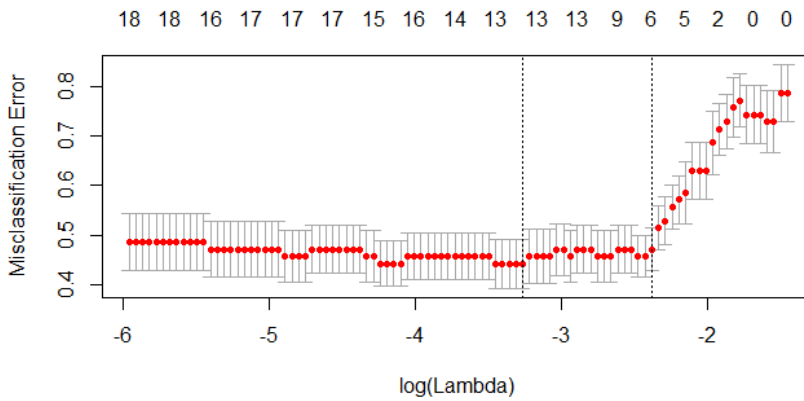


Figura 196: Plot correspondiente al análisis AB3-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)



### A3.5 ANÁLISIS BSF

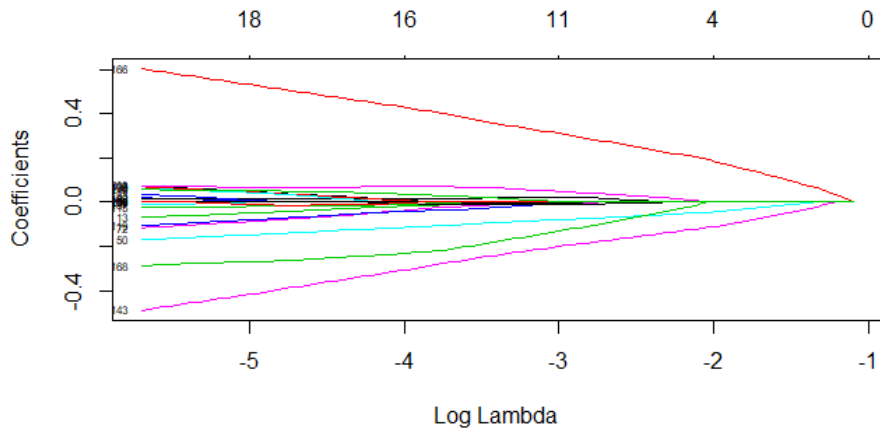


Figura 197: Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE1

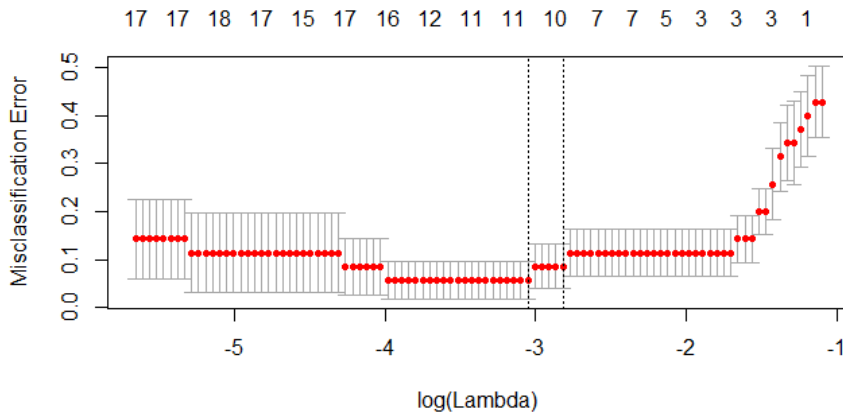


Figura 198: Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE1 (II)

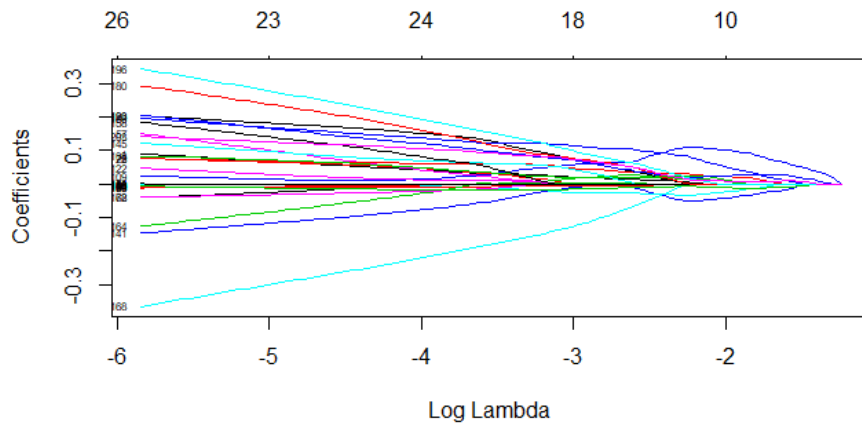


Figura 199: Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE2

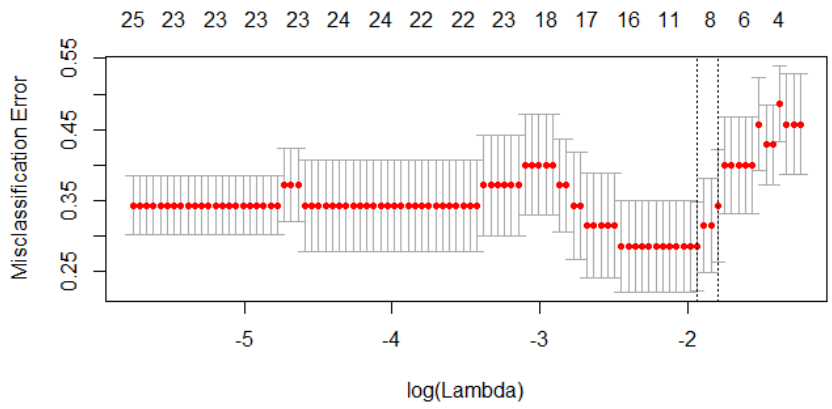


Figura 200: Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE2 (II)

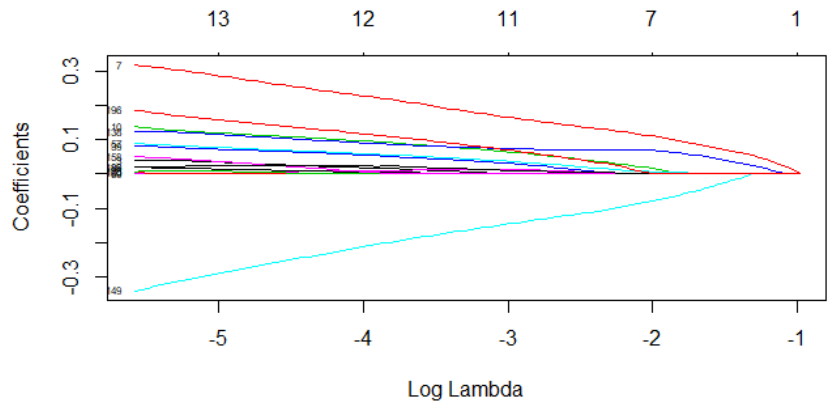


Figura 201: Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE3

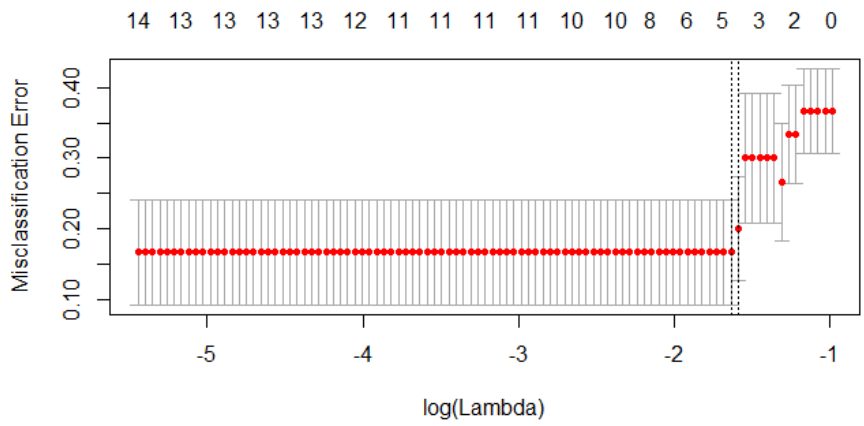


Figura 202: Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE3 (II)

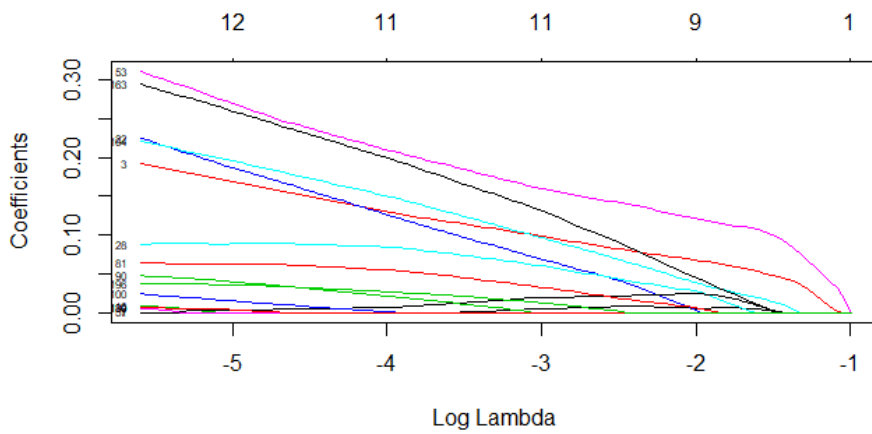


Figura 203: Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE4

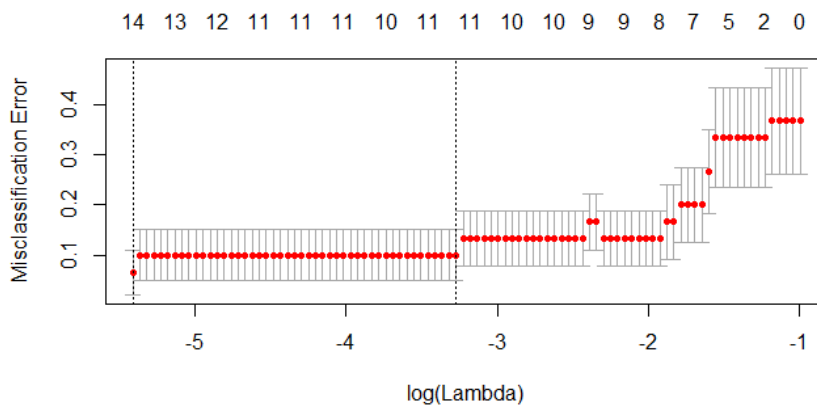


Figura 204: Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE4 (II)

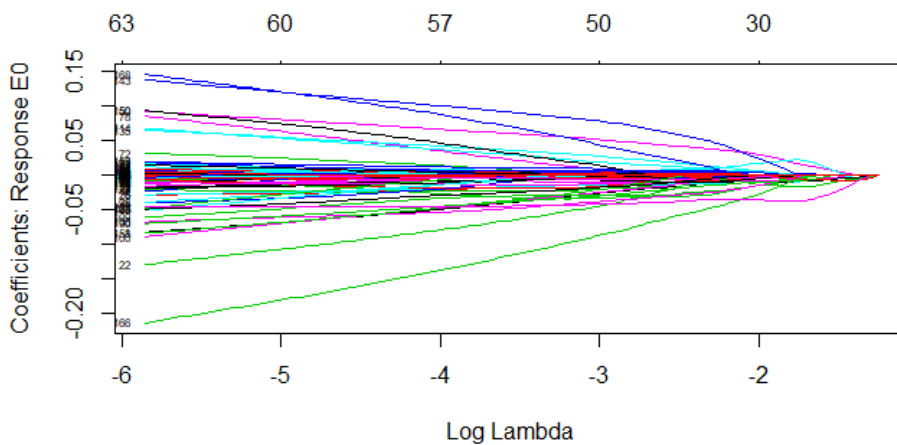


Figura 205: Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

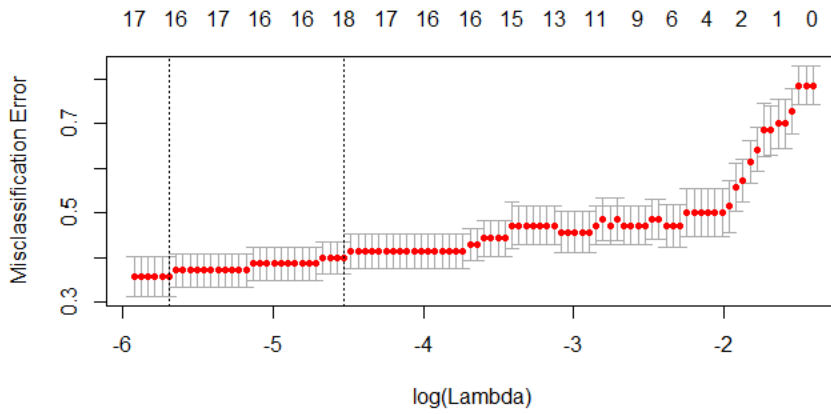


Figura 206: Plot correspondiente al análisis AB3-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A4. ANÁLISIS DE AB4

### A4.1 ANÁLISIS COMPLETO

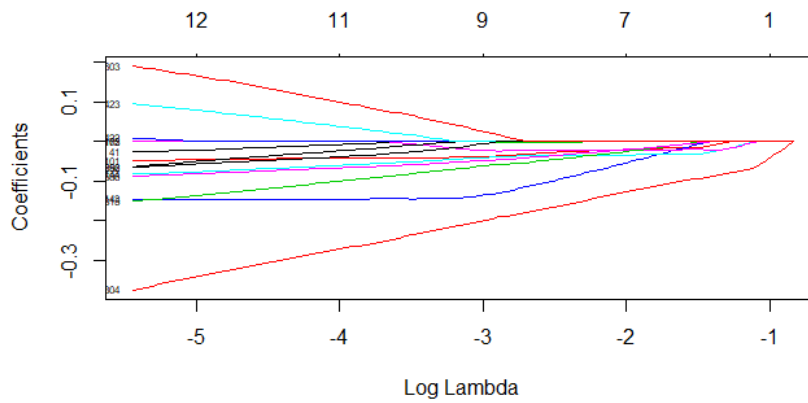


Figura 207: Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE1

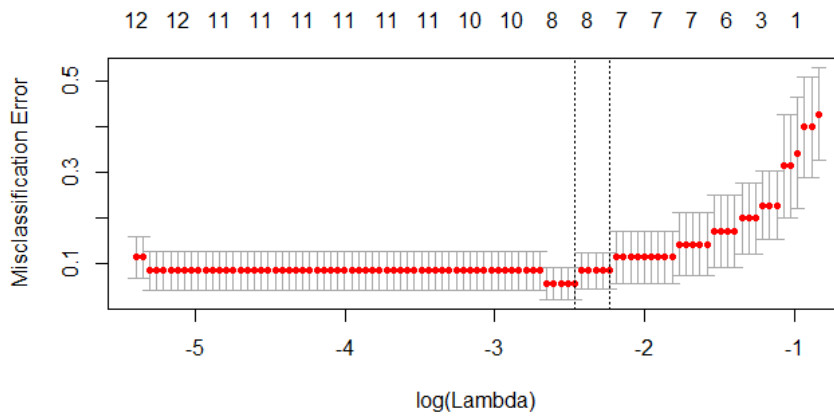


Figura 208: Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE1 (II)

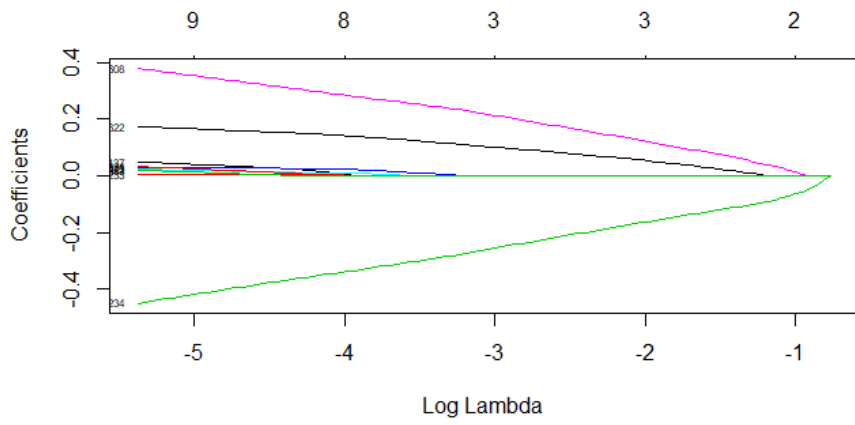


Figura 209: Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE2

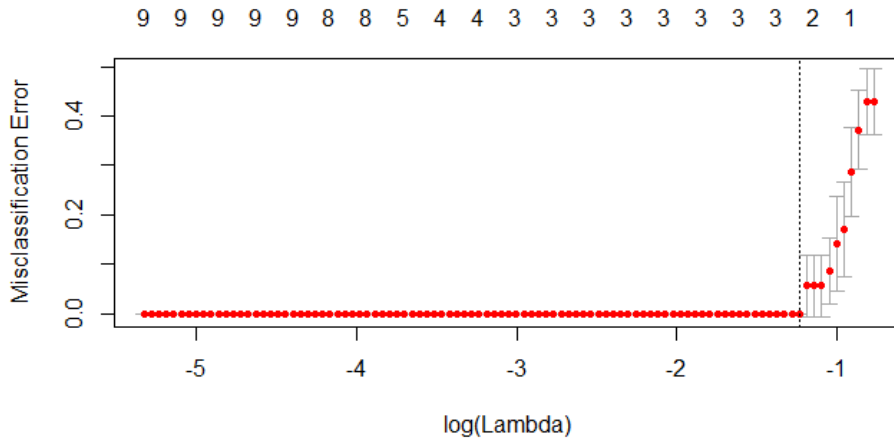


Figura 210: Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE2 (II)

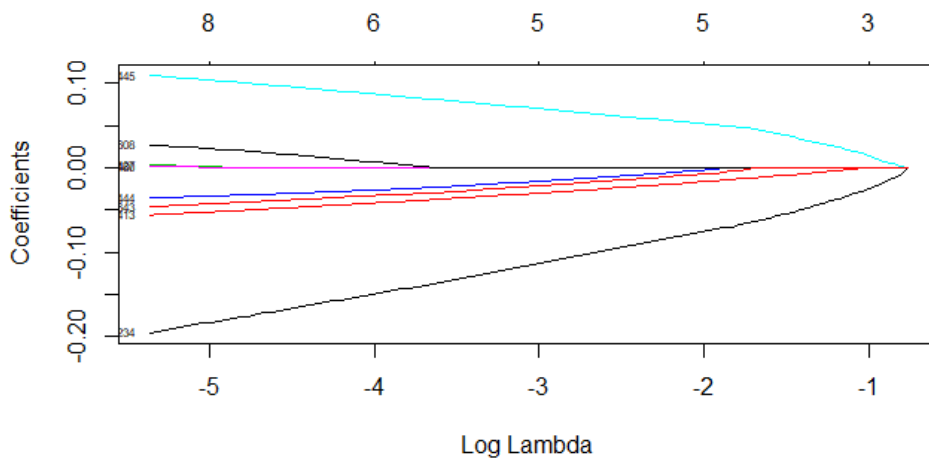


Figura 211: Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE3

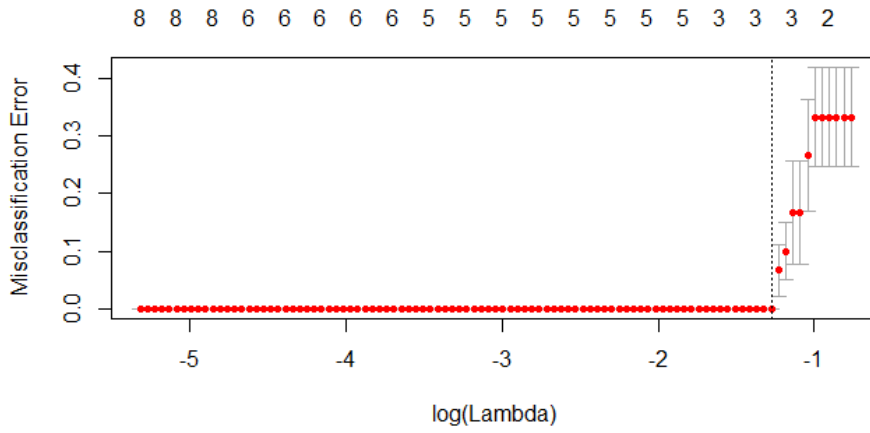


Figura 212: Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE3 (II)

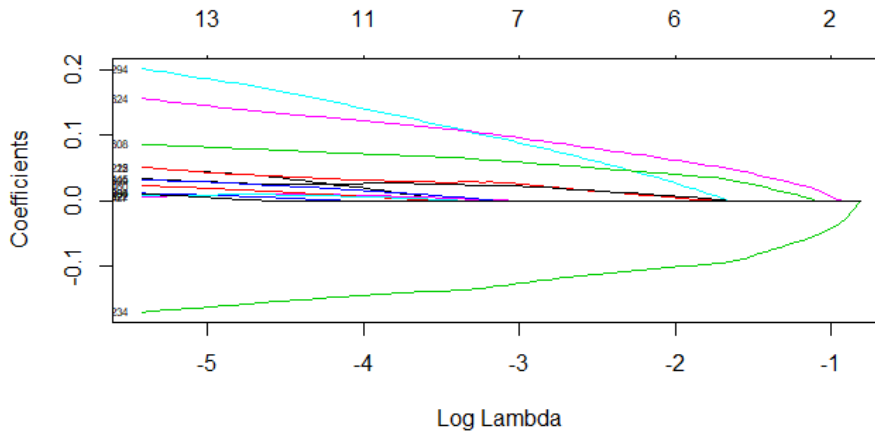


Figura 213: Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE4

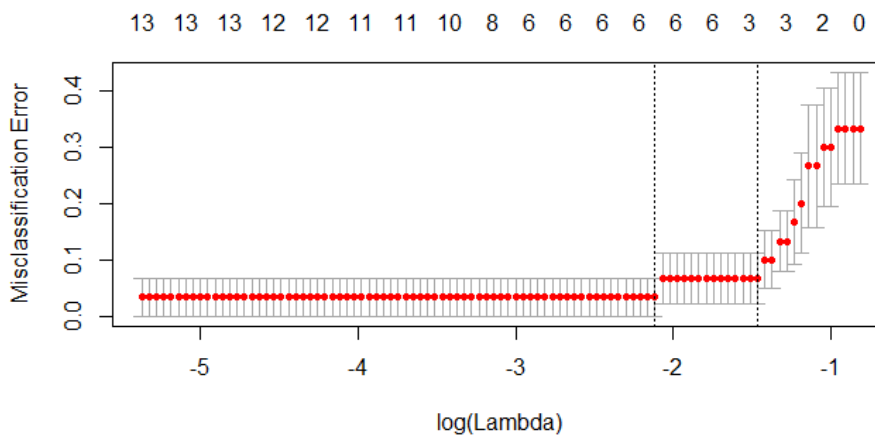


Figura 214: Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE4 (II)

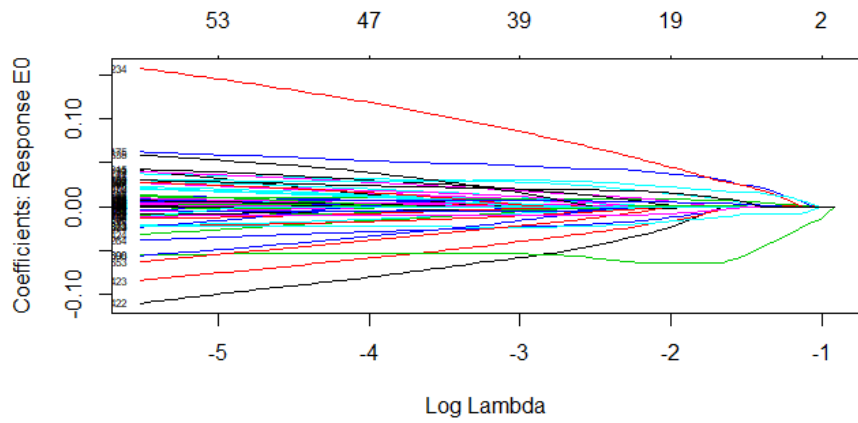


Figura 215: Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

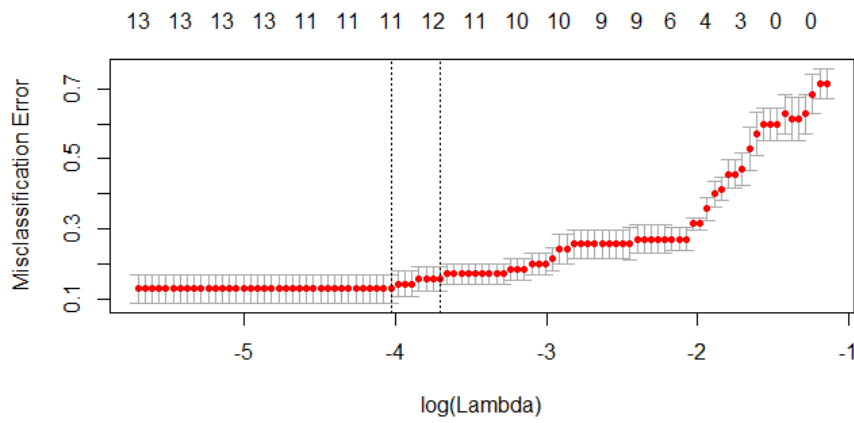


Figura 216: Plot correspondiente al análisis AB4-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A4.2 ANÁLISIS BFTF

