



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Estudio de optimización para sistemas energéticos GEO y
análisis de la situación actual de la órbita GEO

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

AUTOR/A: Fernández González, Ricardo

Tutor/a: Ramón Fernández, Francisca

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Trabajo de fin de Máster

Estudio de optimización para sistemas energéticos GEO y análisis de la situación actual

2237 MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AERONÁUTICA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

A

Fernández González, Ricardo

Profesor:

Ramón Fernández, Francisca

Fecha de entrega:

9 de enero de 2024

Índice general

1. Capítulo 1: Introducción	12
1.1. Presentando la órbita clásica	12
1.2. Tipos de Órbitas	13
1.3. Fundamentos Físicos	14
2. Capítulo 2: Objetivos	16
2.1. Objetivos Principales	16
2.2. Objetivos Secundarios	16
3. Capítulo 3: Metodología de Análisis	17
4. Capítulo 4: La órbita geoestacionaria durante la historia, análisis de tendencias e impacto económico	21
4.1. Nota histórica	21
4.2. Asignación y capacidad total	23
4.3. Análisis de tendencias	24
4.3.1. Primer estudio	24
4.3.2. Segundo estudio	26
4.3.3. Tercer estudio	27
5. Capítulo 5: Diseño y Optimización del Sistema Energético	33
5.1. Introducción	33
5.2. Misiones de referencia	34
5.3. Parámetros preliminares	35
5.4. Sistema Energético	36
5.4.1. Introducción a la fase de diseño del panel	36
5.4.2. Diseño Conceptual	36
5.4.3. Diseño Eléctrico	37
5.4.4. Primera aproximación al estudio de optimización	38
5.4.5. Comparación entre soluciones para cada panel	44
5.4.6. Conclusiones	44

5.4.7.	Surge una nueva pregunta	45
5.5.	Funciones de optimización	46
5.5.1.	Metodología de análisis	47
5.5.2.	función g_1	49
5.5.3.	función g_2	60
5.5.4.	Comparativa Funciones g_1 y g_2	71
5.5.5.	función g_3	87
5.5.6.	función g_4	98
5.5.7.	Comparativa Funciones g_3 y g_4	108
5.5.8.	Funciones g_5 y g_6	124
6.	Capítulo 6: Conclusiones finales	141
6.1.	Conclusiones sobre el marco socioeconómico de la órbita GEO	141
6.2.	Conclusiones del Estudio de Optimización	142
6.2.1.	Conclusiones g_1 y g_2	142
6.2.2.	Conclusiones g_3 y g_4	144
6.2.3.	Conclusiones g_5 y g_6	145
6.2.4.	Respuestas finales	146
6.2.5.	Diseño Optimizado Final	147
7.	Capítulo 7: Presupuesto	148
8.	Capítulo 8: Bibliografía	149

Índice de figuras

1.1. Elementos Orbitales	14
4.1. Primer satélite en operar la órbita geoestacionaria, Syncom 2	21
4.2. Distribución porcentual de los lanzamientos totales históricos	24
4.3. Distribución porcentual de los lanzamientos por parte de las Organizaciones de Telecomunicaciones	25
4.4. Evolución del número de Lanzamientos Anuales	27
4.5. Tasa porcentual de crecimiento entre el siglo XX y el XXI	28
4.6. Media histórica de lanzamientos para los distintos países	29
4.7. Comparativa de la evolución de la media de lanzamientos entre los principales dominadores de la órbita GEO	30
4.8. Comparativa de la evolución de la media de lanzamientos las principales potencias emergentes	30
4.9. Comparativa de la evolución de la media de lanzamientos entre el resto de Europa y Asia	31
4.10. Tasa porcentual de crecimiento entre el siglo XX y el XXI	32
5.1. Primeros resultados - Célula 3G28C	39
5.2. Primeros resultados - Célula 3G28C	39
5.3. Primeros resultados - Célula 3G30C 40x80	40
5.4. Primeros resultados - Célula 3G30C 40x80	40
5.5. Primeros resultados - Célula 3G30C 120x60	41
5.6. Primeros resultados - Célula 3G30C 120x60	41
5.7. Primeros resultados - Célula 3G30C 80x80	42
5.8. Primeros resultados - Célula 3G30C 80x80	42
5.9. Primeros resultados - Célula 30.7	43
5.10. Primeros resultados - Célula 30.7	43
5.11. Comparativa entre paneles	44
5.12. Comparativa entre paneles	44
5.13. $K = 1$ - Comparativa Potencia, Función g_1	50
5.14. $K = 1$ - Comparativa Masa, Función g_1	51

5.15. K = 1 - Comparativa Pérdidas por Joule, Función g_1	52
5.16. K = 1 - Comparativa Rendimiento Joule, Función g_1	53
5.17. P3G28C - Parámetros en función K, Función g_1	54
5.18. P4080 - Parámetros en función K, Función g_1	55
5.19. P12060 - Parámetros en función K, Función g_1	56
5.20. P8080 - Parámetros en función K, Función g_1	57
5.21. P307 - Parámetros en función K, Función g_1	58
5.22. K = 1 - Comparativa Potencia, Función g_2	61
5.23. K = 1 - Comparativa Masa, Función g_2	62
5.24. K = 1 - Comparativa Pérdidas por Joule, Función g_2	63
5.25. K = 1 - Comparativa Rendimiento Joule, Función g_2	64
5.26. P3G28C - Parámetros en función K, Función g_2	65
5.27. P4080 - Parámetros en función K, Función g_2	66
5.28. P12060 - Parámetros en función K, Función g_2	67
5.29. P8080 - Parámetros en función K, Función g_2	68
5.30. P307 - Parámetros en función K, Función g_2	69
5.31. K = 1 - Distribución de X, g_1 y g_2	71
5.32. K = 1 - Potencia, g_1 y g_2	72
5.33. K = 1 - Pérdidas Joule en función de m, g_1 y g_2	73
5.34. K = 1 - Pérdidas Joule en función de X, g_1 y g_2	74
5.35. K = 1 - Rendimiento en función de m, g_1 y g_2	75
5.36. K = 1 - Rendimiento en función de m, g_1 y g_2	76
5.37. P3G28C - Número de soluciones g_1 y g_2	77
5.38. P4080 - Número de soluciones g_1 y g_2	78
5.39. P12060 - Número de soluciones g_1 y g_2	79
5.40. P8080 - Número de soluciones g_1 y g_2	80
5.41. P307 - Número de soluciones g_1 y g_2	81
5.42. P3G28C - Parámetros optimizados g_1 y g_2	82
5.43. P4080 - Parámetros optimizados g_1 y g_2	83
5.44. P12060 - Parámetros optimizados g_1 y g_2	84
5.45. P8080 - Parámetros optimizados g_1 y g_2	85
5.46. P307 - Parámetros optimizados g_1 y g_2	86
5.47. K = 1 - Comparativa Potencia, Función g_3	88
5.48. K = 1 - Comparativa Masa, Función g_3	89
5.49. K = 1 - Comparativa Pérdidas por Joule, Función g_3	90
5.50. K = 1 - Comparativa Rendimiento Joule, Función g_3	91
5.51. P3G28C - Parámetros en función K, Función g_3	92

5.52. P4080 - Parámetros en función K, Función g_3	93
5.53. P12060 - Parámetros en función K, Función g_3	94
5.54. P8080 - Parámetros en función K, Función g_3	95
5.55. P307 - Parámetros en función K, Función g_3	96
5.56. K = 1 - Comparativa Potencia, Función g_4	98
5.57. K = 1 - Comparativa Masa, Función g_4	99
5.58. K = 1 - Comparativa Pérdidas por Joule, Función g_4	100
5.59. K = 1 - Comparativa Rendimiento Joule, Función g_4	101
5.60. P3G28C - Parámetros en función K, Función g_4	102
5.61. P4080 - Parámetros en función K, Función g_4	103
5.62. P12060 - Parámetros en función K, Función g_4	104
5.63. P8080 - Parámetros en función K, Función g_4	105
5.64. P307 - Parámetros en función K, Función g_4	106
5.65. K = 1 - Distribución de X, g_3 y g_4	108
5.66. K = 1 - Potencia, g_3 y g_4	109
5.67. K = 1 - Pérdidas Joule en función de m, g_3 y g_4	110
5.68. K = 1 - Pérdidas Joule en función de X, g_3 y g_4	111
5.69. K = 1 - Rendimiento en función de m, g_3 y g_4	112
5.70. K = 1 - Rendimiento en función de X, g_3 y g_4	113
5.71. P3G28C - Número de soluciones g_3 y g_4	114
5.72. P4080 - Número de soluciones g_3 y g_4	115
5.73. P12060 - Número de soluciones g_3 y g_4	116
5.74. P8080 - Número de soluciones g_3 y g_4	117
5.75. P307 - Número de soluciones g_3 y g_4	118
5.76. P3G28C - Parámetros optimizados g_3 y g_4	119
5.77. P4080 - Parámetros optimizados g_3 y g_4	120
5.78. P12060 - Parámetros optimizados g_3 y g_4	121
5.79. P8080 - Parámetros optimizados g_3 y g_4	122
5.80. P307 - Parámetros optimizados g_3 y g_4	123
5.81. P3G28C - Parámetros de Funcionamiento g_5 y g_6 , K = 1	125
5.82. P4080 - Parámetros de Funcionamiento g_5 y g_6 , K = 1	126
5.83. P12060 - Parámetros de Funcionamiento g_5 y g_6 , K = 1	127
5.84. P8080 - Parámetros de Funcionamiento g_5 y g_6 , K = 1	128
5.85. P307 - Parámetros de Funcionamiento g_5 y g_6 , K = 1	129
5.91. P3G28C - Parámetros optimizados g_5 y g_6	136
5.92. P408 - Parámetros optimizados g_5 y g_6	137
5.93. P12060 - Parámetros optimizados g_5 y g_6	138