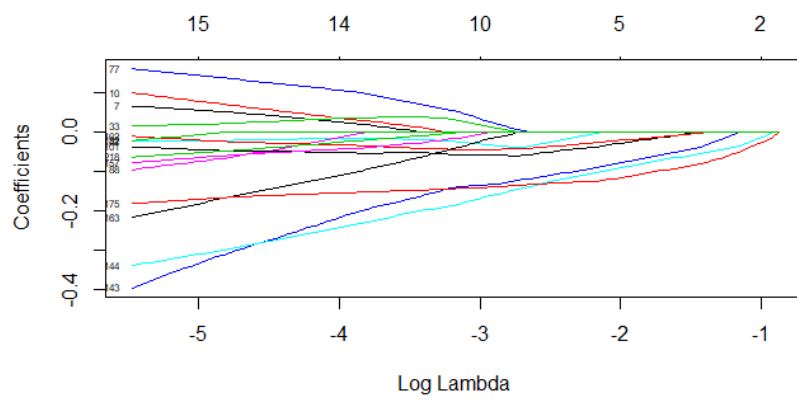


Figura 217: Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE1

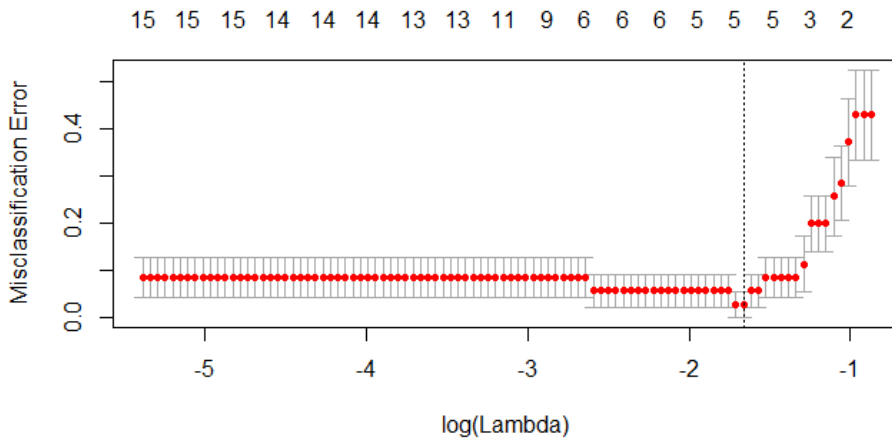


Figura 218: Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE1 (II)

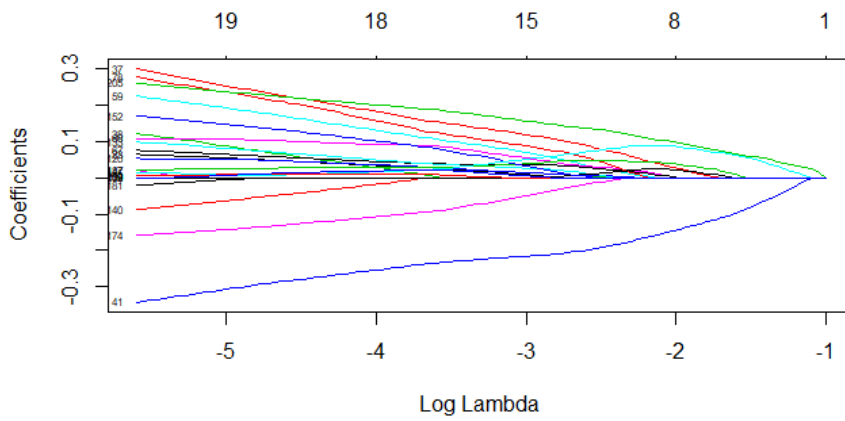


Figura 219: Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE2

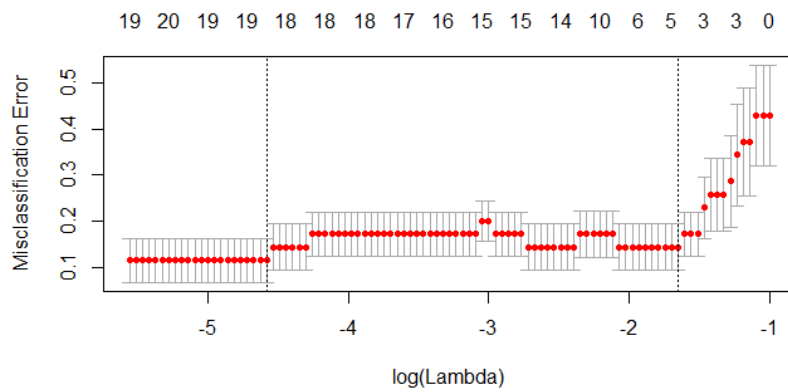


Figura 220: Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE2 (II)



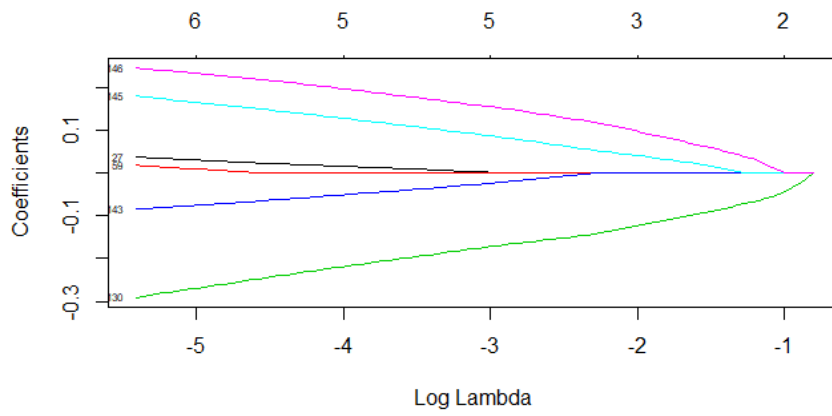


Figura 221: Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE3

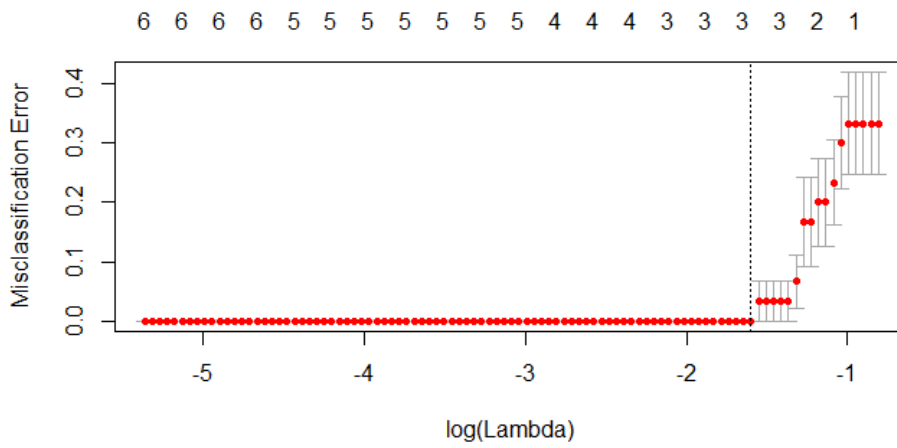


Figura 222: Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE3 (II)

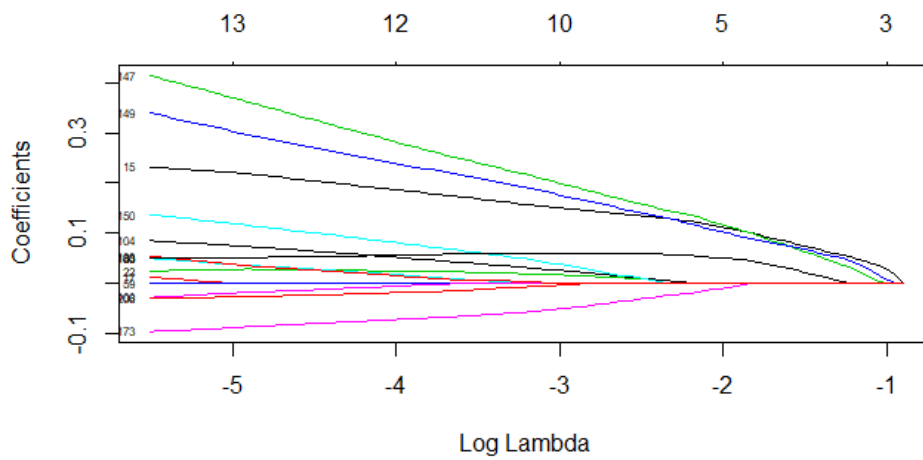


Figura 223: Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE4

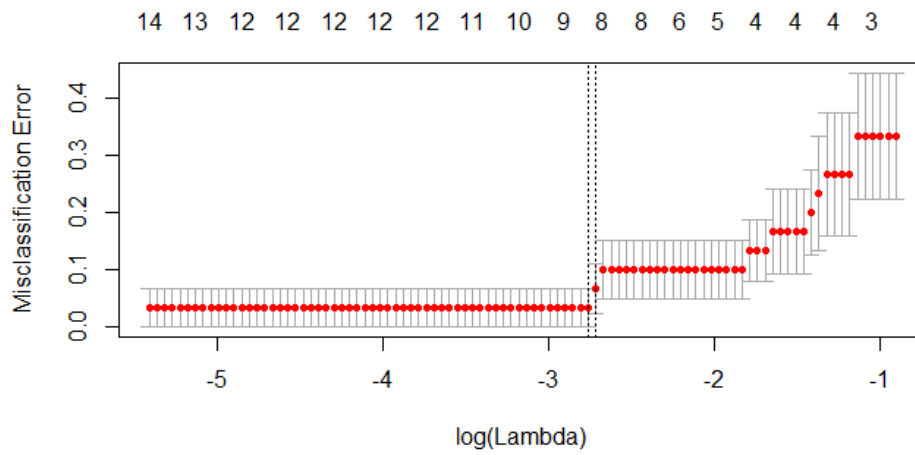


Figura 224: Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE4 (II)

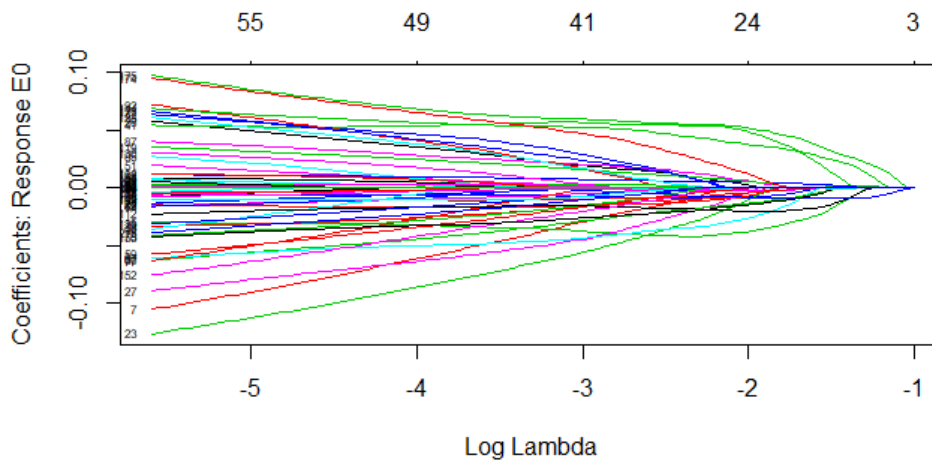


Figura 225: Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

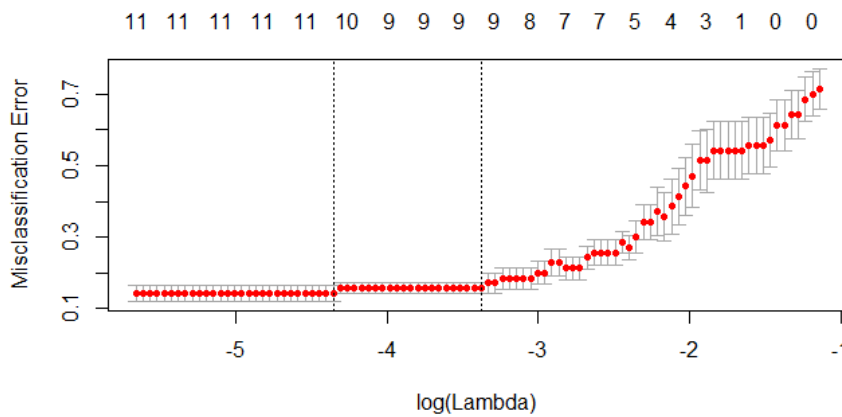


Figura 226: Plot correspondiente al análisis AB4-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

### A4.3 ANÁLISIS BPGI

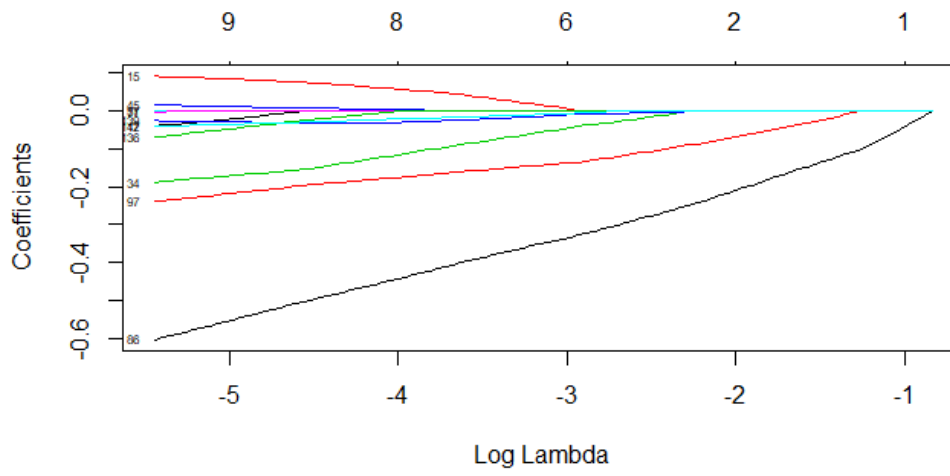


Figura 227: Plot correspondiente al análisis AB4-BPGI-E0vsE1

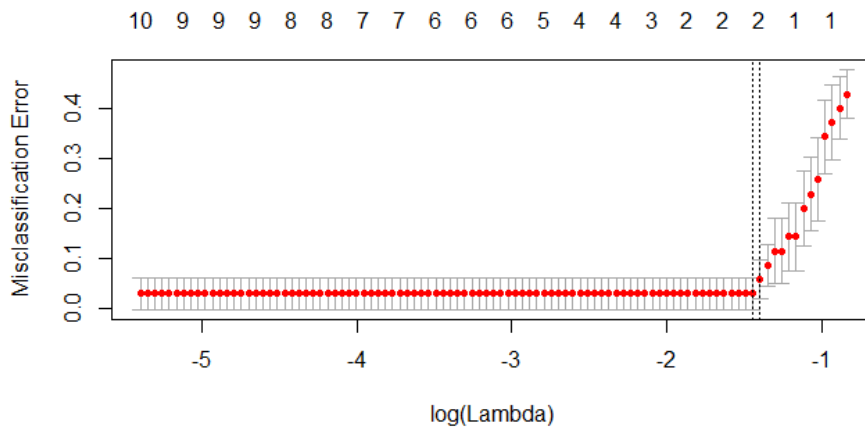


Figura 228: Plot correspondiente al análisis AB4-BPGI-E0vsE1 (II)

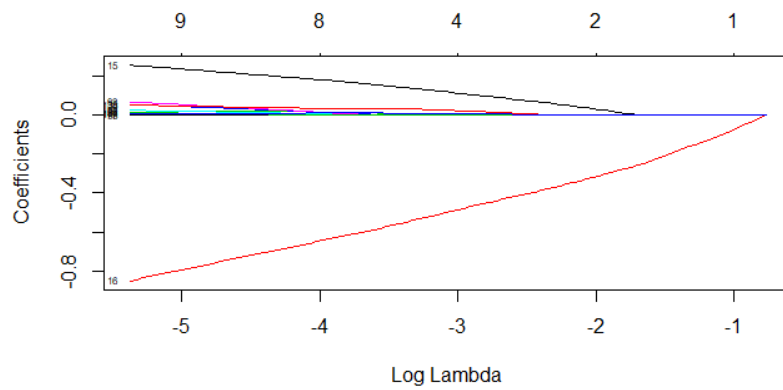


Figura 229: Plot correspondiente al análisis AB4-BPGI-E0vsE2

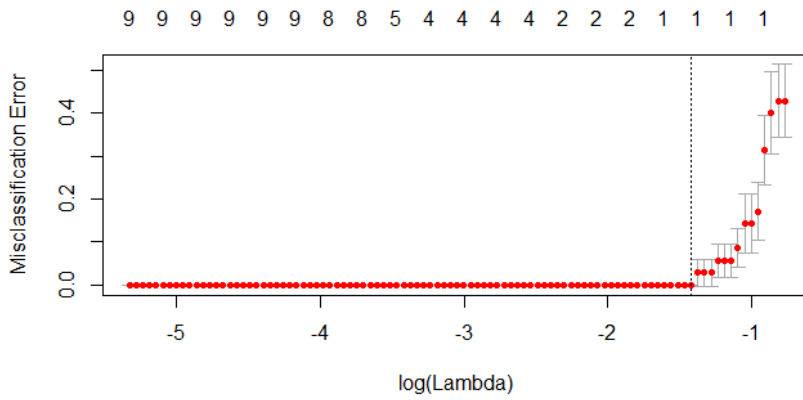


Figura 230: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE2 (II)

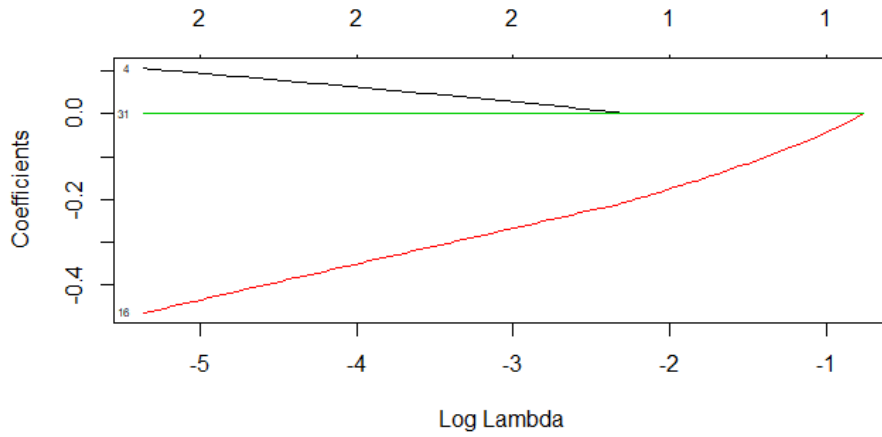


Figura 231: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE3

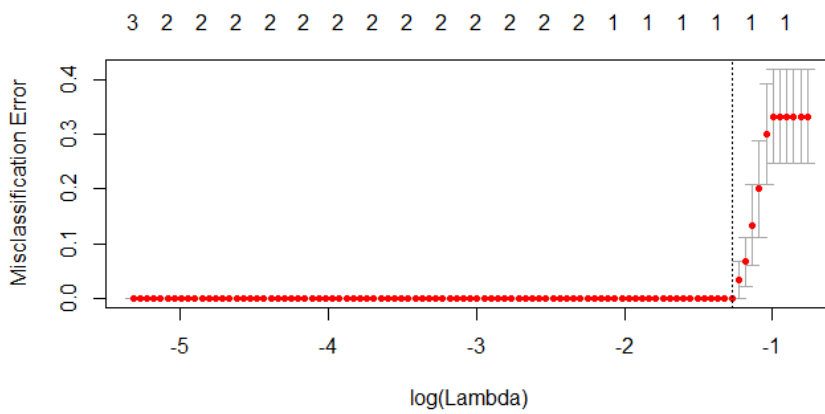


Figura 232: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE3 (II)

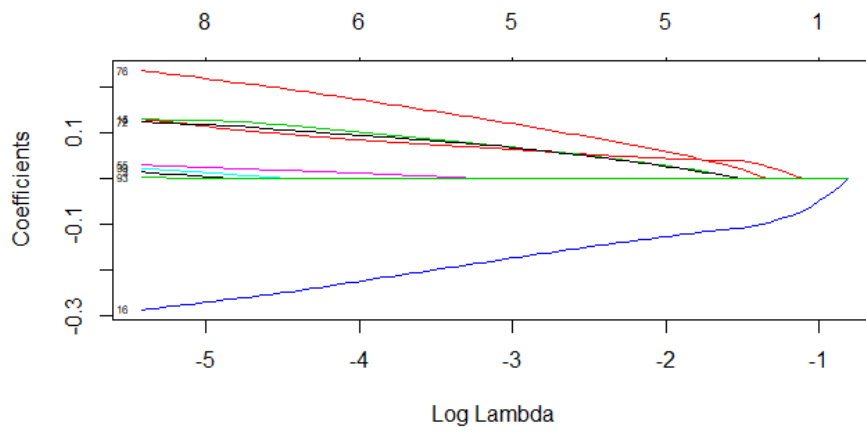


Figura 233: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE4

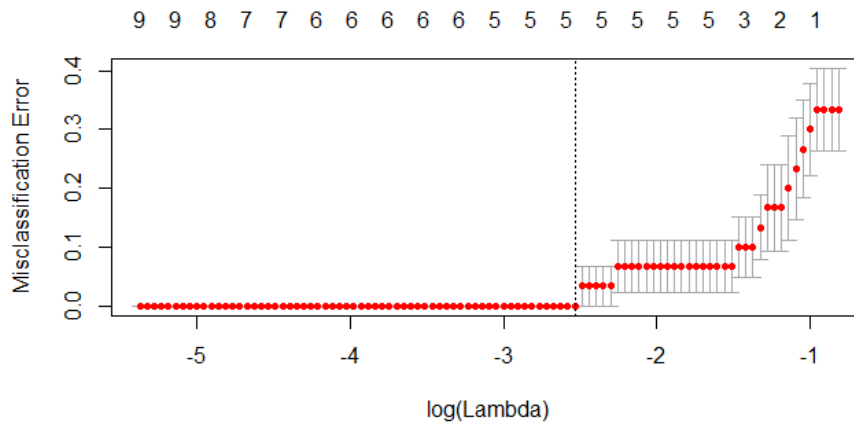


Figura 234: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE4 (II)

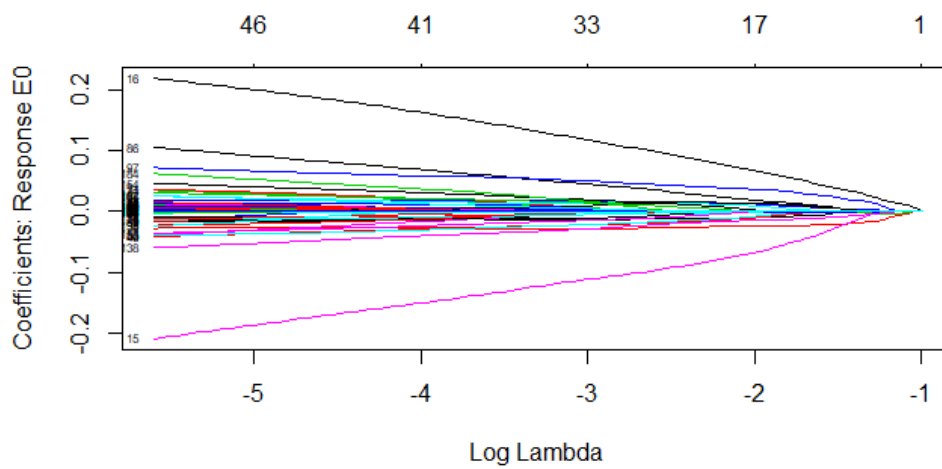


Figura 235: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

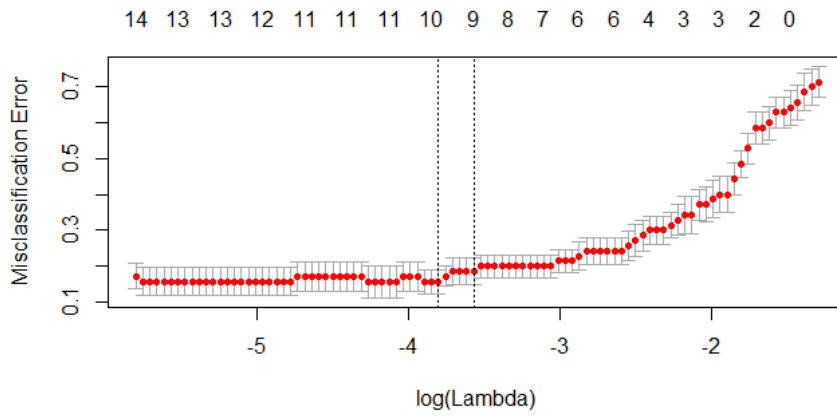


Figura 236: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

#### A4.4 ANÁLISIS BPFO

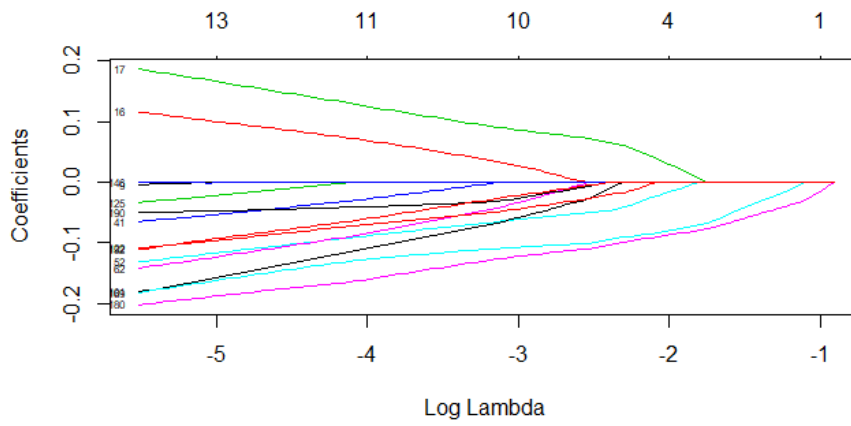


Figura 237: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE1

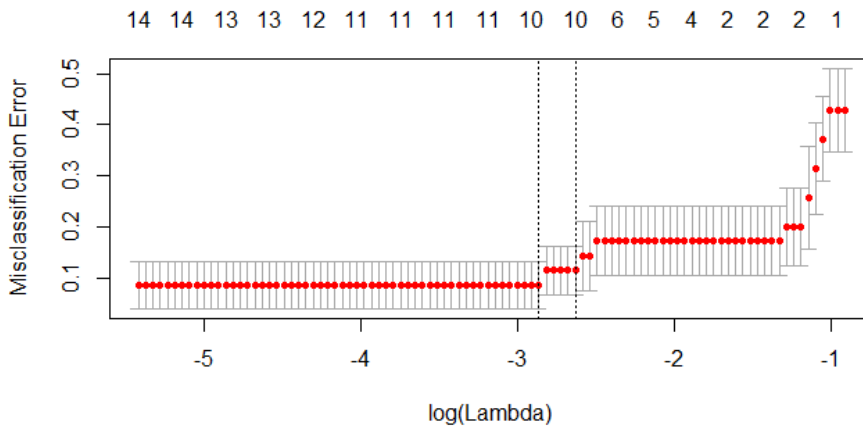


Figura 238: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE1 (II)

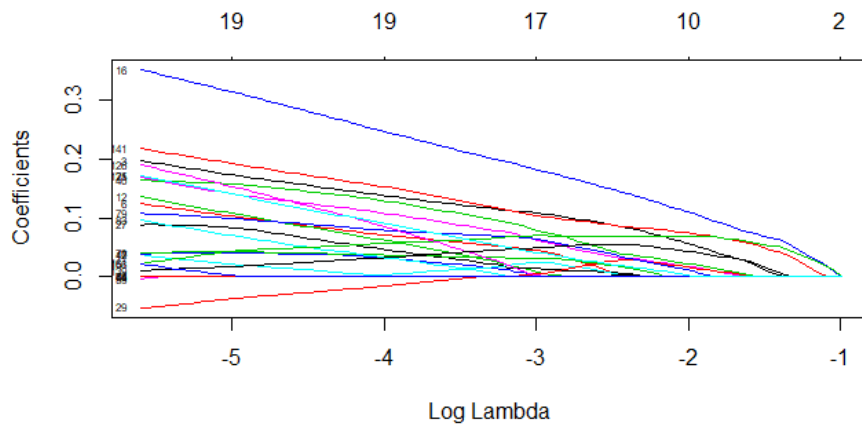


Figura 239: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE2

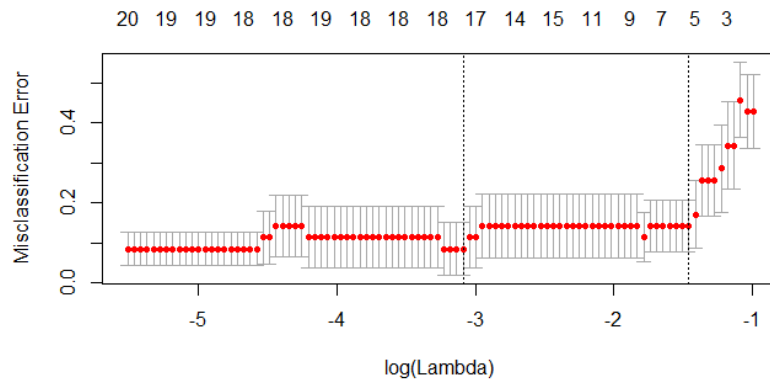


Figura 240: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE2 (II)

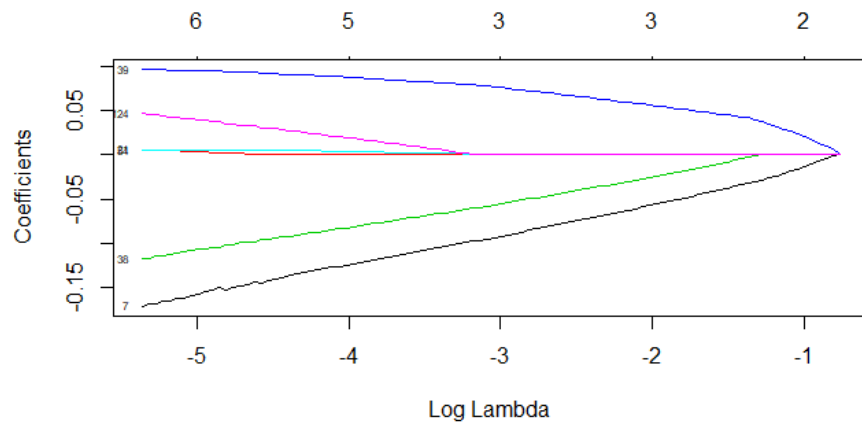


Figura 241: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE3

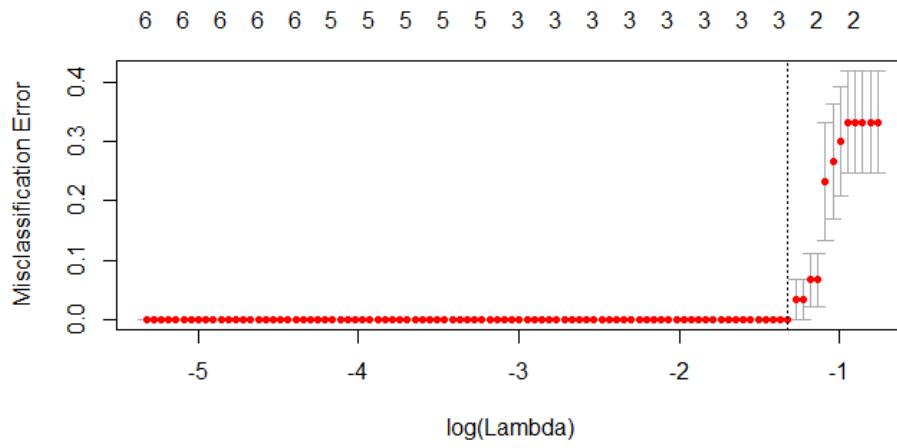


Figura 242: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE3 (II)

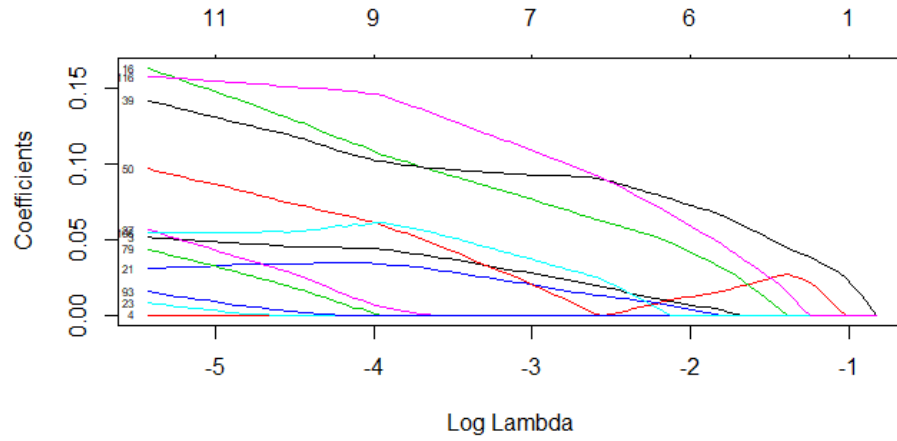


Figura 243: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE4

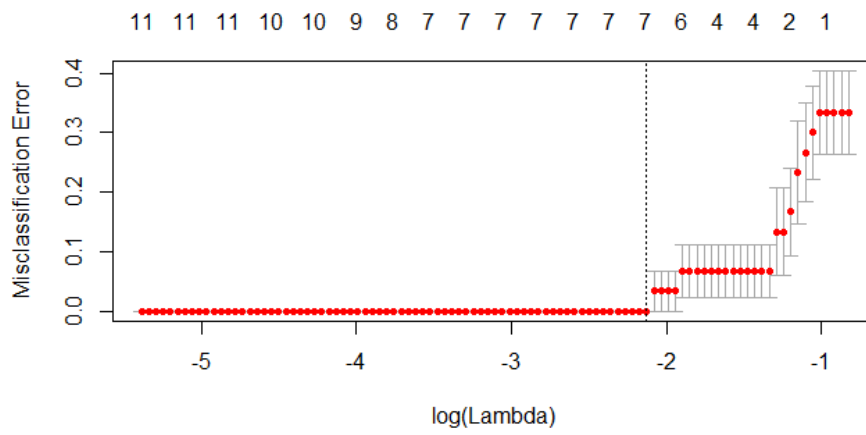


Figura 244: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE4 (II)



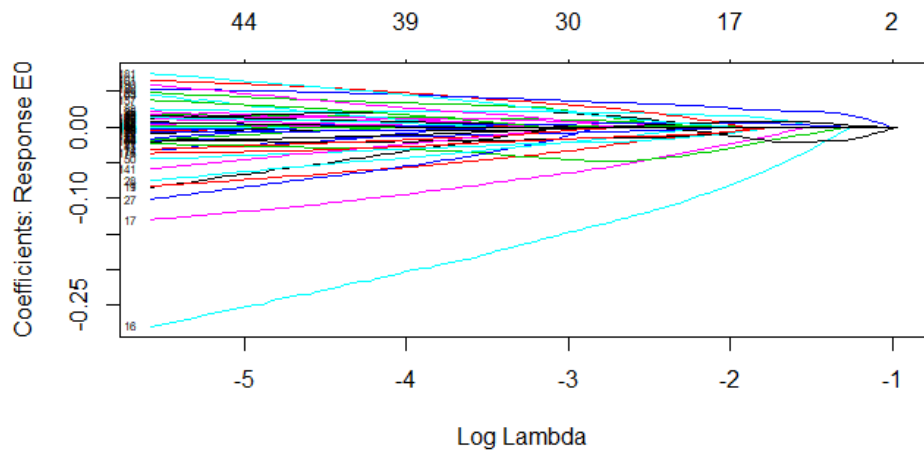


Figura 245: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

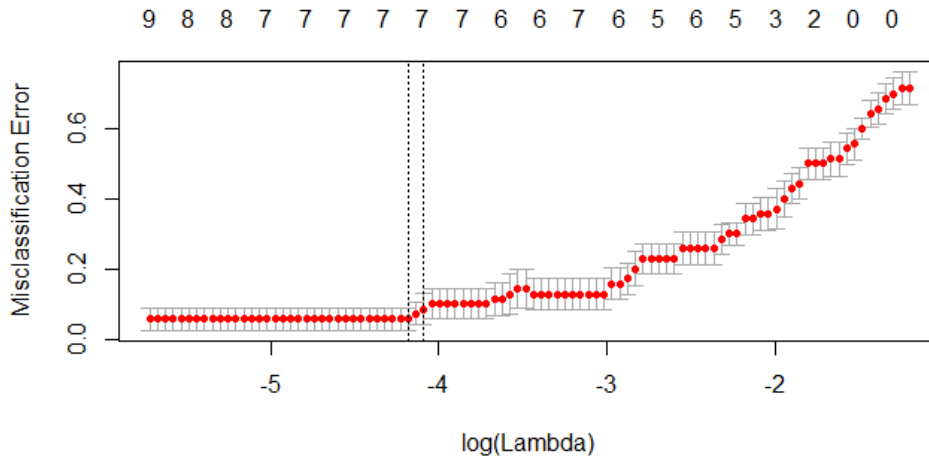


Figura 246: Plot correspondiente al análisis AB4-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A4.5 ANÁLISIS BSF

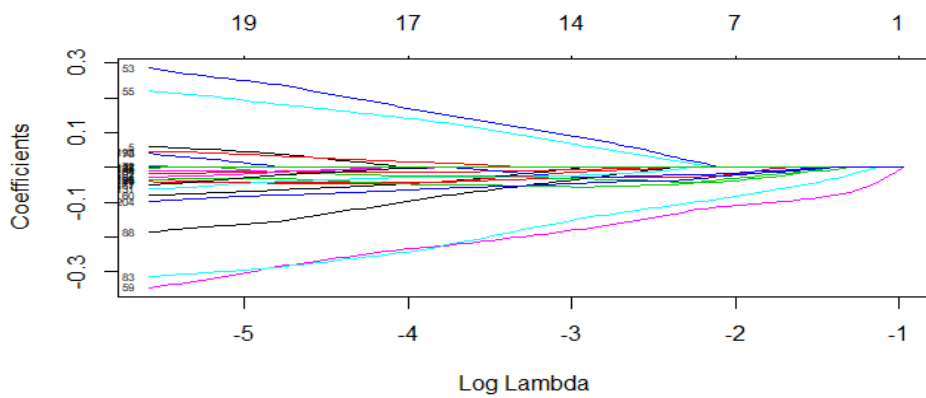


Figura 247: Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE1

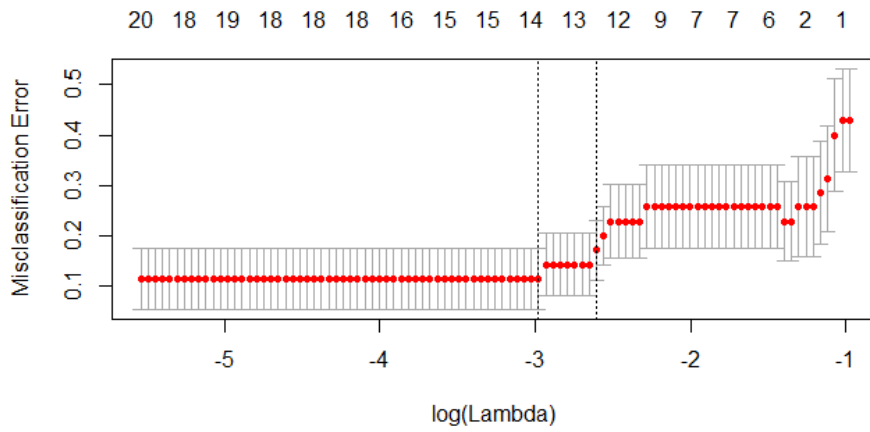


Figura 248: Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE1 (II)

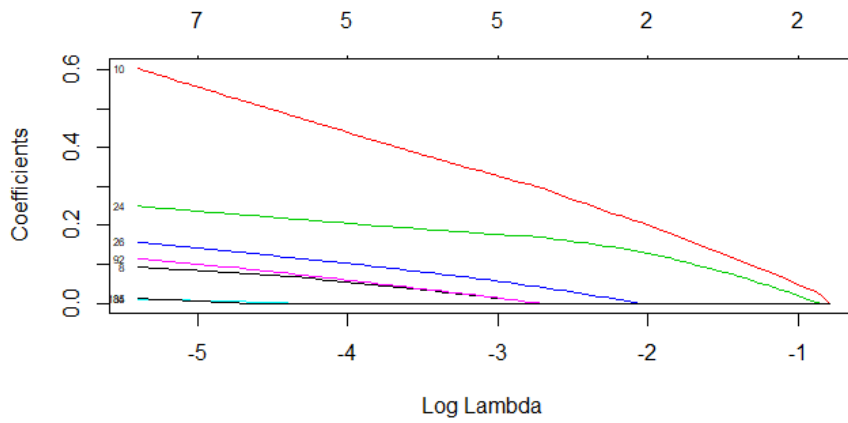


Figura 249: Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE2

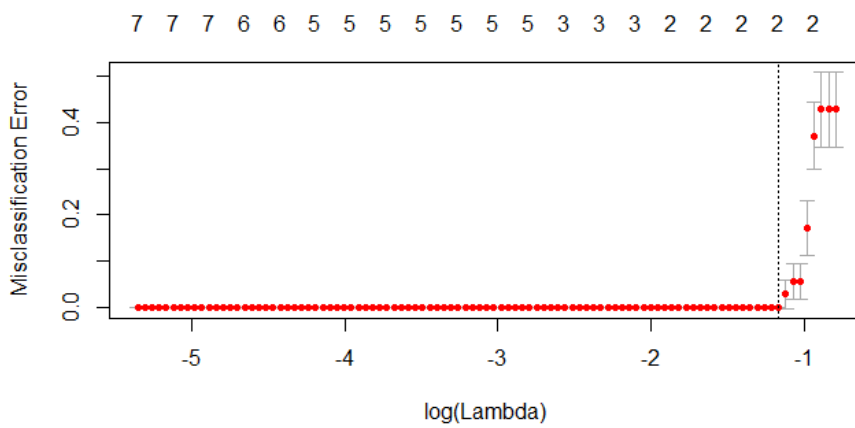


Figura 250: Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE2 (II)

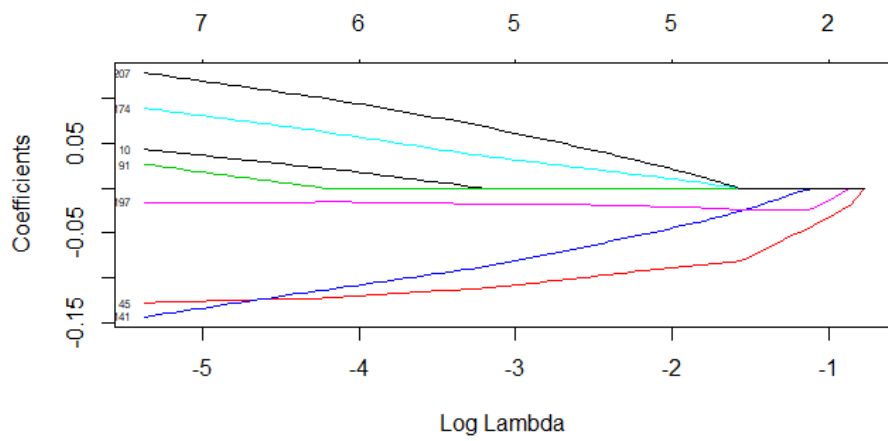


Figura 251: Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE3

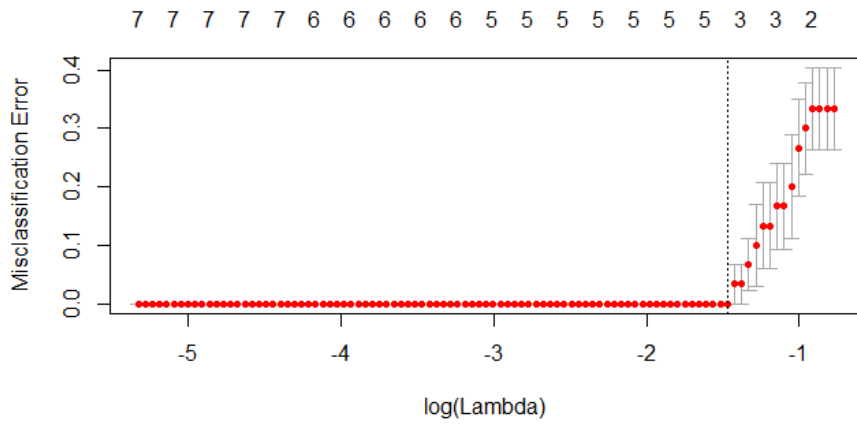


Figura 252: Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE3 (II)

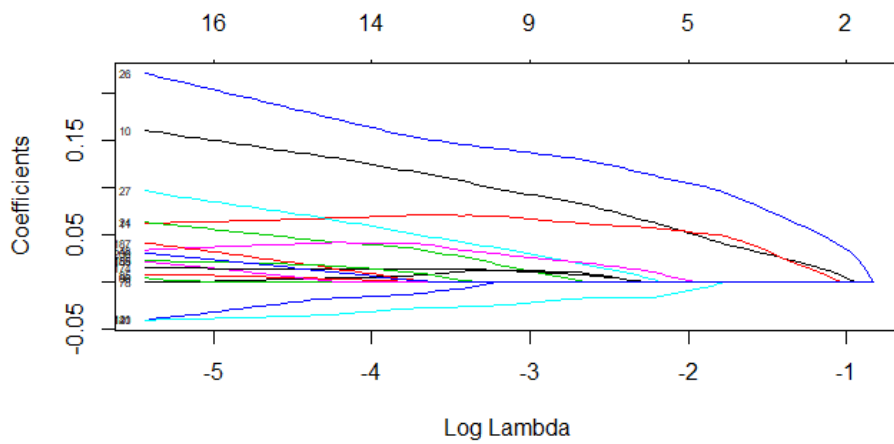


Figura 253: Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE4

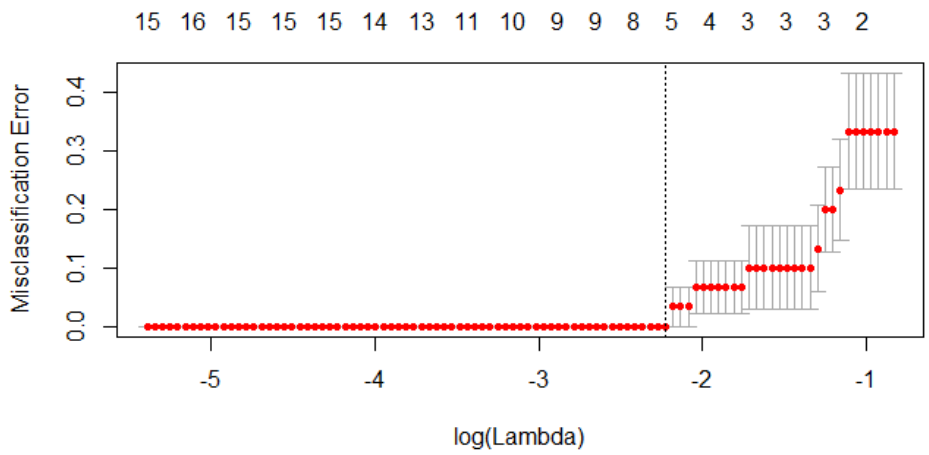


Figura 254: Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE4 (II)

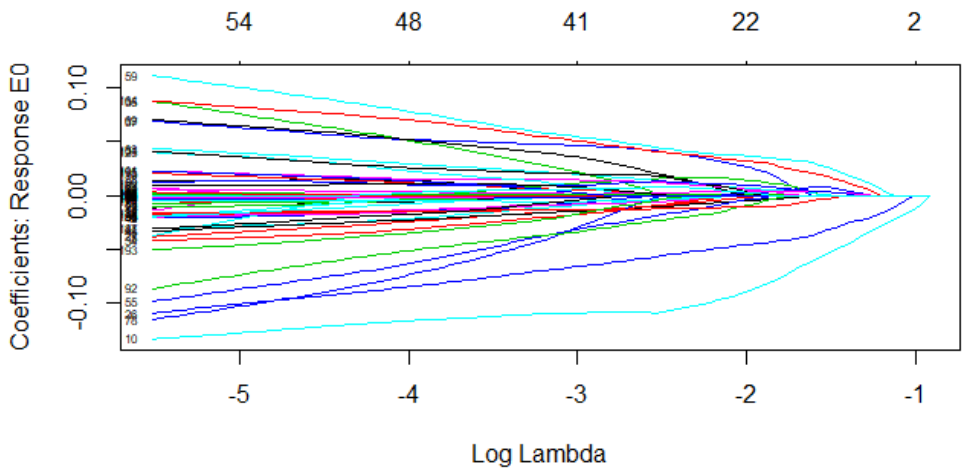


Figura 255: Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

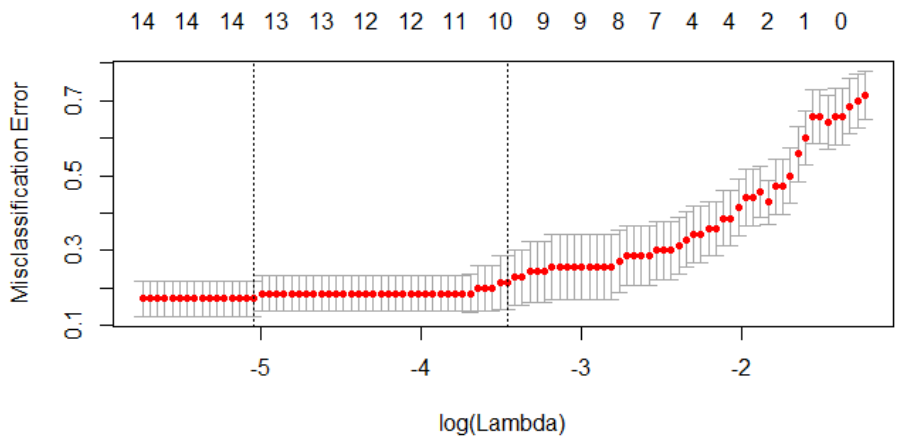


Figura 256: Plot correspondiente al análisis AB4-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A5. ANÁLISIS DE RED

### A5.1 ANÁLISIS COMPLETO

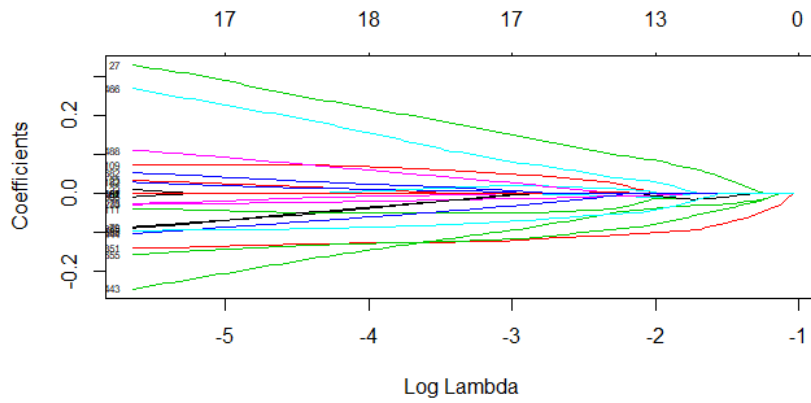


Figura 257: Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE1

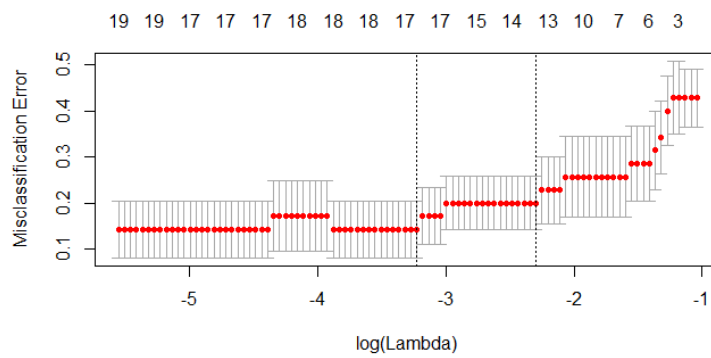


Figura 258: Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE1 (II)