5.94. P8080 - Parámetros optimizados g_5 y g_6	139
5.95. P307 - Parámetros optimizados g_5 y g_6	140

Índice de tablas

4.1. Número de lanzamientos por década	26
5.1. Satélites españoles en órbita	34
5.2. Parámetros operativos de sistemas similares	34
5.3. Parámetros de diseño de referencia	35
5.4. Parámetros de diseño de referencia	36
5.5. Resultados Diseño Conceptual	37
5.6. Resultados Diseño Eléctrico	37
5.7. Primeros resultados - Célula 3G28C	39
5.8. Primeros resultados - Célula 3G30C 40x80	40
5.9. Primeros resultados - Célula 3G30C 120x60	41
5.10. Primeros resultados - Célula 3G30C 80x80	42
5.11. Primeros resultados - Célula 30.7	43
5.12. Valores óptimos del parámetro K para la función g_1	59
5.13. Valores óptimos del parámetro K para la función g_2	70
5.14. Valores óptimos del parámetro K para la función g_3	97
5.15. Valores óptimos del parámetro K para la función g_4	107
5.16. Valores óptimos del parámetro K para la Funcion g_5	130
5.17. Valores óptimos del parámetro K para la Funcion g_6	130
6.1. Diseños optimizados para Máxima Eficiencia	147
6.2. Diseños optimizados para Máxima Potencia	147

Resumen

La órbita GEO (geoestacionaria) es un recurso natural de alto valor que ha llevado a los países a comerciar y competir por colocar sus sistemas en la misma. El escenario ha ido ganando complejidad con el pasar del tiempo debido a la aparición de nuevas potencias emergentes y el desarrollo tecnológico. En la primera parte del estudio se analizará como se gestiona este recurso, su importancia y los escenarios que han ido dando desde que se puso en órbita el primer satélite GEO.

Por otro lado, estos sistemas emplean paneles solares para abastecerse. En este estudio se plantea analizar la relación existen entre las dimensiones características del panel y la performance del mismo. Buscando, a su vez, la manera de optimizar dichas características a partir del diseño dimensional.

Palabras clave: Órbita, Geoestacionari, Panel, Energético, Optimización

Abstract

The GEO (geostationary) orbit is a natural resource of high value that has led countries to trade and compete for placing their systems in it. The scenario has gained complexity over time due to the emergence of new powers and technological development. The first part of the study will analyze how this resource is managed, its significance, and the scenarios that have unfolded since the first GEO satellite was placed in orbit.

On the other hand, these systems utilize solar panels for their energy supply. This study aims to analyze the relationship between the characteristic dimensions of the panel and its performance. Simultaneously, it seeks to find ways to optimize these characteristics through dimensional design.

Keywords: Orbit, Geostationary, Panel, Energy, Optimisation

Resum

L'òrbita GEO (geoestacionària) és un recurs natural d'alt valor que ha portat als països a comerciar i competir per col·locar els seus sistemes en esta. L'escenari ha anat guanyant complexitat amb el passar del temps degut a l'aparició de noves potències emergents i el desenvolupament tecnològic. En la primera part de l'estudi s'analitzarà com es gestiona este recurs, com és la seua importància i els escenaris que han anat donant des que es va posar en òrbita el primera satèl·lit GEO.

D'altra banda, estos sistemes empren panells solars per a proveir-se. En este estudi es planteja analitzar la relació existeixen entre les dimensions característiques del panell i la *performance d'este. Buscant, al seu torn, la manera d'optimitzar aquestes característiques a partir del disseny dimensional.