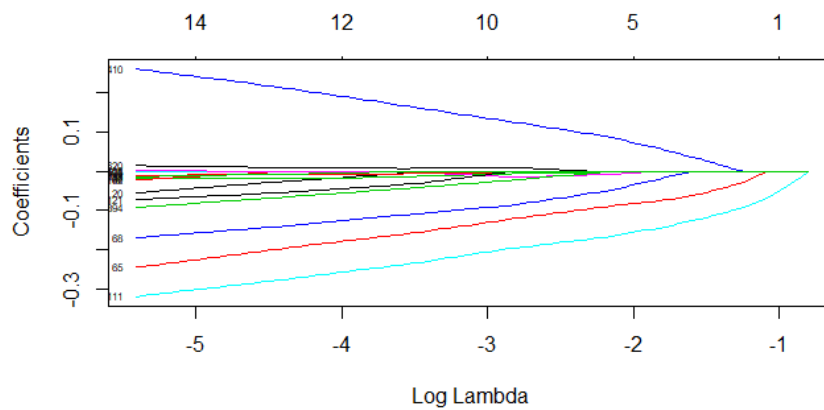


Figura 259: Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE2

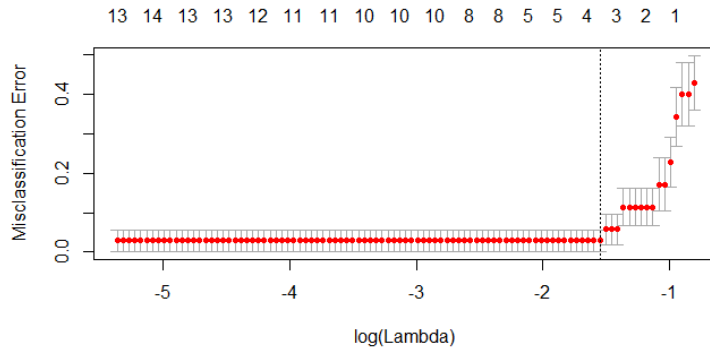


Figura 260: Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE2 (II)

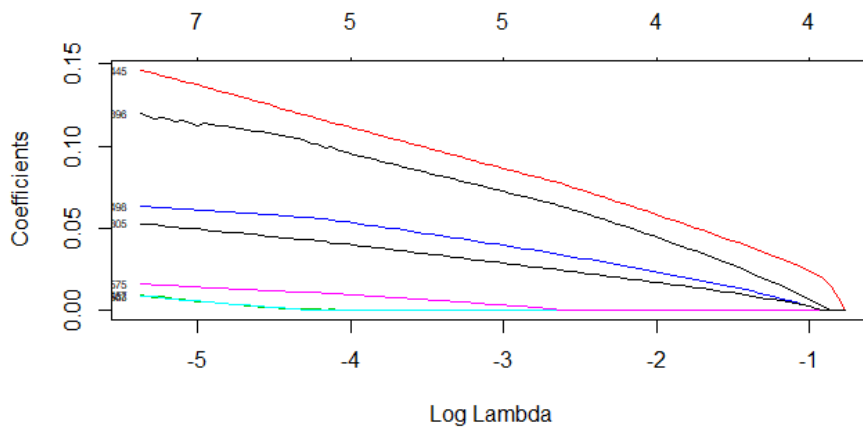


Figura 261: Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE3

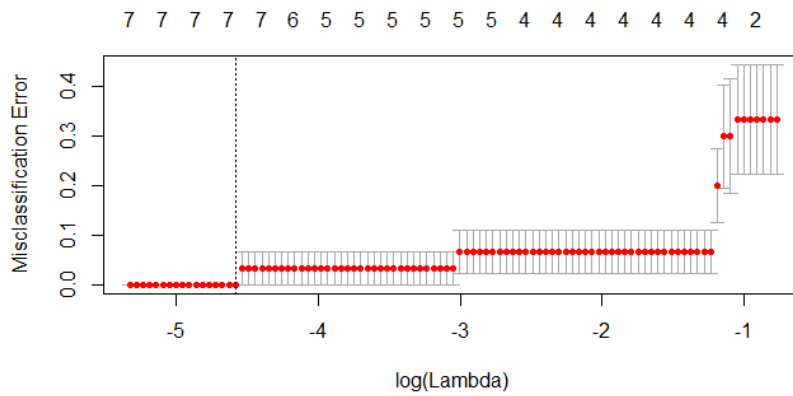


Figura 262: Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE3 (II)

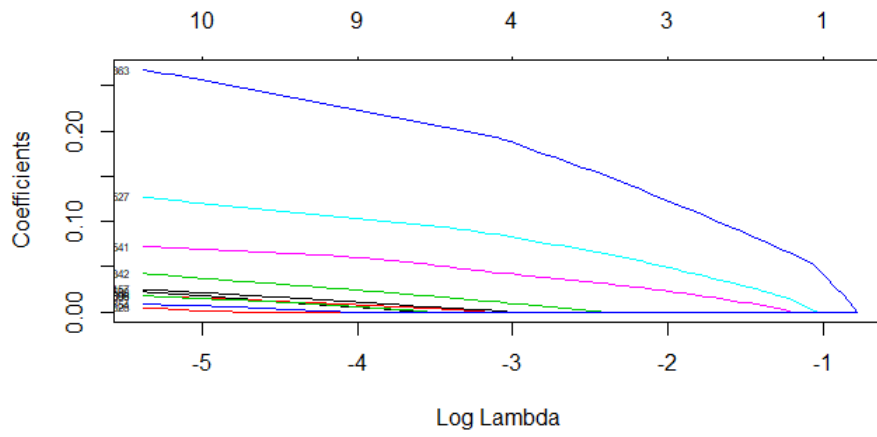


Figura 263: Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE4

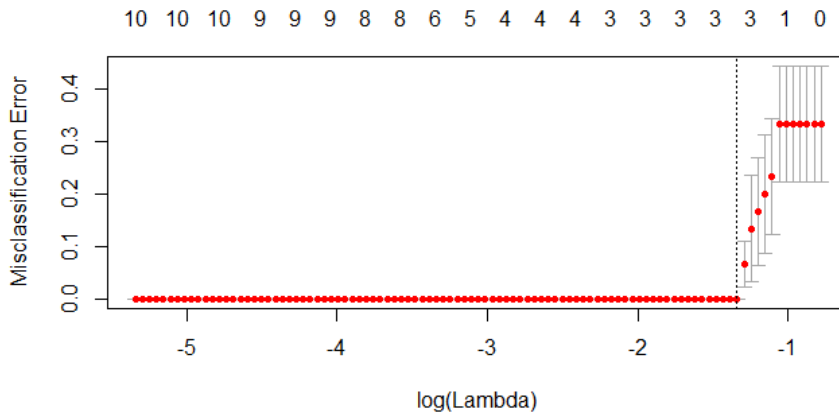


Figura 264: Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE4 (II)

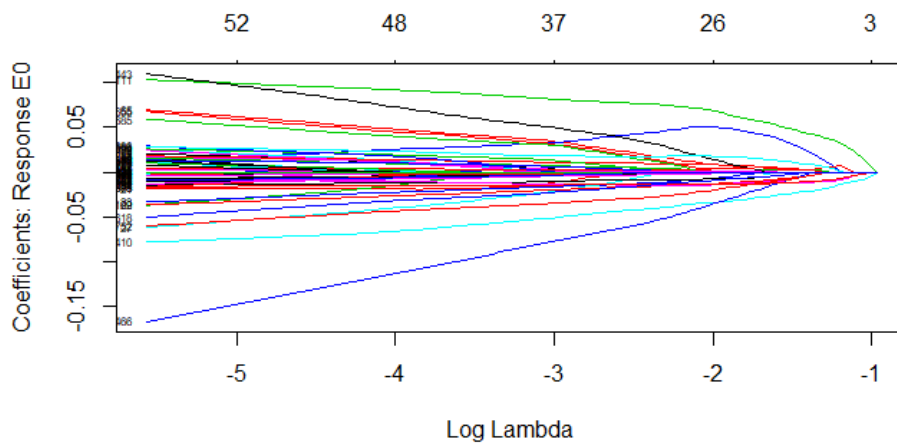


Figura 265: Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

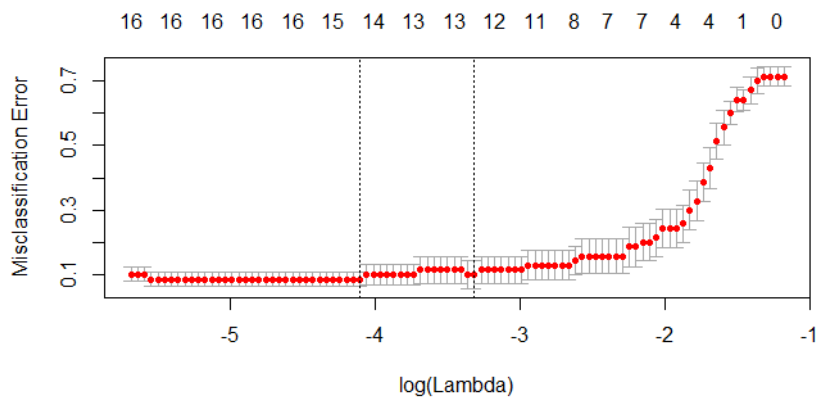


Figura 266: Plot correspondiente al análisis RED-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A5.2 ANÁLISIS BFTF

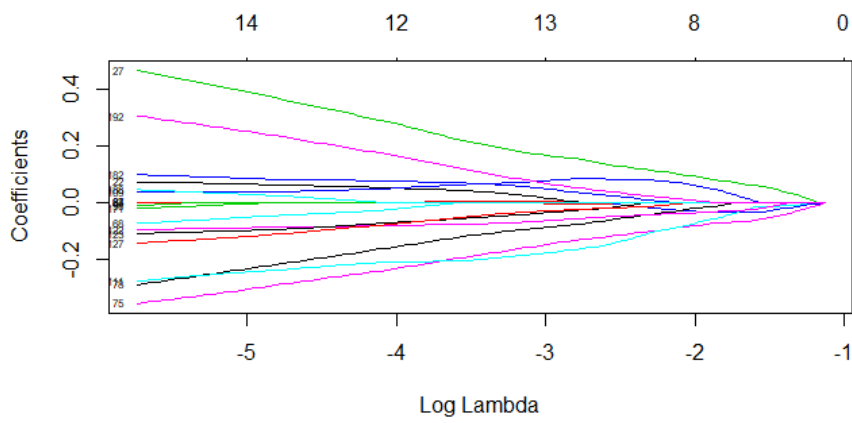


Figura 267: Plot correspondiente al análisis RED-BFTF-E0vsE1

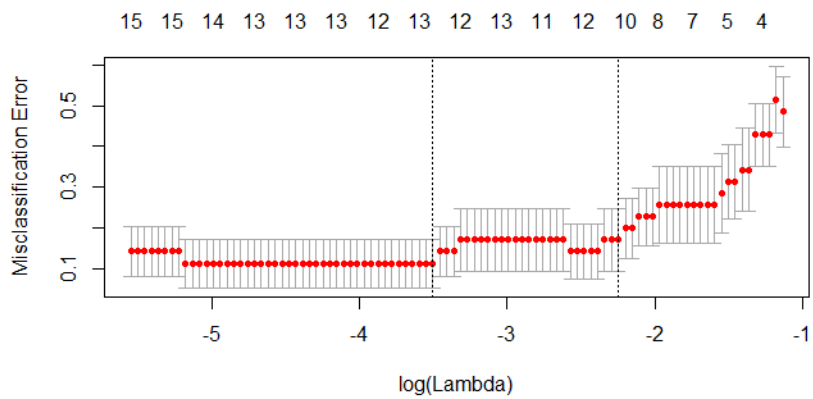


Figura 268: Plot correspondiente al análisis RED-BFTF-E0vsE1 (II)



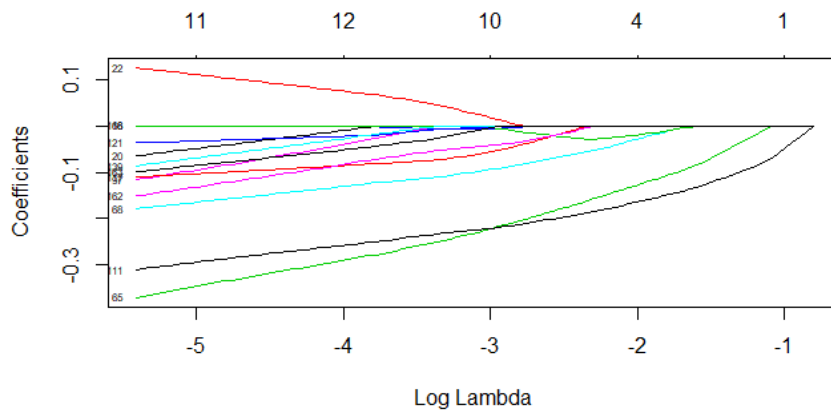


Figura 269: Plot correspondiente al análisis RED-BFTF-E0vsE2

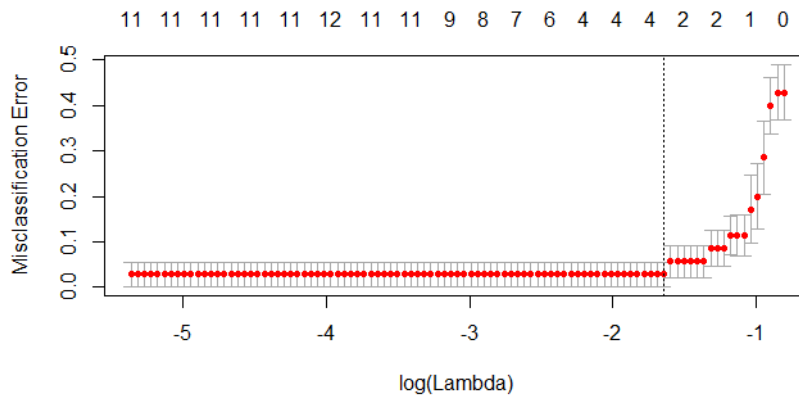


Figura 270: Plot correspondiente al análisis RED-BFTF-E0vsE2 (II)

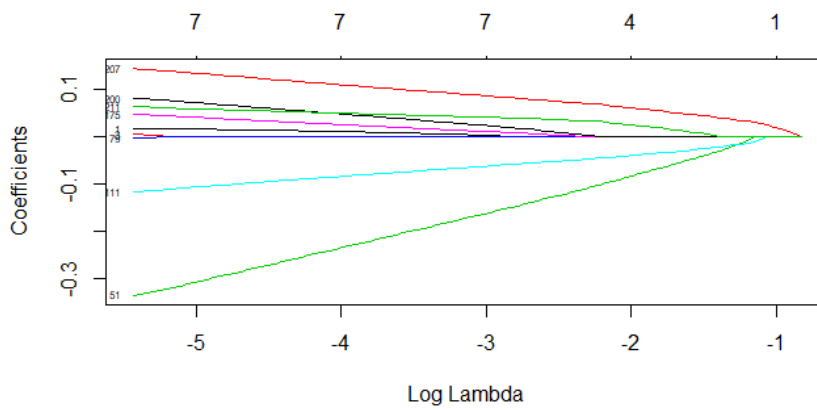


Figura 271: Plot correspondiente al análisis RED-BFTF-E0vsE3

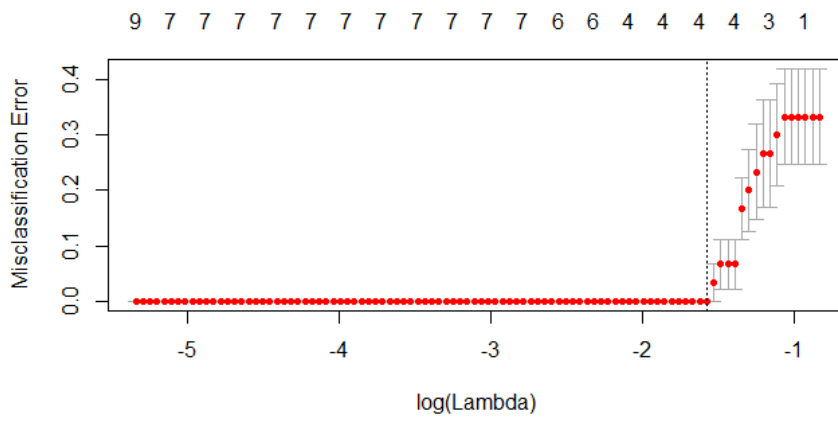


Figura 272: Plot correspondiente al análisis RED-BFTF-E0vsE3 (II)

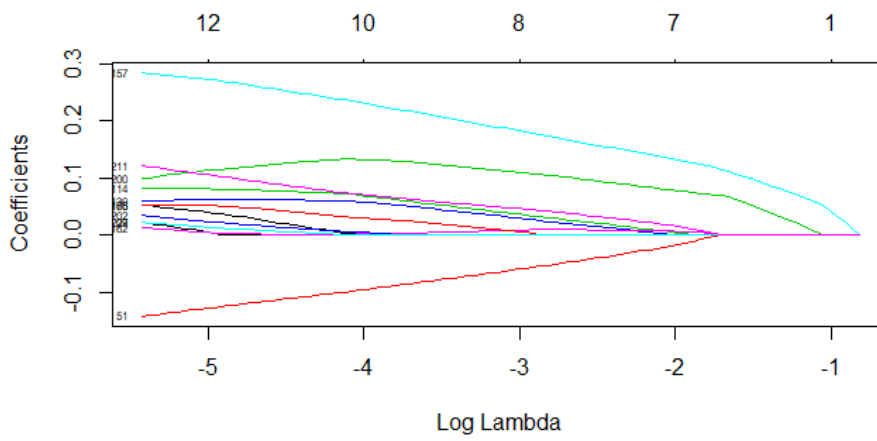


Figura 273: Plot correspondiente al análisis RED-BFTF-E0vsE4

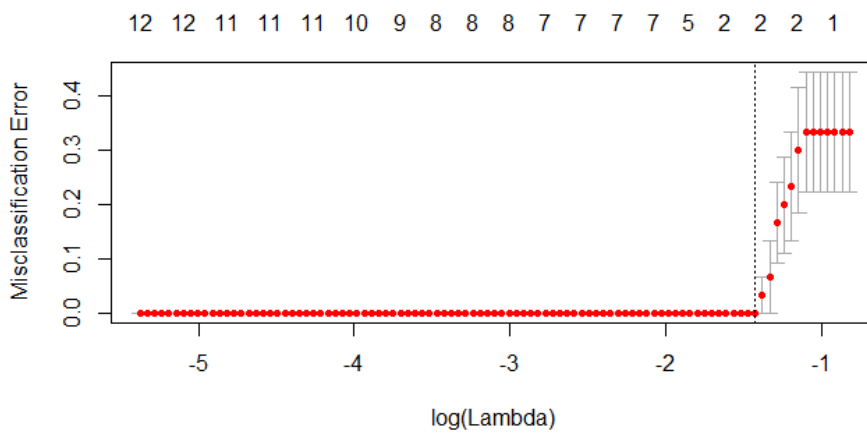


Figura 274: Plot correspondiente al análisis RED-BFTF-E0vsE4 (II)

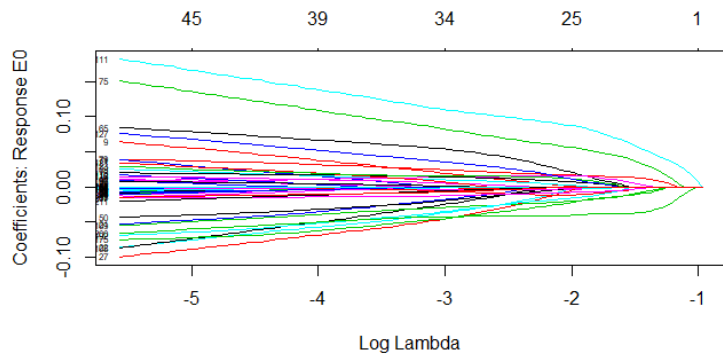


Figura 275: Plot correspondiente al análisis RED-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

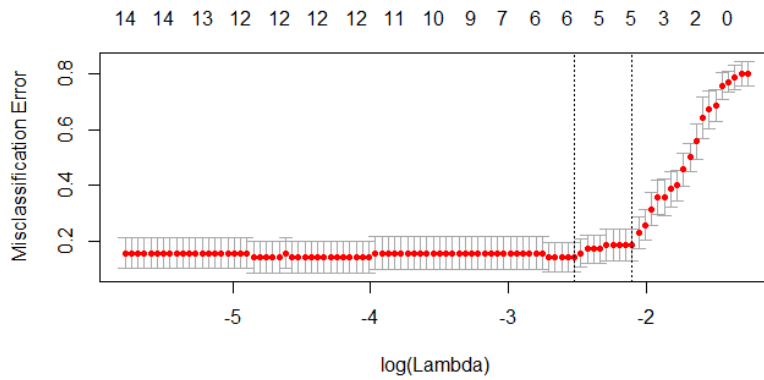


Figura 276: Plot correspondiente al análisis RED-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

### A5.3 ANÁLISIS BPGI

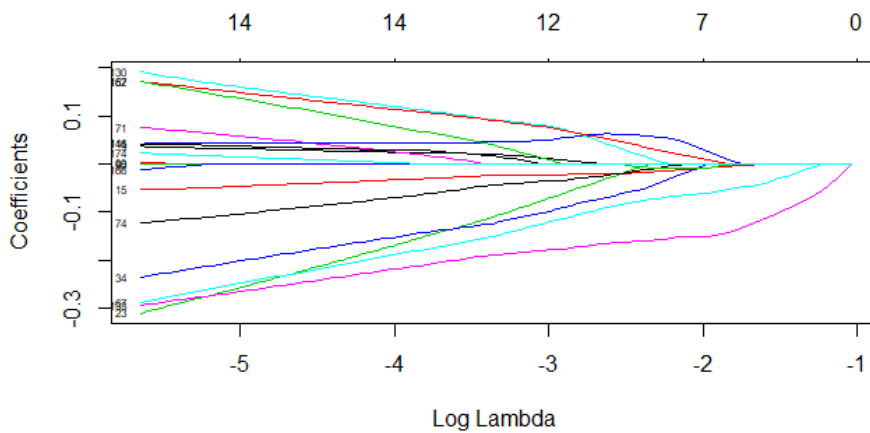


Figura 277: Plot correspondiente al análisis RED-BPGI-E0vsE1

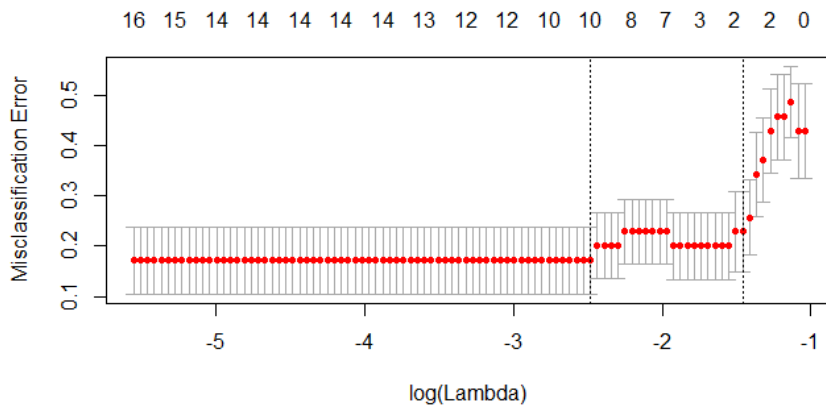


Figura 278: Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE1 (II)

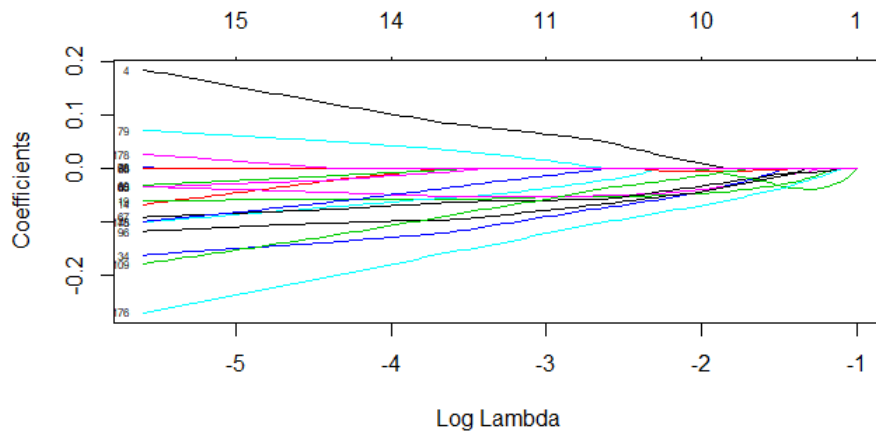


Figura 279: Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE2

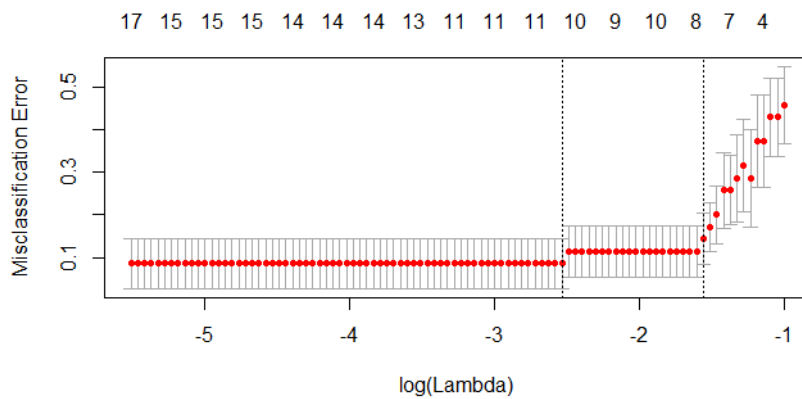


Figura 280: Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE2 (II)

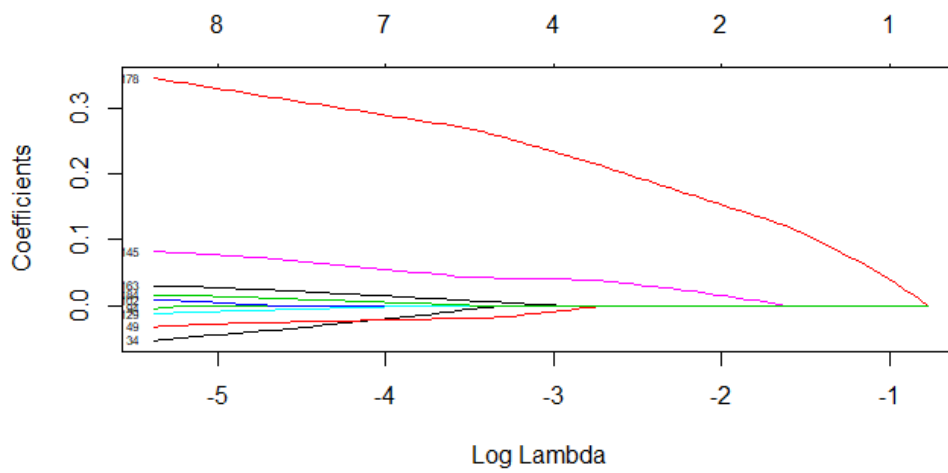


Figura 281: Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE3

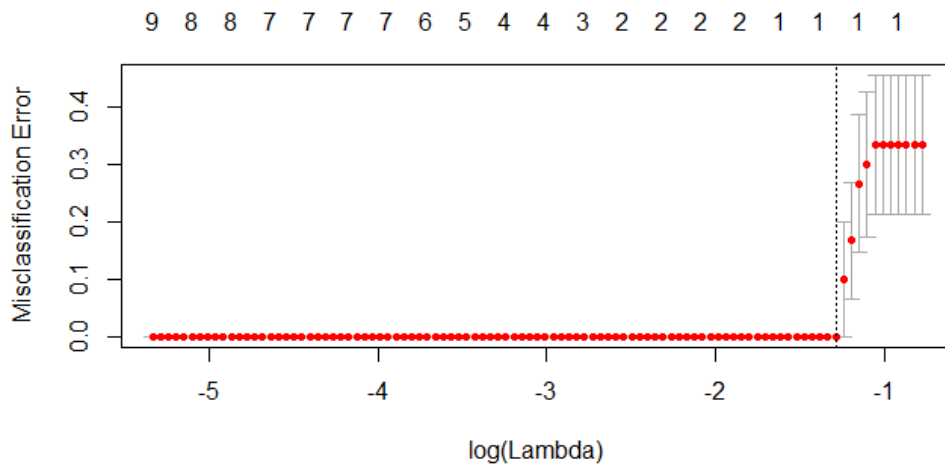


Figura 282: Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE3 (II)

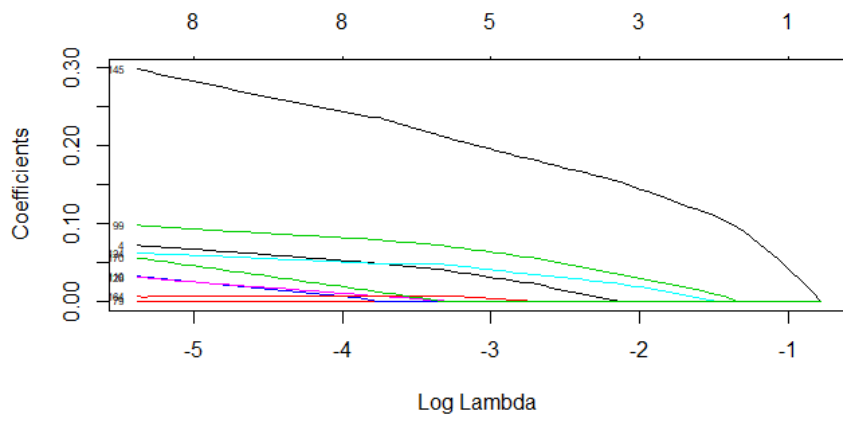


Figura 283: Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE4

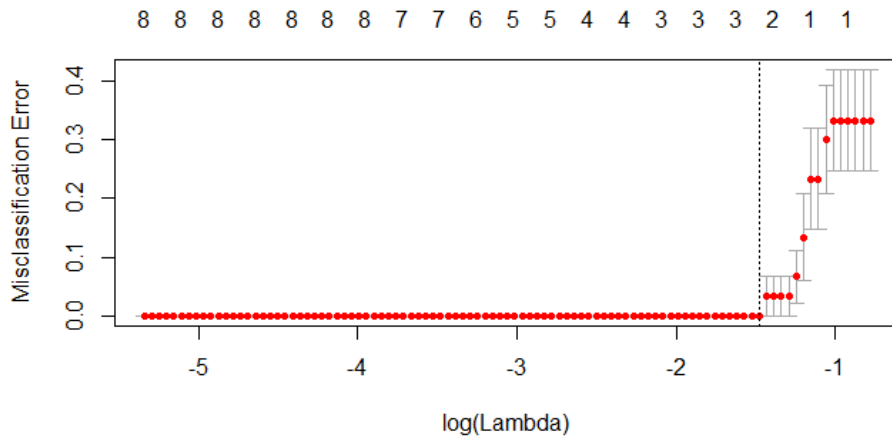


Figura 284: Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE4 (II)

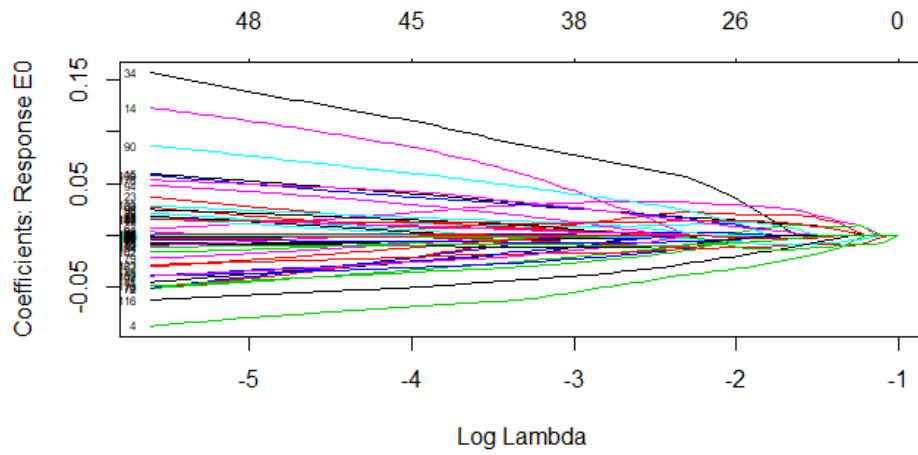


Figura 285: Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

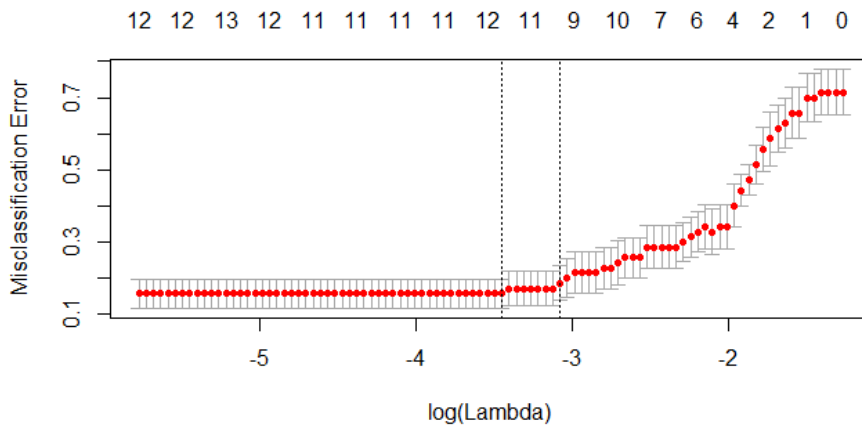


Figura 286: Plot correspondiente al análisis RED-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A5.4 ANÁLISIS BPFO

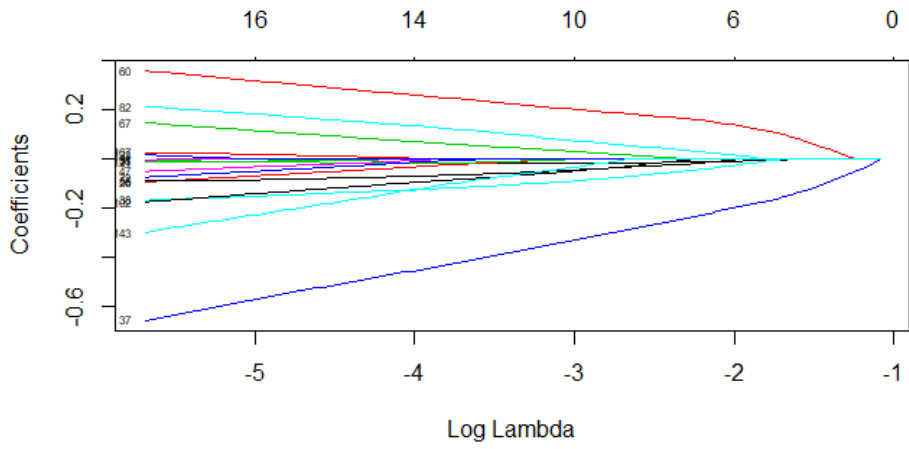


Figura 287: Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE1

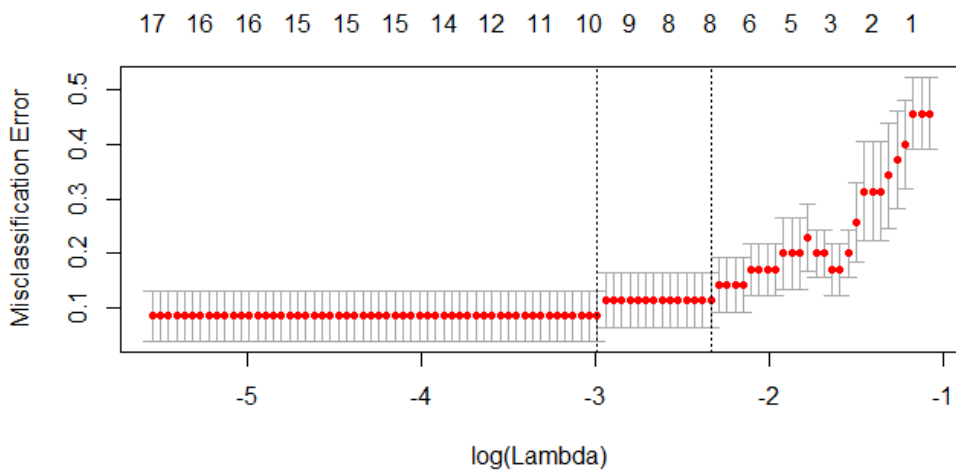


Figura 288: Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE1 (II)

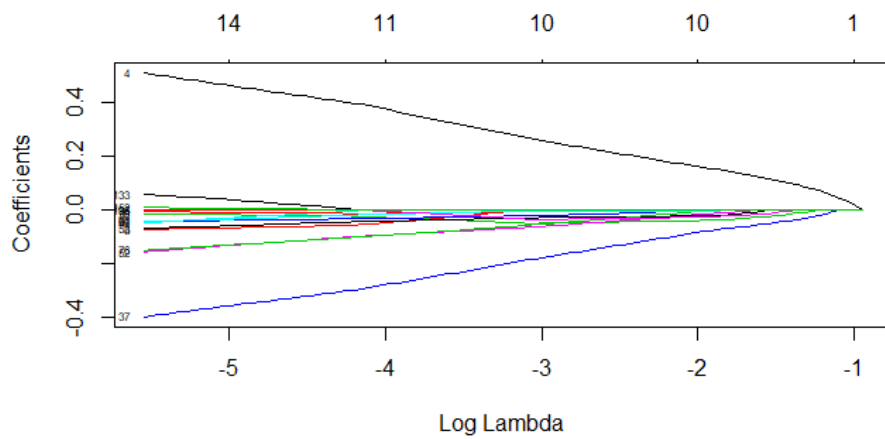


Figura 289: Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE2

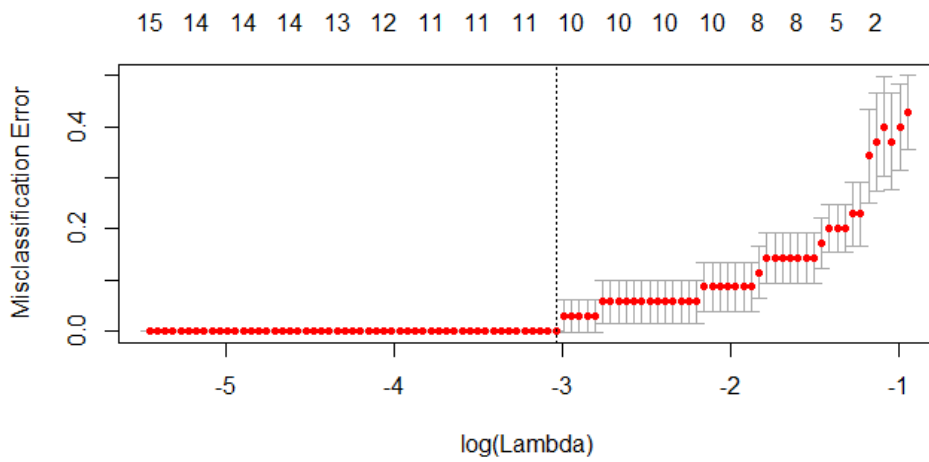


Figura 290: Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE2 (II)

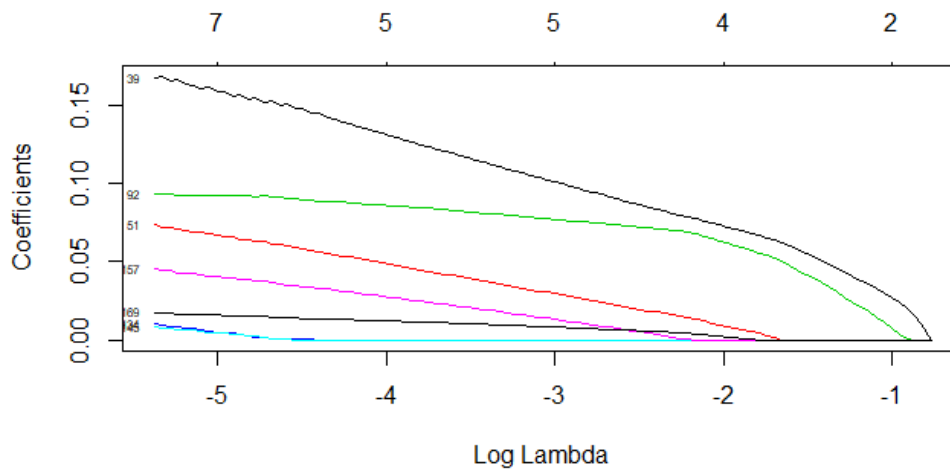


Figura 291: Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE3

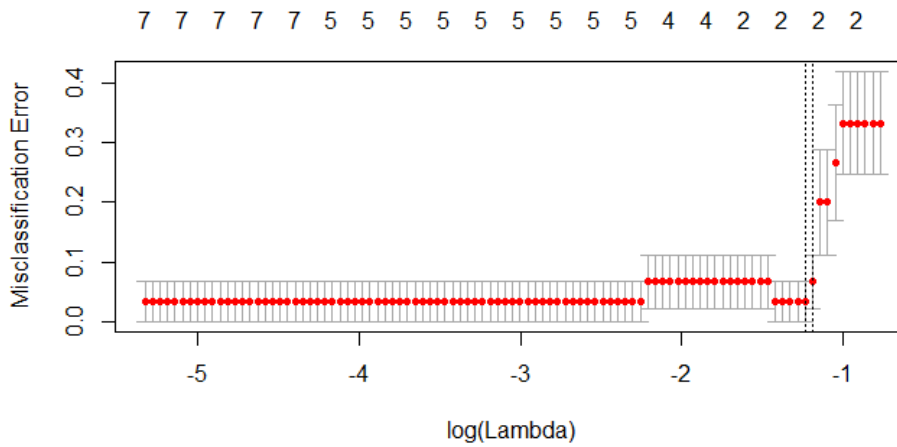


Figura 292: Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE3 (II)



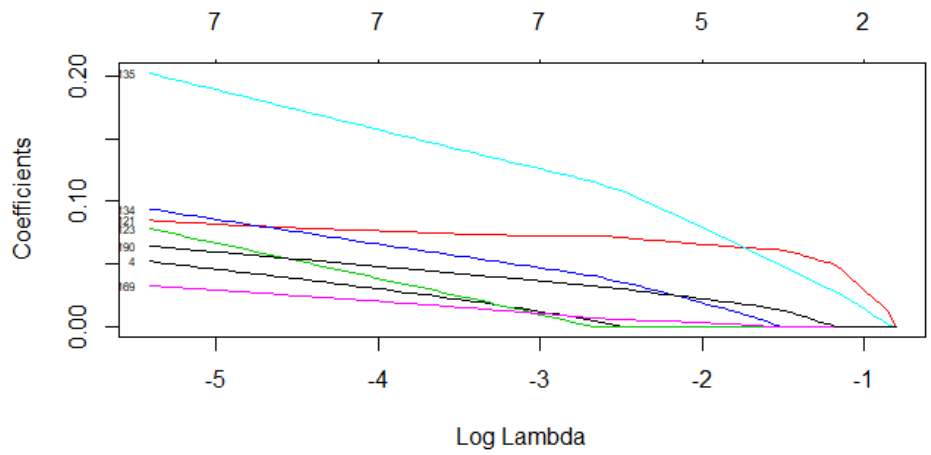


Figura 293: Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE4

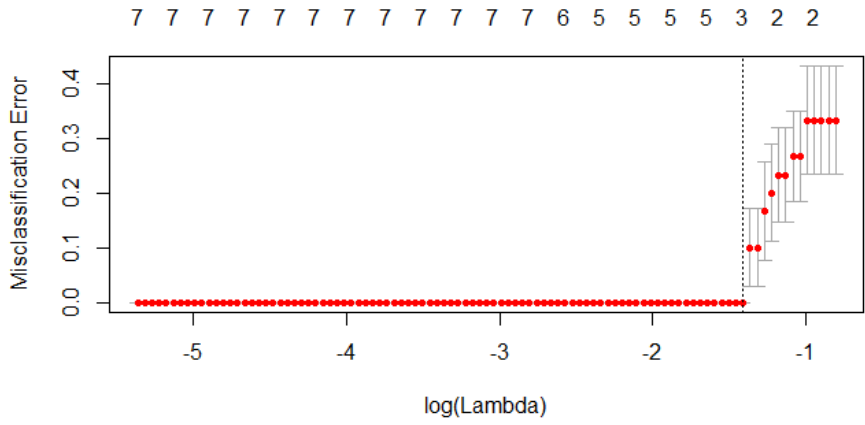


Figura 294: Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE4 (II)

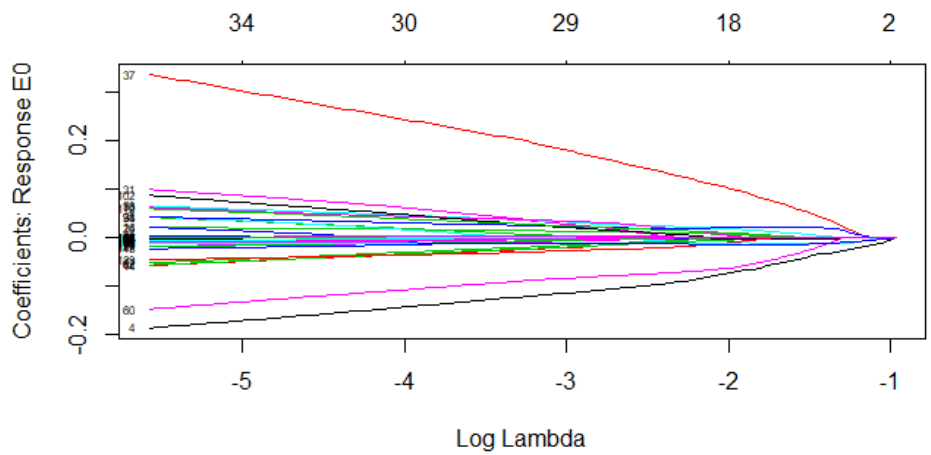


Figura 295: Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

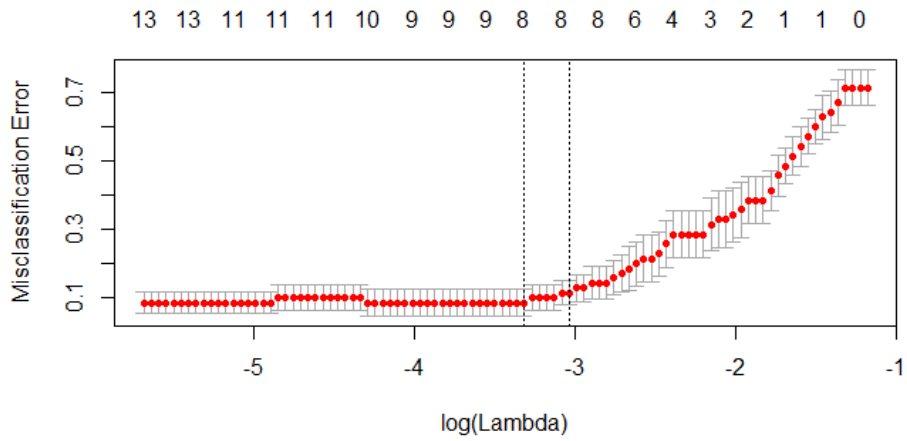


Figura 296: Plot correspondiente al análisis RED-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

### A5.5 ANÁLISIS BSF

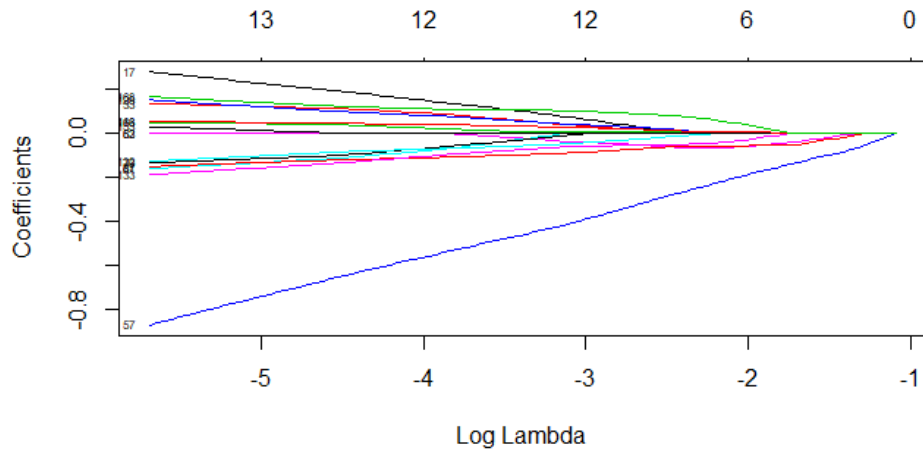


Figura 297: Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE1

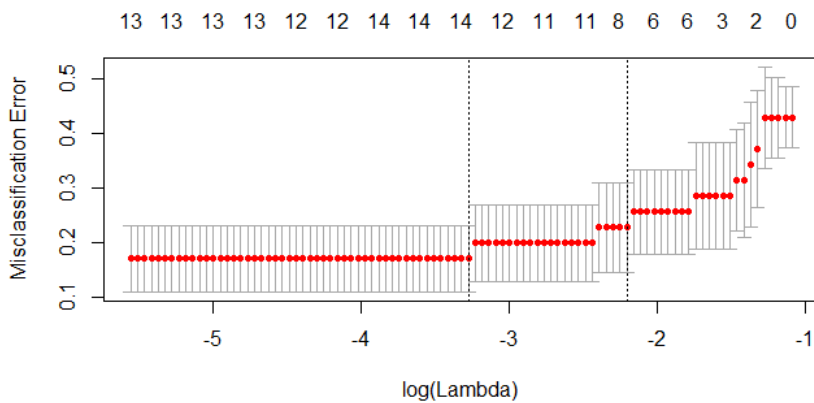


Figura 298: Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE1 (II)

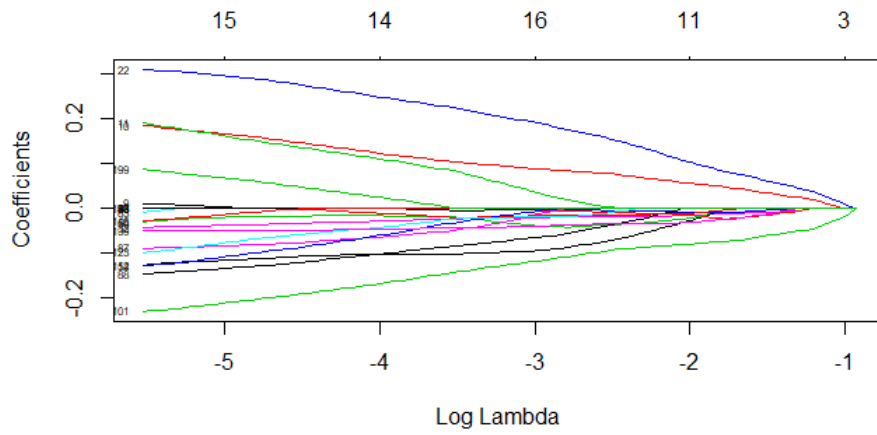


Figura 299: Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE2

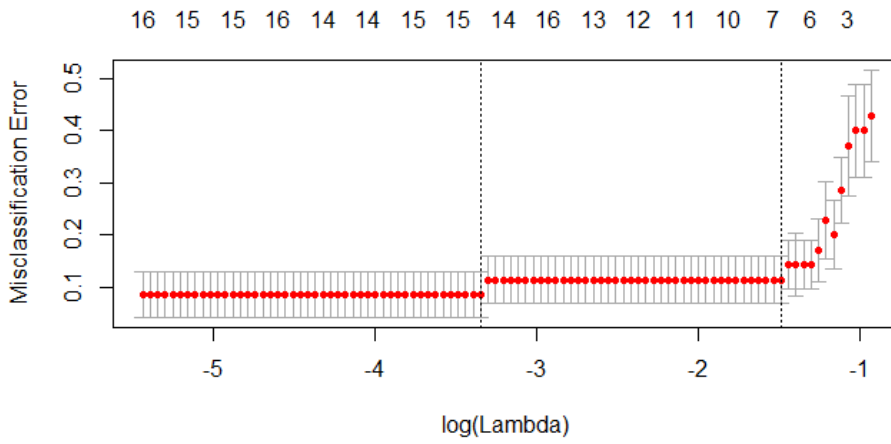


Figura 300: Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE2 (II)

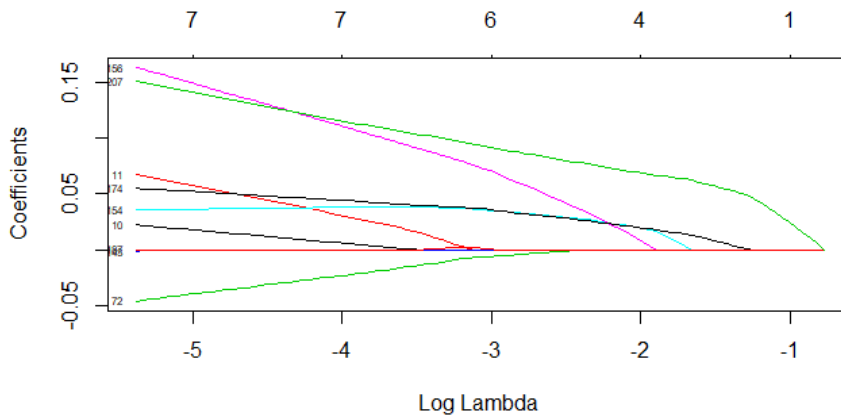


Figura 301: Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE3

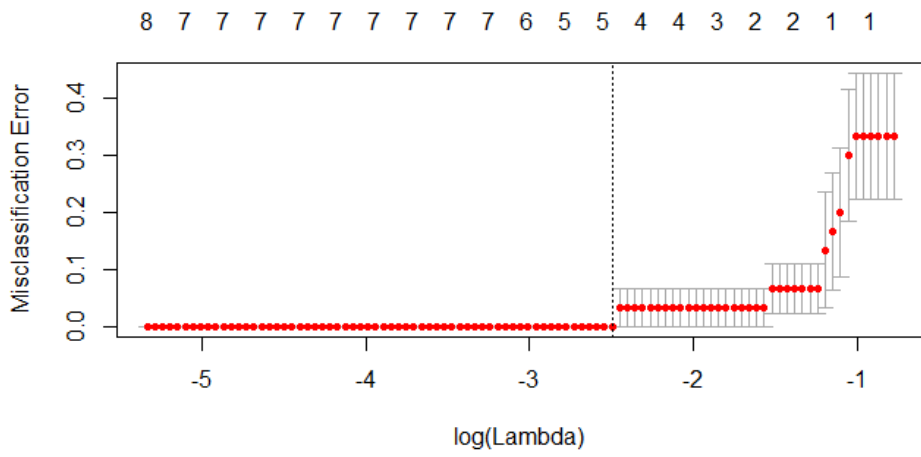


Figura 302: Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE3 (II)

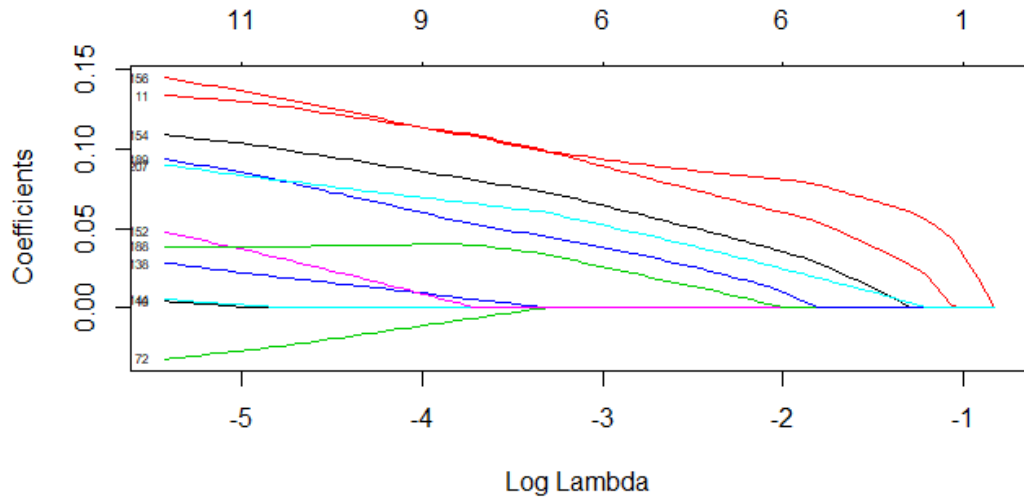


Figura 303: Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE4

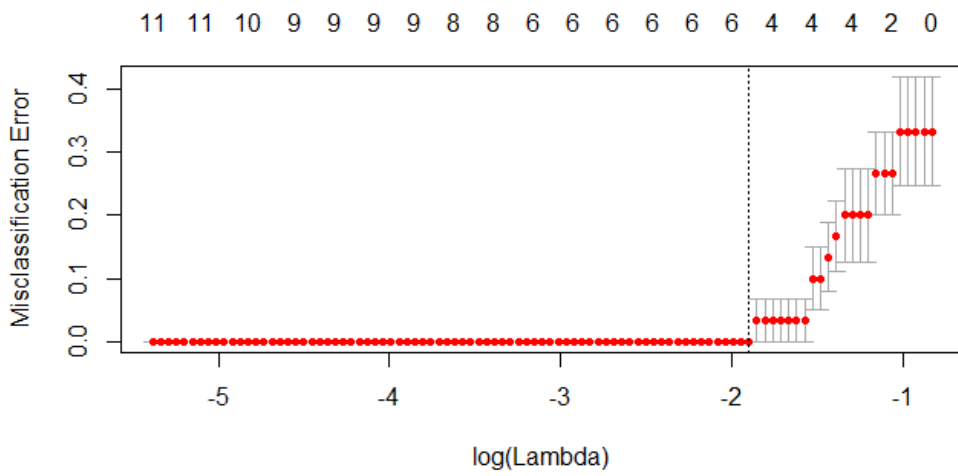


Figura 304: Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE4 (II)

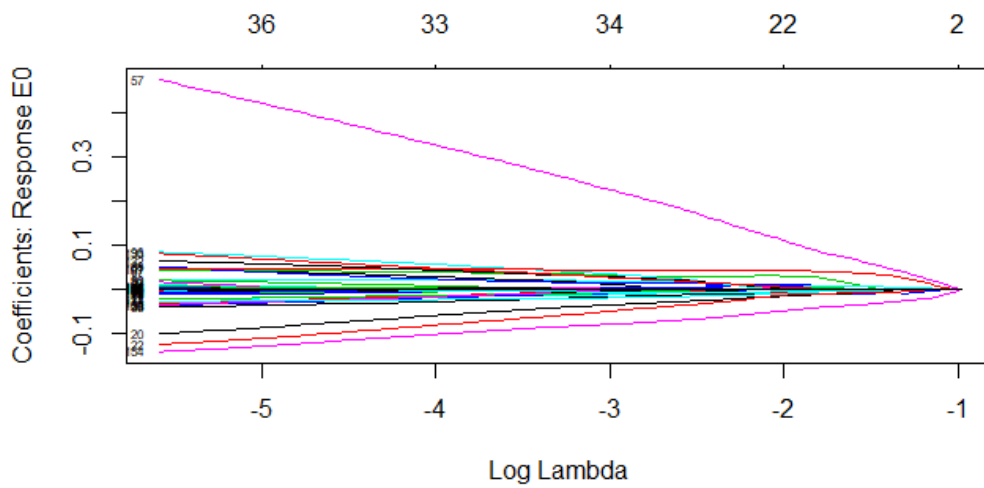


Figura 305: Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

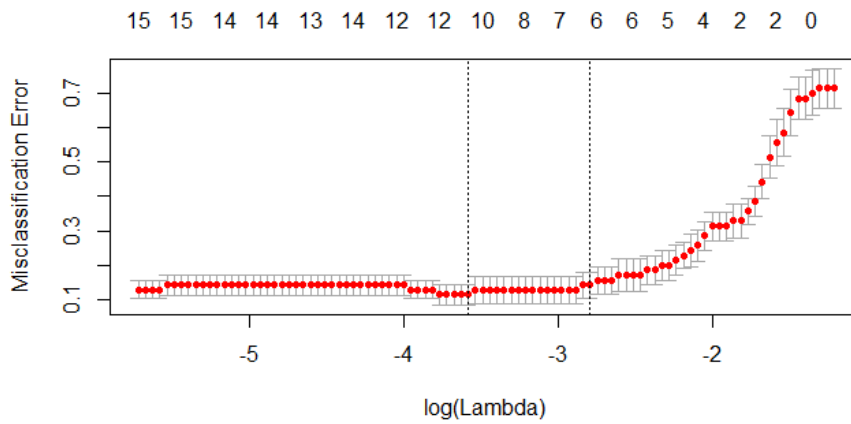


Figura 306: Plot correspondiente al análisis RED-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A6. ANÁLISIS DE WEG

### A6.1 ANÁLISIS COMPLETO

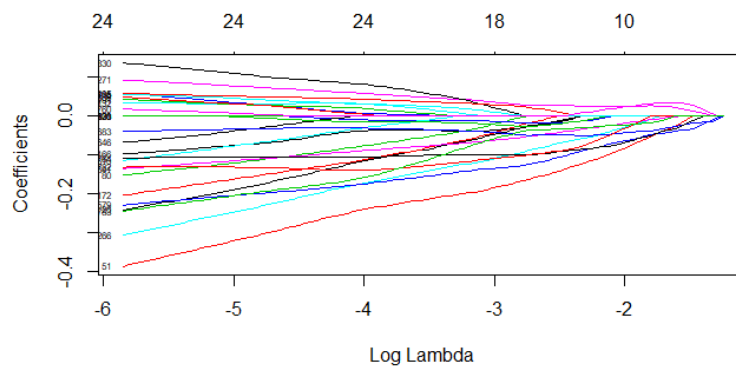


Figura 307: Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE1

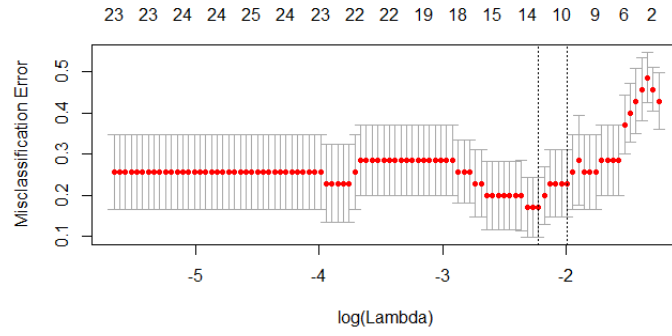


Figura 308: Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE1 (II)

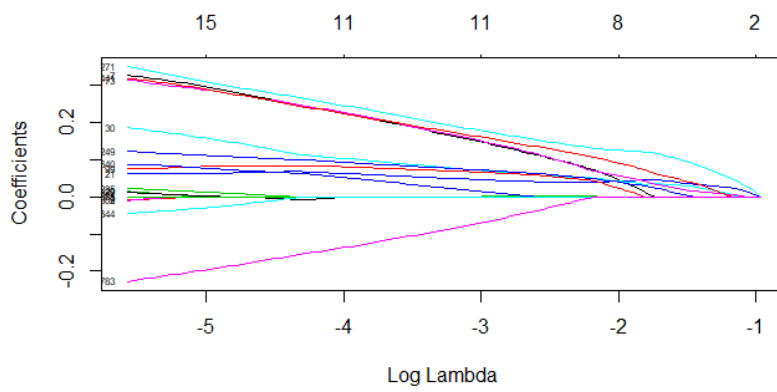


Figura 309: Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE2

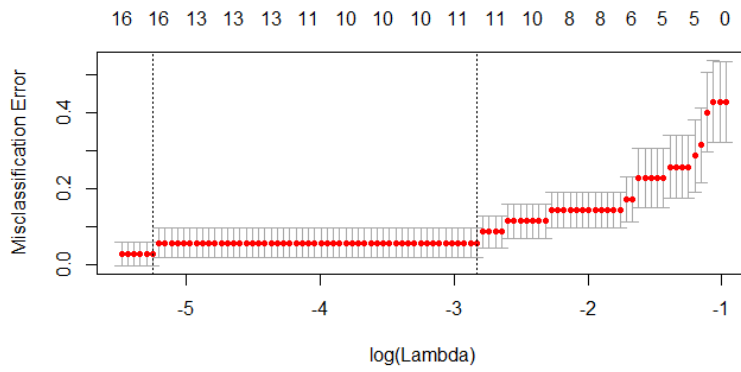


Figura 310: Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE2 (II)

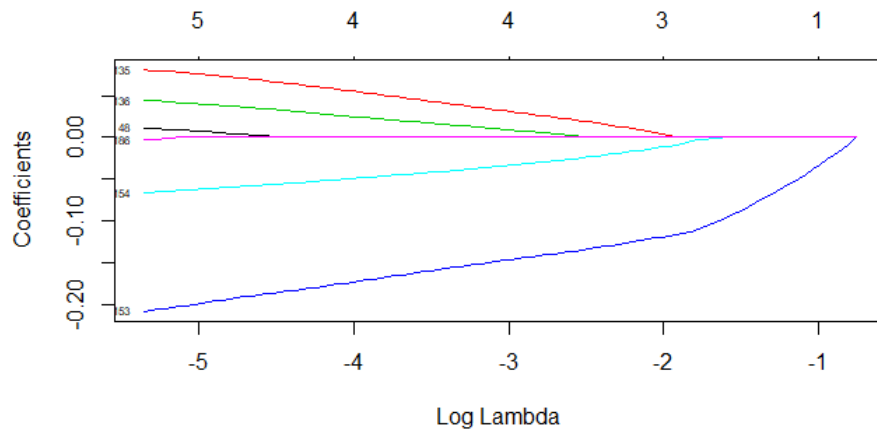


Figura 311: Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE3

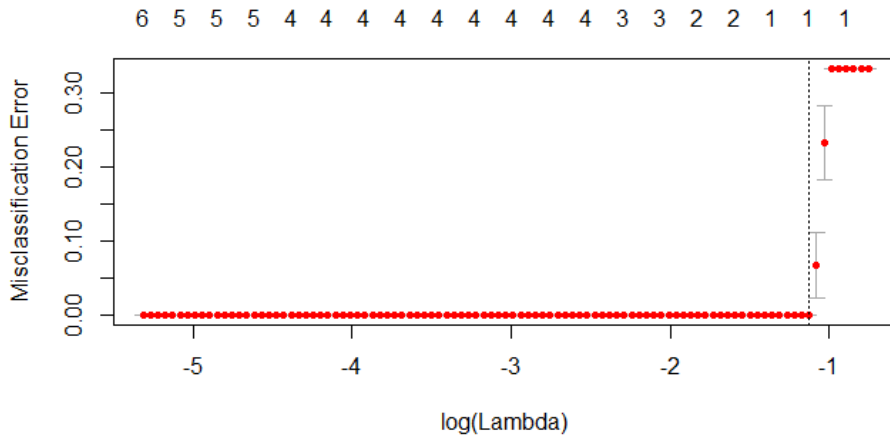


Figura 312: Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE3 (II)

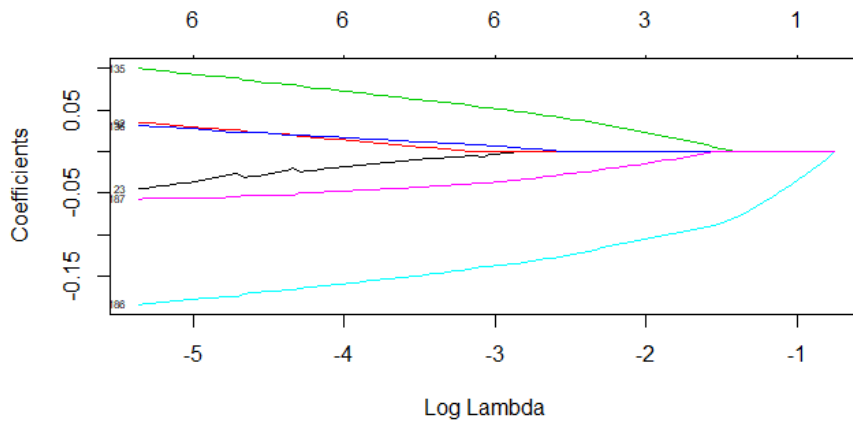


Figura 313: Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE4

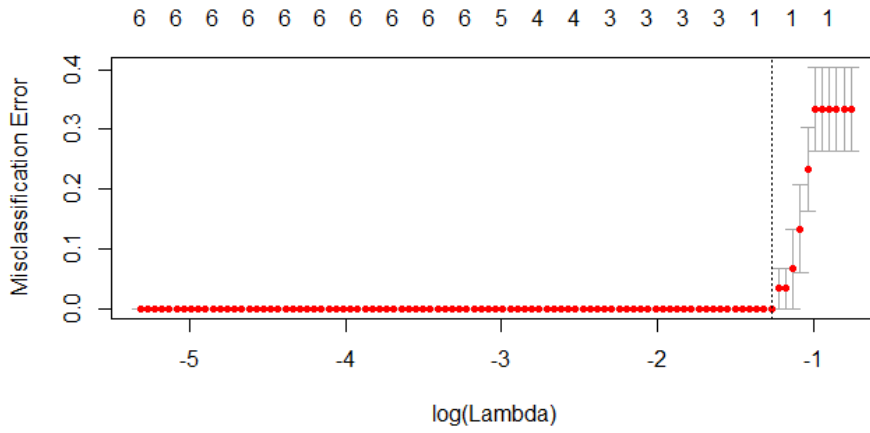


Figura 314: Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE4 (II)

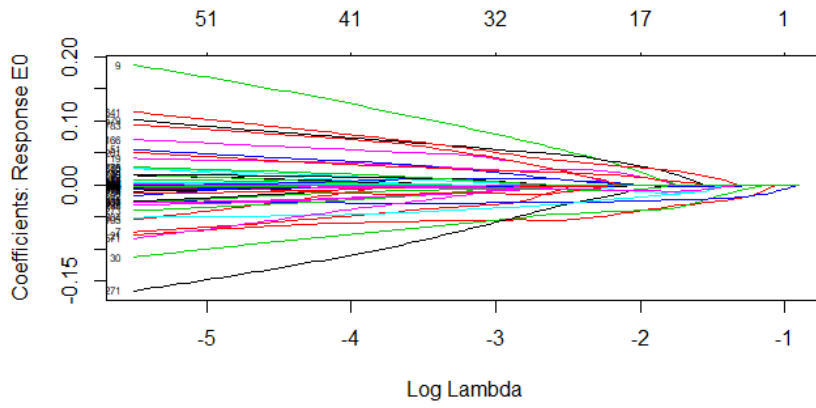


Figura 315: Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

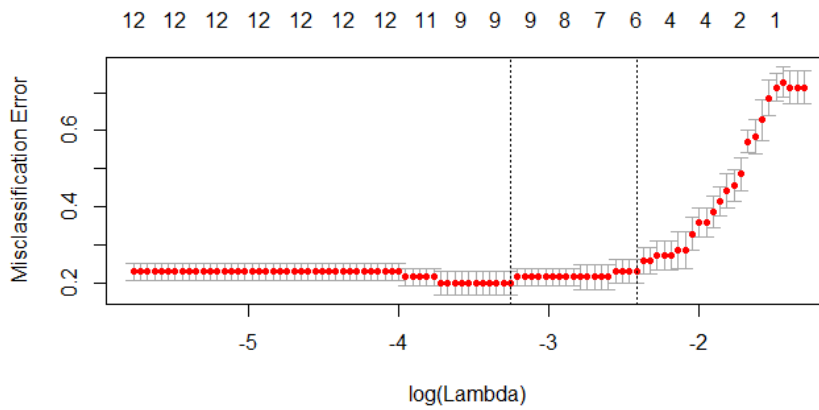


Figura 316: Plot correspondiente al análisis WEG-NC2-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)



## A6.2 ANÁLISIS BFTF

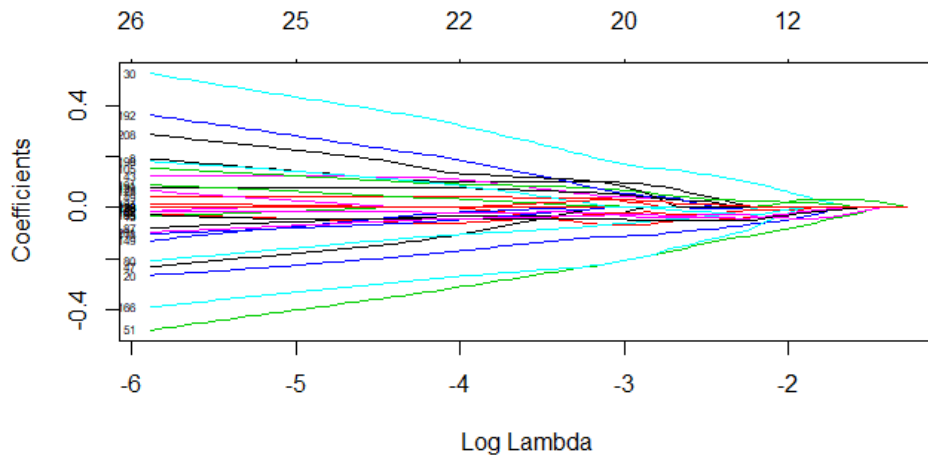


Figura 317: Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE1

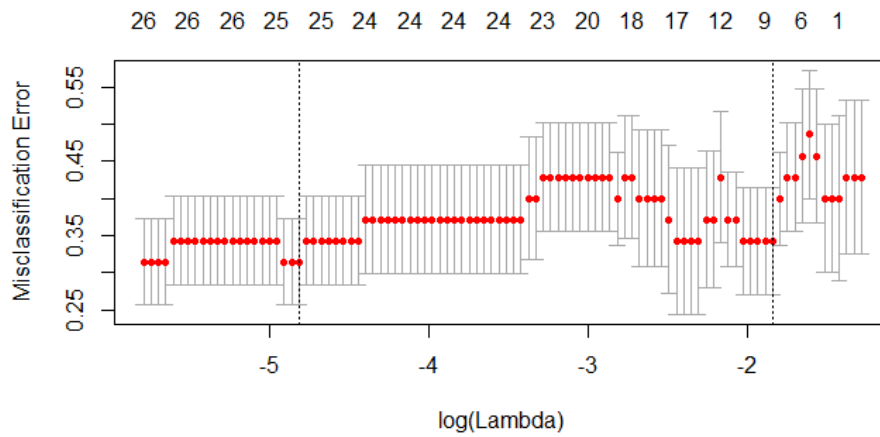


Figura 318: Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE1 (II)

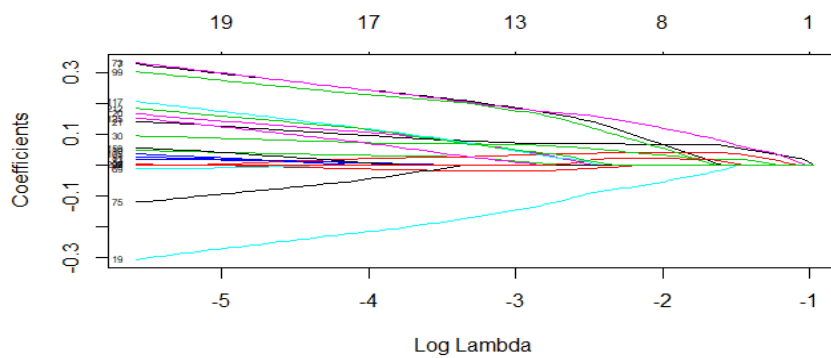


Figura 319: Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE2

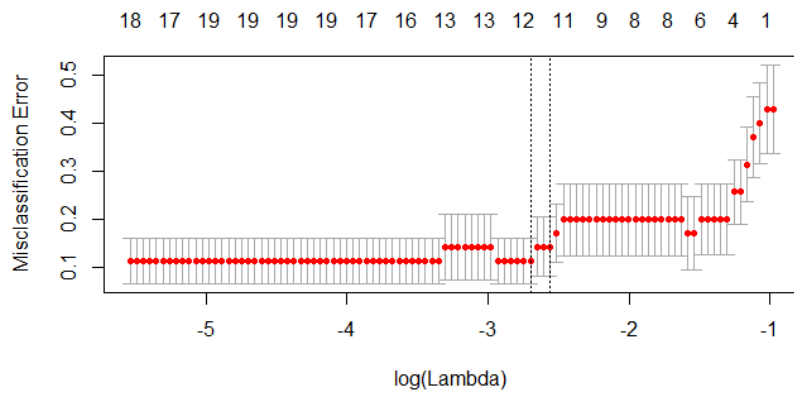


Figura 320: Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE2 (II)

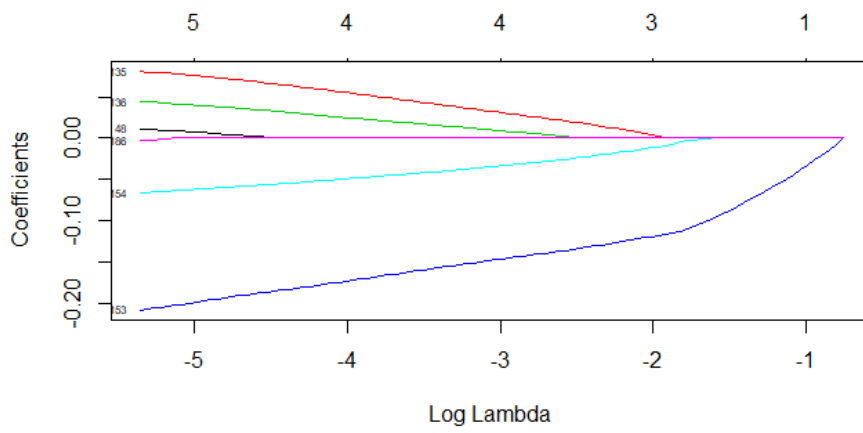


Figura 321: Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE3

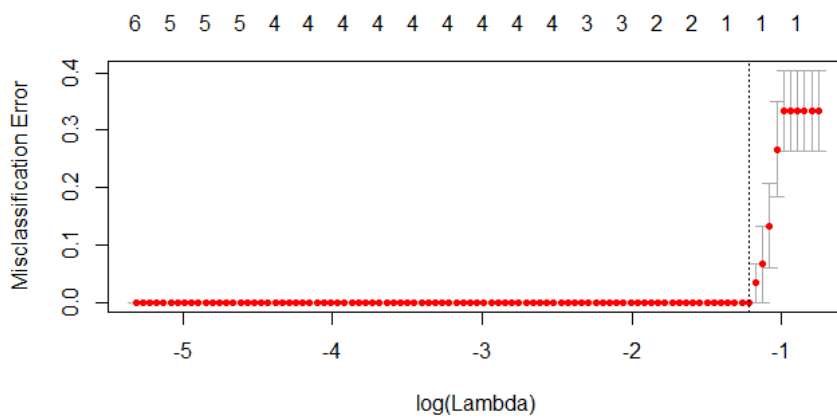


Figura 322: Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE3 (II)

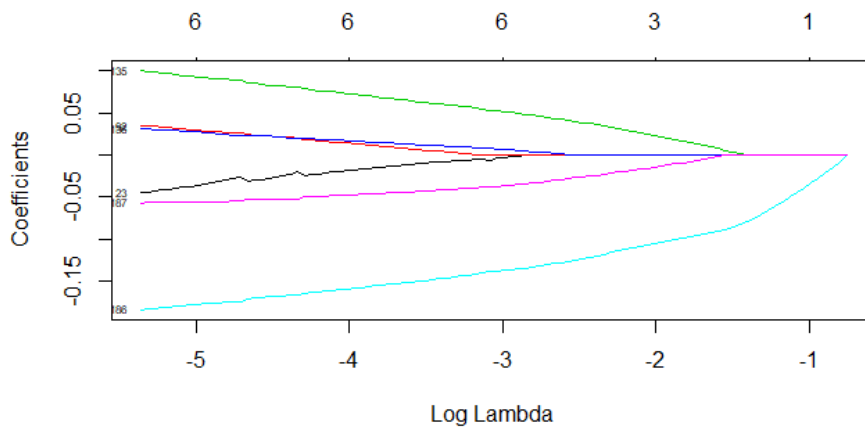


Figura 323: Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE4

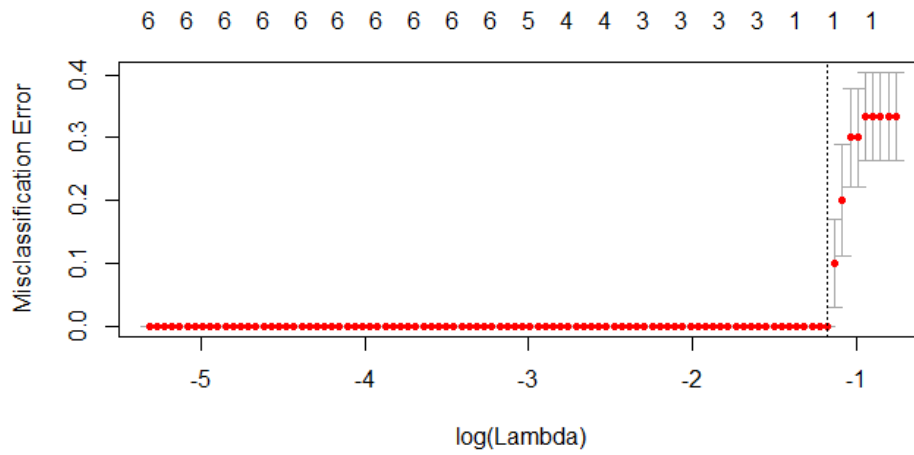


Figura 324: Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE4 (II)

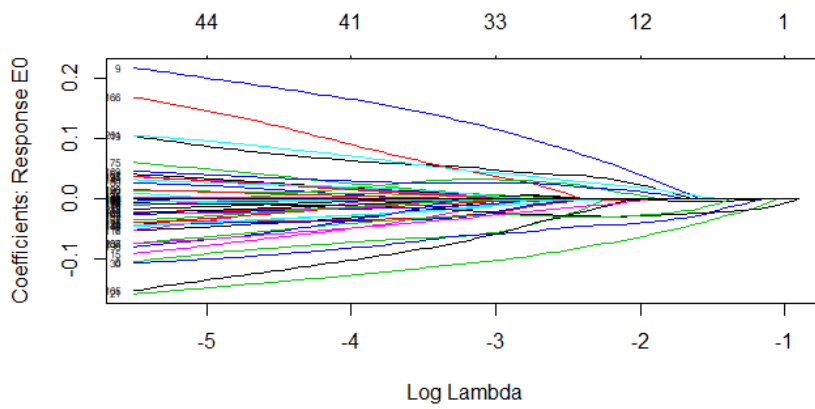


Figura 325: Plot correspondiente al análisis WEG-BFTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

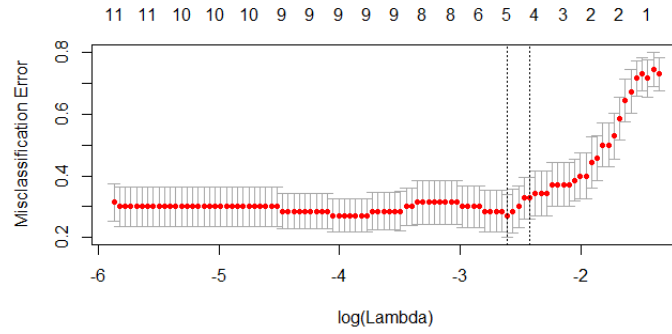


Figura 326: Plot correspondiente al análisis WEG-BTF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

### A6.3 ANÁLISIS BPGI

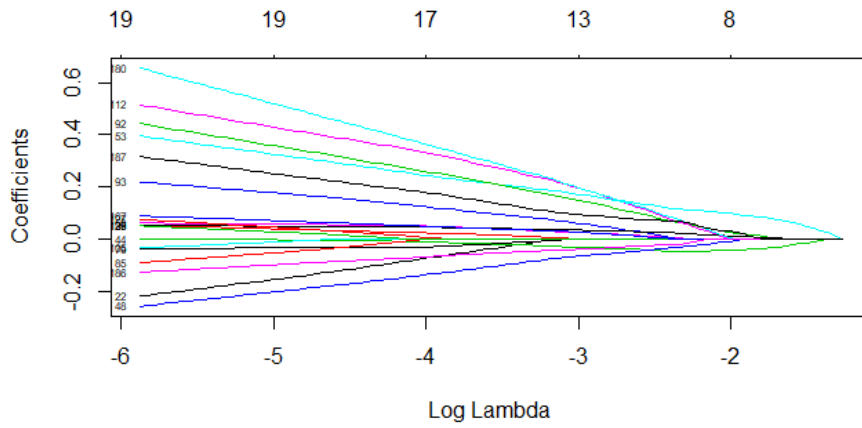


Figura 327: Plot correspondiente al análisis WEG-BPGI-E0vsE1

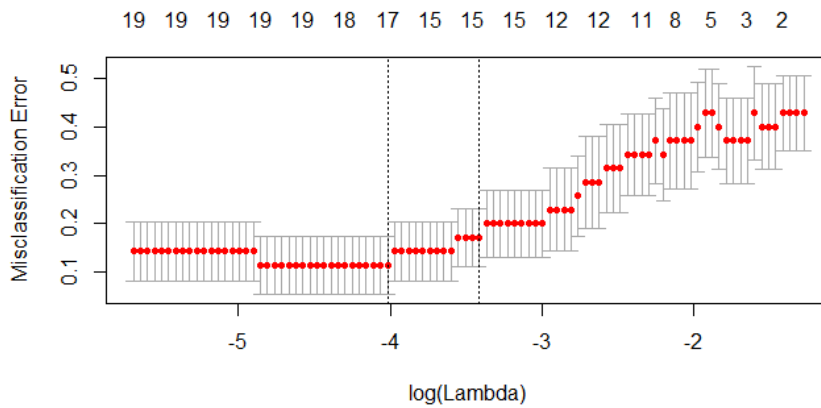


Figura 328: Plot correspondiente al análisis WEG-BPGI-E0vsE1 (II)

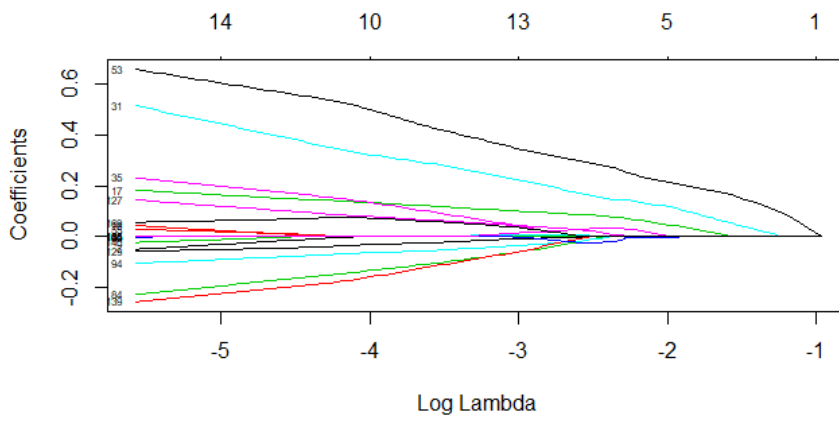


Figura 329: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE2

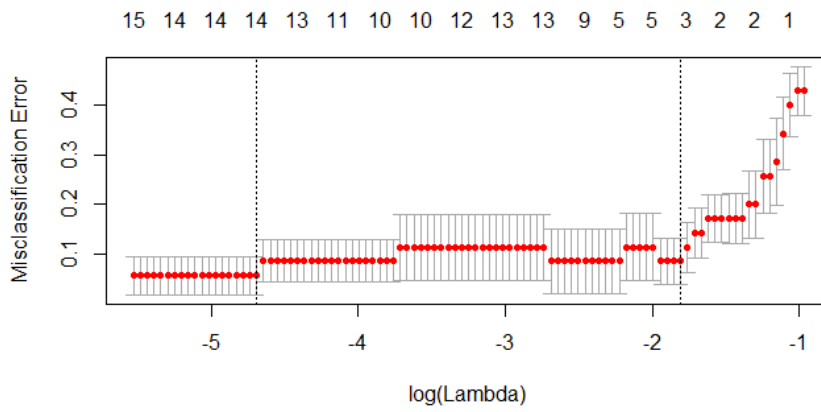


Figura 330: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE2 (II)

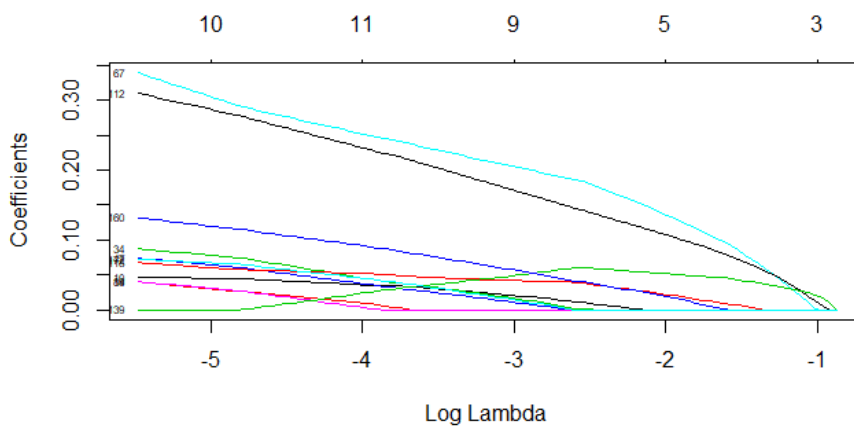


Figura 331: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE3

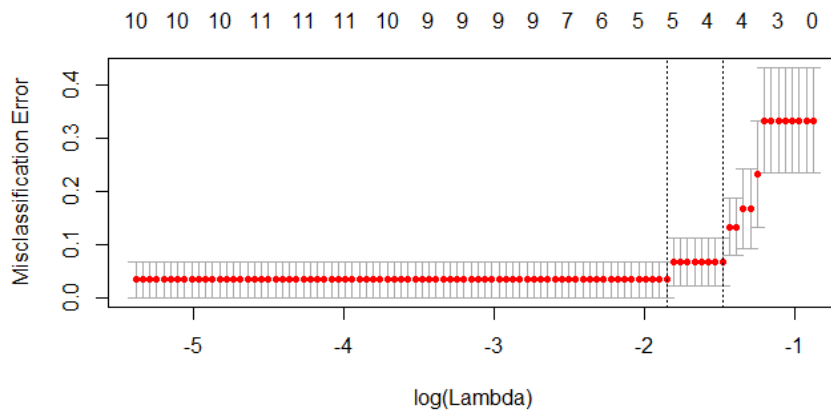


Figura 332: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE3 (II)

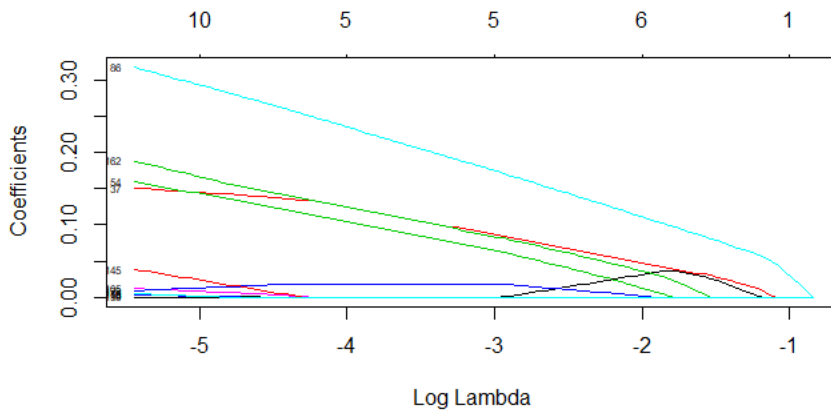


Figura 333: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE4

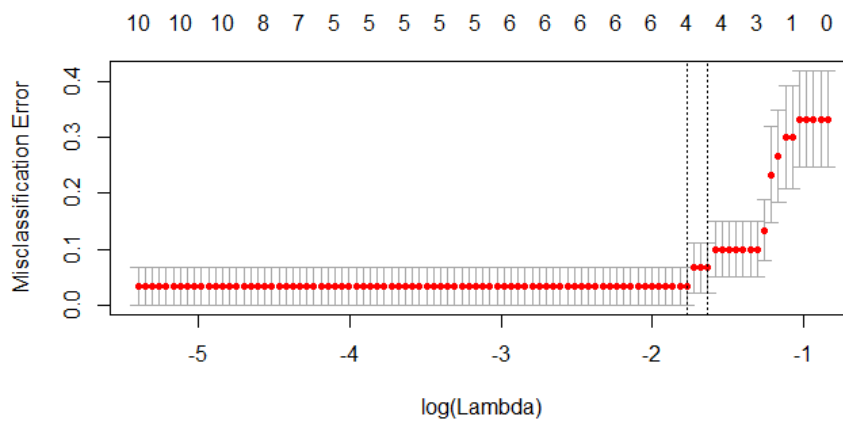


Figura 334: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE4 (II)

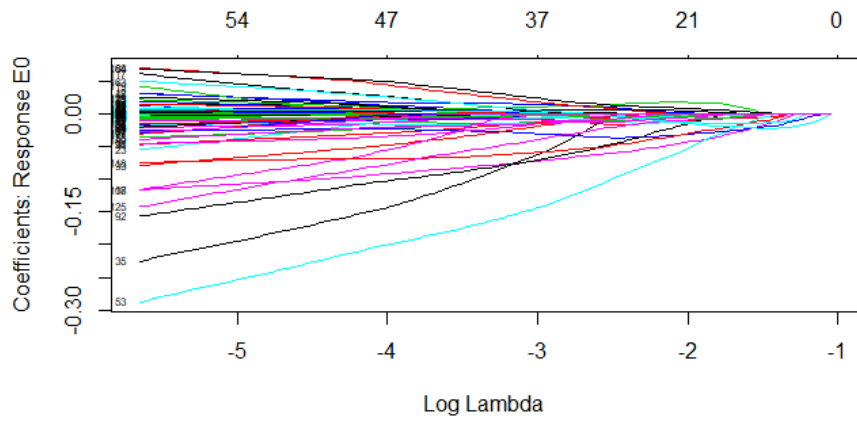


Figura 335: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

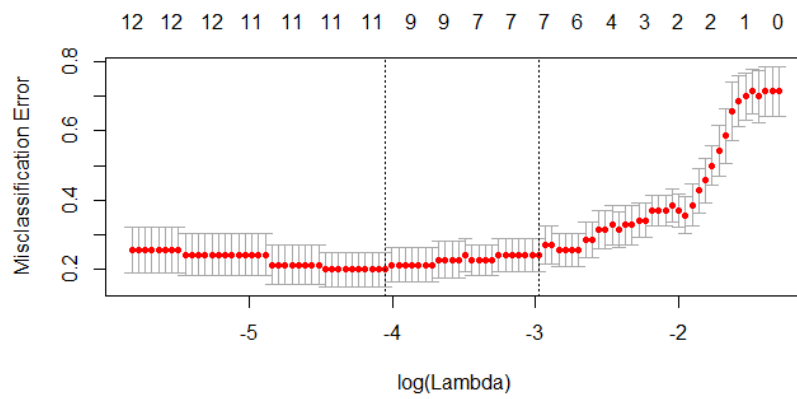


Figura 336: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFI-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A6.4 ANÁLISIS BPFO

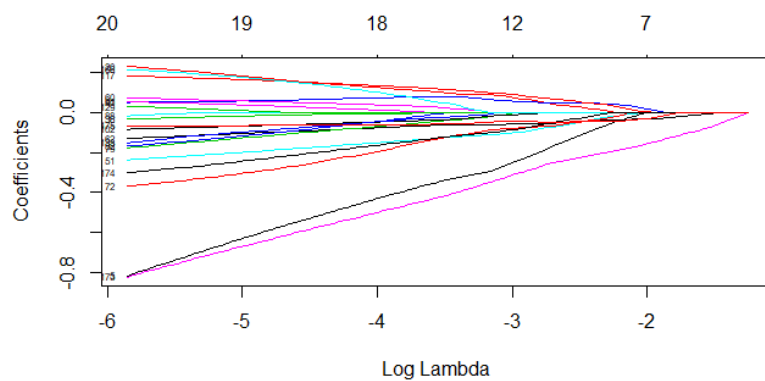
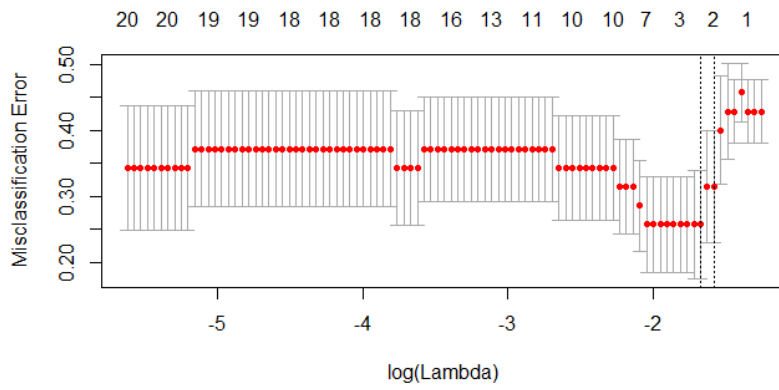
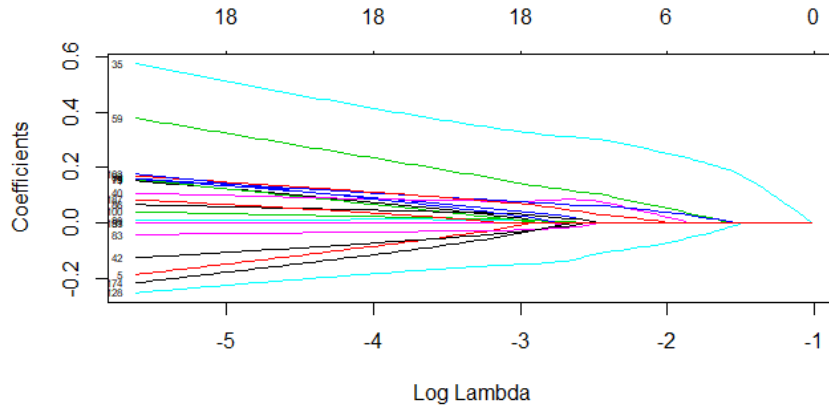


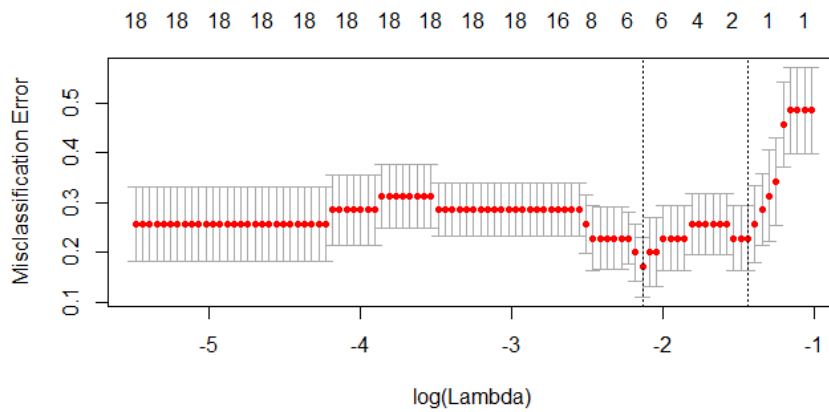
Figura 337: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE1



**Figura 338:** Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE1 (II)



**Figura 339:** Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE2



**Figura 340:** Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE2 (II)



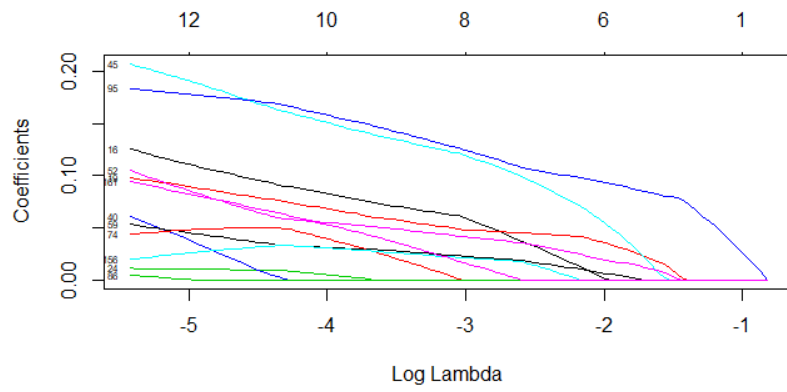


Figura 341: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE3

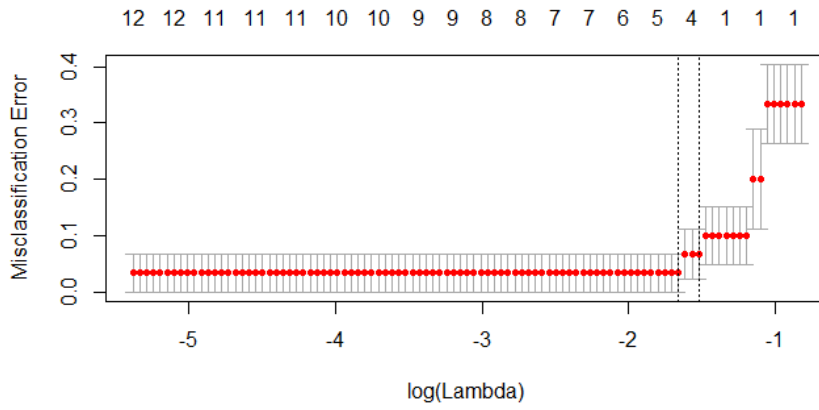


Figura 342: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE3 (II)

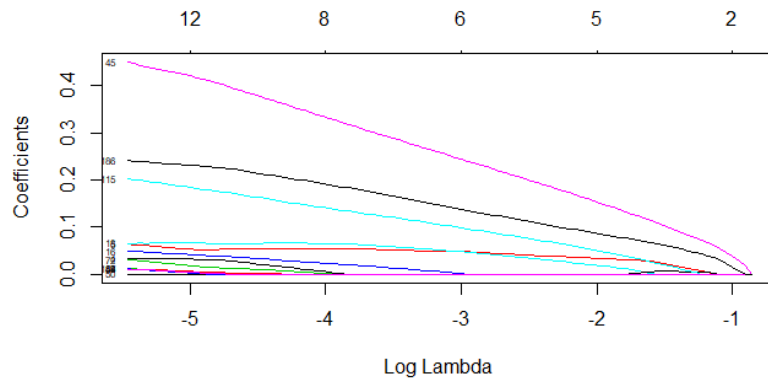


Figura 343: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE4

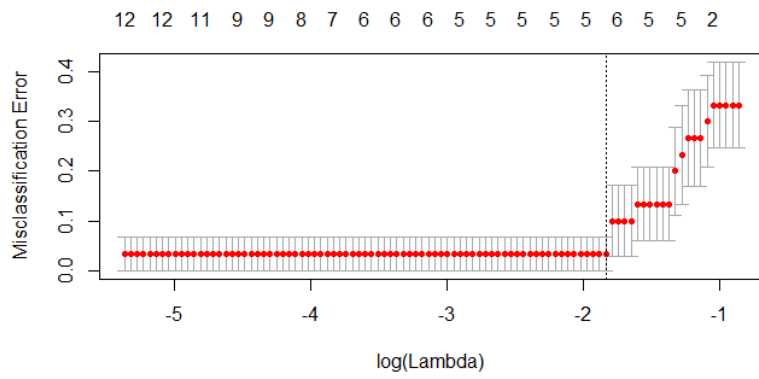


Figura 344: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE4 (II)

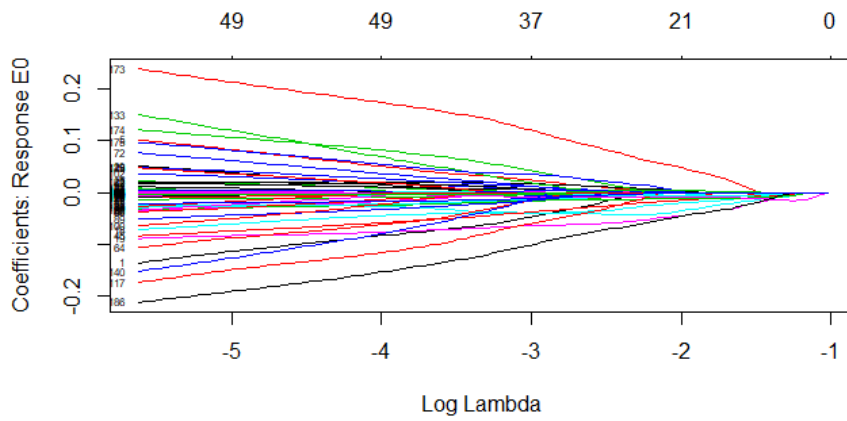


Figura 345: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

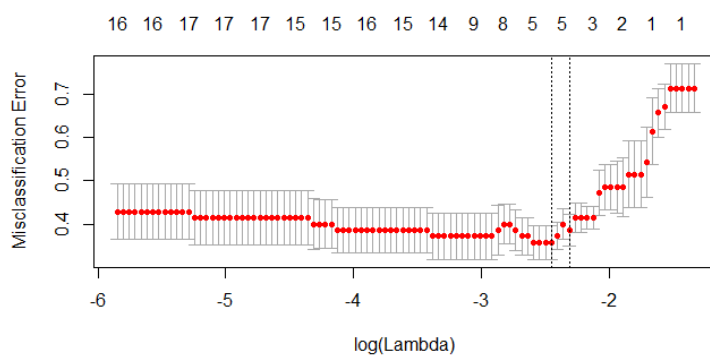


Figura 346: Plot correspondiente al análisis WEG-BPFO-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

## A6.5 ANÁLISIS BSF

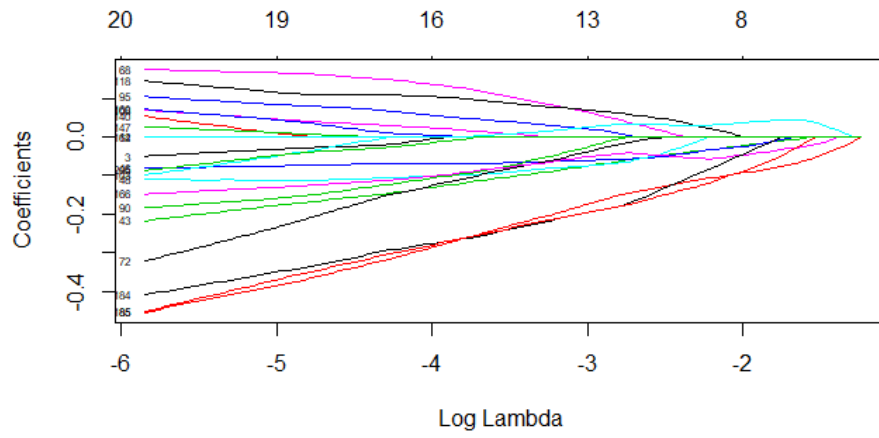


Figura 347: Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE1

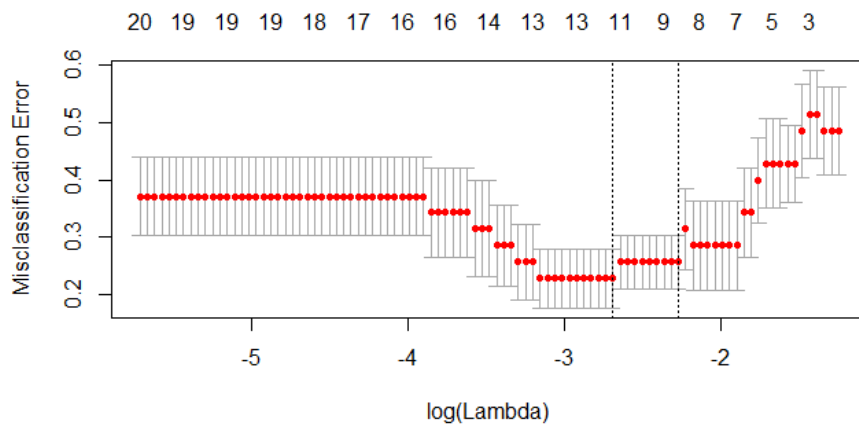


Figura 348: Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE1 (II)

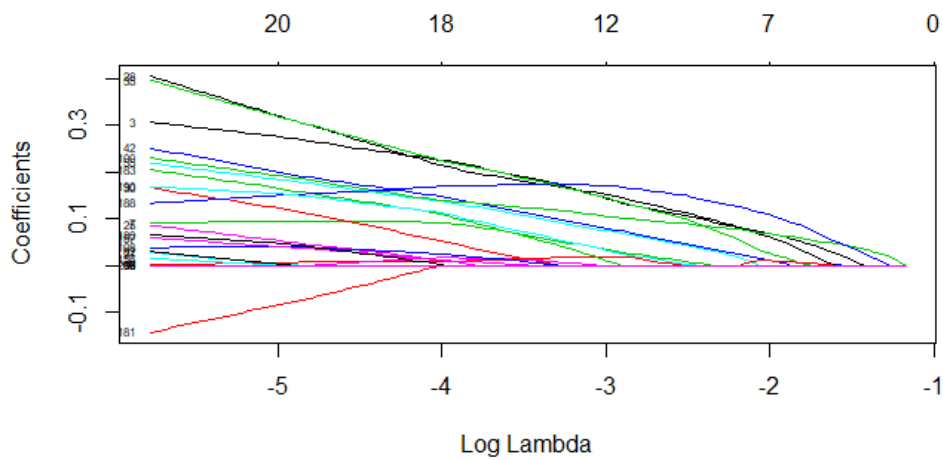


Figura 349: Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE2

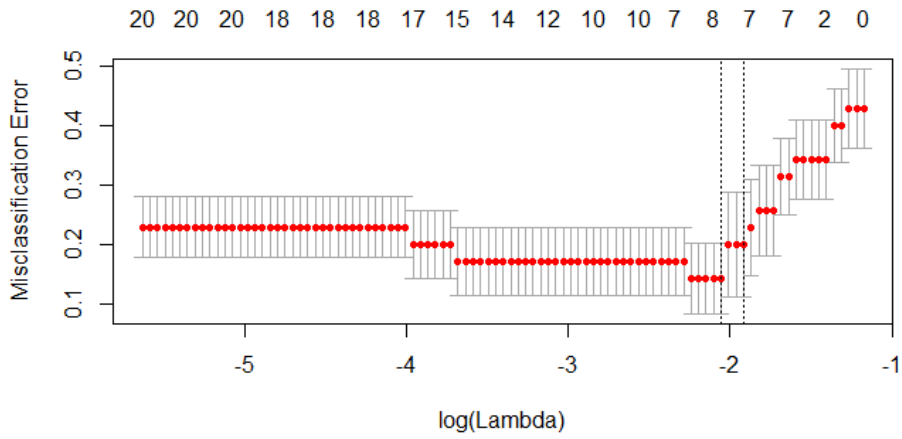


Figura 350: Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE2 (II)

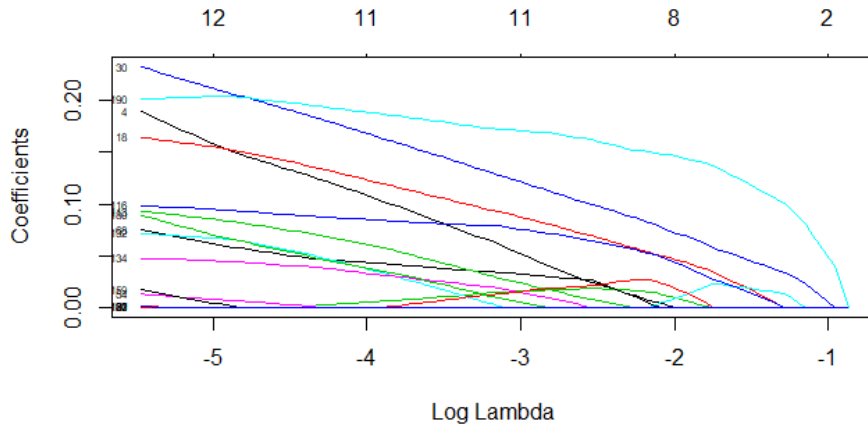


Figura 351: Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE3

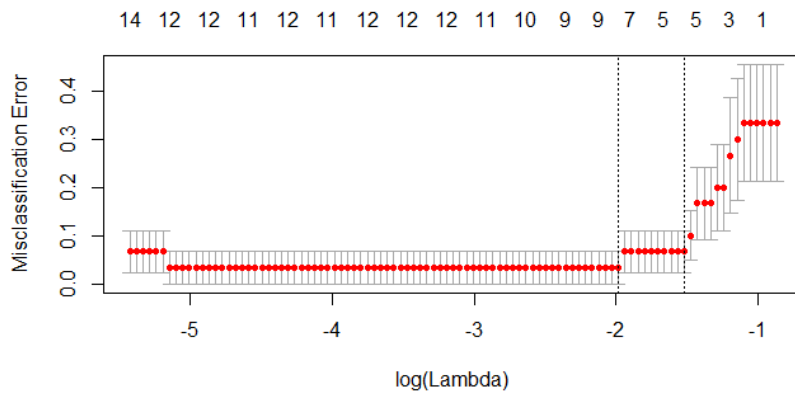


Figura 352: Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE3 (II)

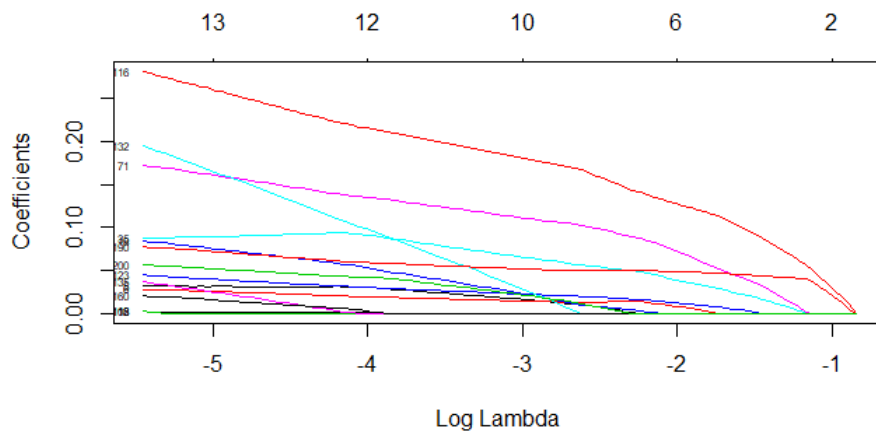


Figura 353: Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE4

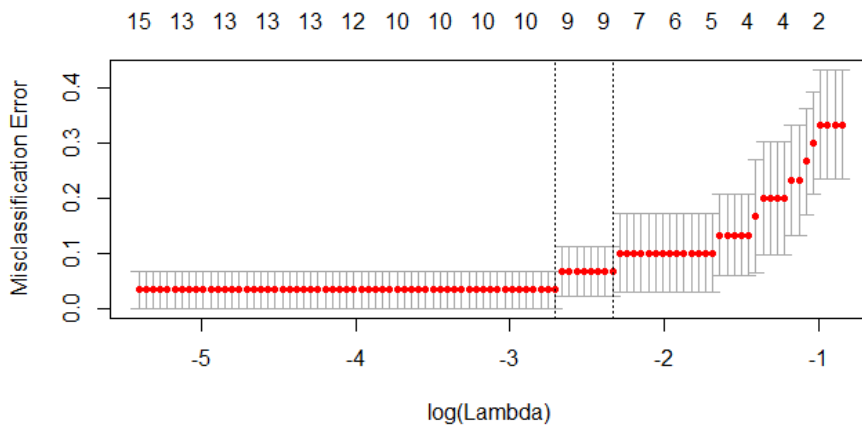


Figura 354: Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE4 (II)

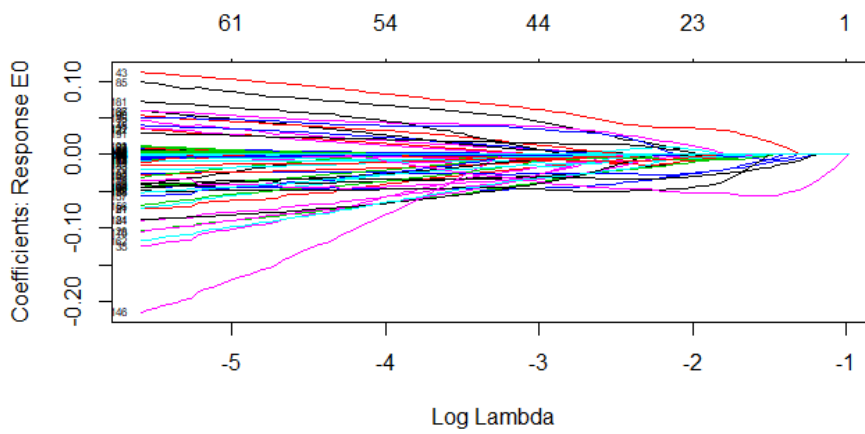


Figura 355: Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4

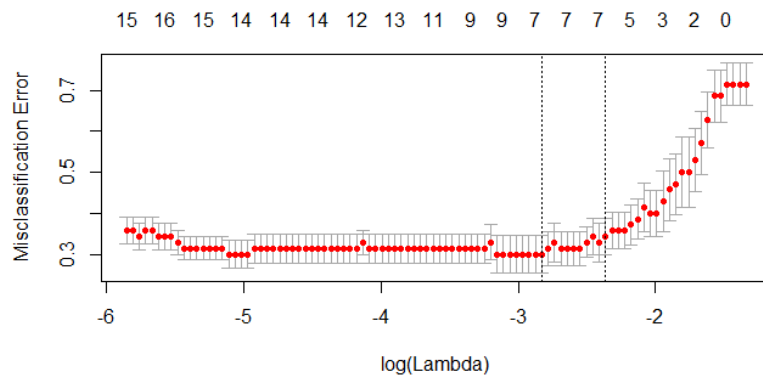


Figura 356: Plot correspondiente al análisis WEG-BSF-E0vsE1vsE2vsE3vsE4 (II)

---

## ANEXO B: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

---

En este anexo se podrán observar los diferentes códigos de programación en R empleados en el presente TFG correspondientes al variador AB1. Para la realización del TFG se tuvo que programar el código para el resto de variadores (AB2, AB3, AB3, RED, WEG) pero debido a la similitud del código no se han recogido en el presente trabajo.

Asimismo, dada la similitud de programación entre los análisis completos con todas las variables y los análisis realizados con una sola variable (bien BFTF, BPFI, BPFO o BSF), se recoge a continuación el código para el análisis completo.

Debemos recordar que la base de datos la obtuvimos del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid los cuales se encontraban repartidos en diferentes archivos. Lo que realizamos en primer lugar fue juntar todos esos archivos en una misma hoja de Excel. Posteriormente, y para su simplificación, creamos una hoja de Excel para cada comparación binaria y variador lo que nos permitía ganar tiempo de programación.

## B1. CÓDIGO PARA EL ANÁLISIS COMPLETO DE AB1

```
##Ejemplo de un análisis completo comparando cuando el motor
está completamente sano contra el motor completamente roto
(E0vsE4)

#Se cargan las librerías que vamos a utilizar

library(readxl)
library(glmnet)

#Se lee la matriz de datos que hemos creado para esta
comparación y variador en Excel previamente.

AB1_NC2_E0vsE4 <- read_excel("C:/Users/JoséIgnacio/Desktop/
INGENIERIA DE ORGANIZACION/TFG/R/LASSO DESPUES DEL 19-04/AB
1-NC2/AB1-NC2-E0vsE4.xlsx", range = "C1:AEE31")

#Visualizamos la matriz leída para comprobar que no hay err
ores.

View (AB1_NC2_E0vsE4)

#Definimos la variable x, que es la variable de los datos,
y definimos la variable y, que será la variable respuesta.

x <- AB1_NC2_E0vsE4[,-1]
y <- AB1_NC2_E0vsE4[1]

#Dada la estructura del paquete glmnet es necesario que ambas
variable, x e y, se encuentren en formato matriz.

X <- as.matrix(x)
Y <- as.matrix(y)

**Para el caso concreto del análisis multinomial debemos re
definir el orden de los niveles del factor Y para que "E0" s
e convierta en la clase referencia**

Y1 <- factor(Y, levels = c("E4", "E3", "E2", "E1", "E0" ))**De a
quí en adelante, la única diferencia con la regresión binar
ia sería el sustituir la variable Y por la variable Y1**

#A continuación, utilizamos la función glmnet para obtener
el LASSO. Posteriormente, visualizamos el gráfico de interé
s.
```



```
gl_AB1_E0vsE4 <- glmnet (X,Y,family = "binomial",offset=NULL,  
L,alpha=1,nlambda=100)
```

```
plot(gl_AB1_E0vsE4,xvar="lambda",label=T)
```

#Para el elemento obtenido mediante *glmnet*, utilizamos *cv.glmnet* para realizar una validación cruzada que nos devuelva la lambda óptima así como los coeficientes resultantes en el modelo. Seguidamente, visualizamos el gráfico.

```
cvgl_AB1_E0vsE4 <- cv.glmnet (X,Y,offset = NULL,family="binomial",  
type.measure="class")
```

```
plot(cvgl_AB1_E0vsE4)
```

#Mostramos el valor de los coeficientes de las variables que resultan significativas en el modelo para la lambda elegido.

```
coef (cvgl_AB1_E0vsE4, s ="lambda.min")
```

#Programamos la clasificación aparente del modelo. Para ello, utilizamos la función *predict* que nos permite predecir los resultados cuando introducimos un nuevo conjunto de datos *newx*. En este caso, al ser la clasificación aparente, el conjunto de datos que se incluye es el mismo con el que se ha programado el modelo (X).

```
results_AB1_E0vsE4 <- predict(cvgl_AB1_E0vsE4,s="lambda.min",  
newx=X,type="class")  
tabla_AB1_E0vsE4 <- table(results_AB1_E0vsE4,Y)  
tabla_AB1_E0vsE4  
clasificacion_AB1_E0vsE4 <- 100*sum(diag(tabla_AB1_E0vsE4))  
/sum(tabla_AB1_E0vsE4)  
clasificacion_AB1_E0vsE4
```

#Definimos un vector *R* completamente vacío para que se almacenen en él los resultados del bucle que programaremos para obtener la bondad del modelo.

```
R = NULL
```

```
#Programación del bucle for para obtener un número de veces la bondad del modelo.
```

```
for(i in 1:100) {  
  dt <- sort(sample(nrow(AB1_NC2_E0vsE4),nrow(AB1_NC2_E0vsE4)*0.75)) #Definición del número de datos que queremos de entrenamiento.  
  train <- AB1_NC2_E0vsE4[dt,]  
  test <- AB1_NC2_E0vsE4[-dt,]  
  
  x_train <- train [,-1]  
  x_test <- test[,-1]  
  y_train <- train [1]  
  y_test <- test[1]  
  
  X_train <- as.matrix (x_train)  
  Y_train <- as.matrix (y_train)  
  X_test <- as.matrix(x_test)  
  Y_test <- as.matrix(y_test)  
  
  cvg2_AB1_E0vsE4 <- cv.glmnet(X_train,Y_train,offset = NULL,family="binomial",type.measure="class")  
  
  resultsCVAB1_E0vsE4 <- predict(cvg2_AB1_E0vsE4,s="lambda.min",newx=X_test,type="class")  
  tablaCV <- table(resultsCVAB1_E0vsE4,Y_test)  
  clasificacioncv <- 100*sum(diag(tablaCV))/sum(tablaCV)  
  R[i] <- print(clasificacioncv)  
}
```

```
#Guardamos todos los datos obtenidos en un solo vector y obtenemos el porcentaje de clasificación final.
```

```
R1 <- as.matrix (R)
```

```
colSums(R1)/nrow(R1)
```

```
#Obtenemos los valores de la lambda.min, la lambda.1se y el valor del mse.min
```

```
cvg1_AB1_E0vsE4
```

```
mse.min <- cvg1_AB1_E0vsE4$cvm[cvg1_AB1_E0vsE4$lambda == cvg1_AB1_E0vsE4$lambda.min]
```

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] O. Duque Pérez y M. P. Alonso, Motores de inducción : técnicas de mantenimiento predictivo, @becedario, 2005.
- [2] «Automatismo Industrial,» [En línea] Disponible en: <https://automatismoidustrial.com/motores/motores-sincronos/>. [Último acceso: Enero 2018].
- [3] F. Roxana, «Flerida Motores,» 18 Noviembre 2014. [En línea]. Disponible en: <http://fleridamotors.blogspot.com.es/>. [Último acceso: Enero 2018].
- [4] A. Peralta, «Escuela de Organización Industrial,» 19 Noviembre 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.eoi.es/blogs/agustinaperalta/2013/11/19/funcionamiento-de-maquinas-electricas-%C2%A1no-se-espanten/>. [Último acceso: Enero 2018].
- [5] R. D. L. Rosa López, *Estudio sobre la viabilidad de los estadísticos de orden superior de la corriente de alimentación como indicadores para determinar el estado de un motor de inducción*, 2015.
- [6] Á. Fradejas Ordax, «Aplicación de la técnica de estimación espectral MUSIC y de la transformada de park para la detección de fallos en los motores de inducción.,» 2016.
- [7] C. García Santamaría, «Análisis espectral de señales para la detección de fallos de motores de inducción.,» 2017.
- [8] C. Del Pozo Gallego, «Aplicación de técnicas de Machine Learning al diagnóstico de fallo en motores de inducción.,» 2016.
- [9] A. García Méndez, «Instituto Tecnológico Superior De Teziutlán,» 13 Septiembre 2011. [En línea]. Disponible en: [http://www.itsteziutlan.edu.mx/site2010/index.php?option=com\\_content&view=article&id=685:conceptos-basicos-sobre-mantenimiento-industrial&catid=27:artlos&Itemid=288](http://www.itsteziutlan.edu.mx/site2010/index.php?option=com_content&view=article&id=685:conceptos-basicos-sobre-mantenimiento-industrial&catid=27:artlos&Itemid=288). [Último acceso: Febrero 2018].
- [10] J. I. Fernández Villafañez, *Apuntes de la asignatura "Diseño de sistemas productivos y logísticos"*, 2016.
- [11] «National Instruments,» [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/tutorial/13042/es/>. [Último acceso: 15 Febrero 2018].

- [12] «Zuendo,» [En línea]. Disponible en: [https://www.zuendo.com/Zuendoblog/21\\_usos-del-variador-inversor-frecuencia.html](https://www.zuendo.com/Zuendoblog/21_usos-del-variador-inversor-frecuencia.html). [Último acceso: Febrero 2018].
- [13] F. Rubio Del Rey, «Análisis de la influencia del variador en el diagnóstico de los fallos de motores mediante técnicas estadísticas,» 2016.
- [14] D. Gordo Martín, «Diagnóstico de fallos en motores con técnicas de Machine Learning,» 2014.
- [15] W. Goodrum, «Elder Research,» 6 Octubre 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.elderresearch.com/company/blog/what-is-bias-in-analytics>. [Último acceso: 07 Marzo 2018].
- [16] J. Amat Rodrigo, Diciembre 2016. [En línea]. Disponible en: [https://rpubs.com/Joaquin\\_AR/242707](https://rpubs.com/Joaquin_AR/242707). [Último acceso: Febrero 2018].
- [17] M. Carrasco Carrasco, «Técnicas de regularización en regresión: implementación y aplicaciones,» 2016.
- [18] T. Hastie y Junyang, «Stanford,» [En línea]. Disponible en: [https://web.stanford.edu/~hastie/glmnet/glmnet\\_alpha.html#intro](https://web.stanford.edu/~hastie/glmnet/glmnet_alpha.html#intro). [Último acceso: 23 Abril 2018].
- [19] J. Cardenas, «Networkianos: Blog de sociología,» 21 Febrero 2014. [En línea]. Disponible en: <http://networkianos.com/regresion-logistica-binaria/>. [Último acceso: 08 Mayo 2018].
- [20] D. Beeman, «University Of Colorado,» [En línea]. Disponible en: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4831/lectures/NNdemo.html>. [Último acceso: 14 Abril 2018].