Paraules clau: Òrbita, Geoestacionari, Panell, Energètic, Optimització

]

Capítulo 1

Introducción

1.1. Presentando la órbita clásica

Una órbita no deja de ser la curva cónica que describe un cuerpo alrededor de otro por influencia de la gravedad, que esta trayectoria sea periódica impone que la curva descrita debe ser una elipse, en la que uno de los focos está ocupado por el objeto orbitado en cuestión. El movimiento orbital se puede explicar mediante dos herramientas, las cuales proporcionan todos los elementos necesarios para su comprensión:

- **Leyes de Kepler**
- **Mecánica newtoniana**

Cabe señalar que la teoría de la relatividad de Einstein proporciona resultados más precisos. No obstante, tanto el error cometido por la aproximación anterior, que está lo suficientemente acotado, como el hecho de que son herramientas de comprensión e implementación sencillas, hacen que la aproximación mediante Newton y Kepler sea perfectamente válida.

1.2. Tipos de Órbitas

Las órbitas que describen los satélites artificiales de la Tierra se clasifican en función de la altitud. Distinguiéndose las siguientes órbitas (*Lu, Yifan 2019*):

- **LEO.** Low Earth Orbit, dentro de este grupo se encuentran todas las órbitas por debajo de los 2000 kilómetros. En términos de energía, los requerimientos para llevar a cabo la misión son los más bajos de todos los grupos debido directamente a la altitud de las mismas. Tanto en la puesta en órbita como en el uso de sistemas a bordo de amplificación. Por otro lado, el área de observación del satélite es mucho menor y la cercanía al planeta hace necesario la implementación de sistemas de propulsión con el fin de evitar el decaimiento. Ejemplos de objetos en esta órbita son la Estación internacional o el telescopio Hubble.
- **MEO.** Medium High Orbit, de forma arbitraria este grupo queda compuesto por los cuerpos que orbitan entre los 2000 y los 35786 kilómetros. Los satélites que orbitan a estas altitudes están expuestos a la radiación solar y a los cinturones de Van Allen lo que compromete los sistemas electrónicos de los satélites. Destaca la presencia de los sistemas GNSS, GLONASS y GPS.
- **GSO.** Geosynchronous Orbit, este tipo de órbitas poseen la particularidad de orbitar a la vez que la Tierra rota. Es decir, el periodo orbital del satélite y el periodo de rotación terrestre coinciden. Lo que hace que estos satélites sean perfectos para tareas de comunicación y vigilancia, puesto que se puede observar de forma continua un área de tamaño considerable.
- **GEO.** Geostationary Orbit, es un subtipo de órbita geosíncrona, con la particularidad de que la inclinación es nula, por lo cual el satélite que orbite en estas posiciones se encuentra exactamente sobre el ecuador terrestre. Por el área de observación, esta órbita se ha convertido en un recurso de alto valor para los diferentes países.

1.3. Fundamentos Físicos

En esta sección se presentarán brevemente las bases para analizar una órbita. En 1609 el científico alemán Johannes Kepler comenzó a sentar las bases del modelo orbital newtoniano, poniendo sobre la mesa los primeros elementos para entender el concepto de órbita. Estos elementos son las tres leyes de Kepler, surgidas a partir del modelo copernicano (*Caspar, Max. 1948*):

- **1ª Ley de Kepler.** "Las órbitas que los planetas describen equivalen a elipses en las que el Sol es uno de sus focos"
- **2ª Ley de Kepler.** "La velocidad areolar permanece constante en toda la trayectoria. Es decir, un segmento que una el foco con el objeto en órbita barrerá áreas iguales en tiempos iguales"
- **3ª Ley de Kepler.** "La relación entre el cuadrado del periodo orbital y el cubo de la longitud del semieje mayor es constante para todo elemento que orbite sobre un mismo foco"

Además de las leyes de movimiento descritas anteriormente, se deben presentar los elementos orbitales que caracterizan a una órbita. Estos elementos se agrupan en una serie de parámetros geométricos, que describen la forma de la elipse, y una serie de parámetros angulares, que describen el posicionamiento de la órbita con respecto al plano del ecuador terrestre (*Montaña Romeu, Joaquín. 2022*). En la siguiente figura (Fig. 1.1), se muestra un esquema de como están definidos los elementos:

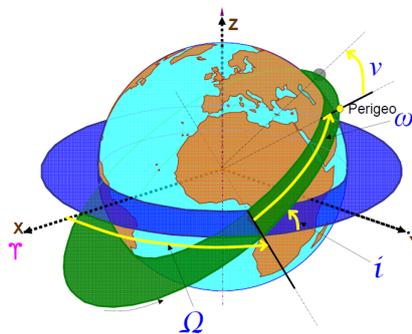


Figura 1.1: Elementos Orbitales (*FUENTE: Apuntes Sistema e Instalaciones de Vehículos Aeroespaciales*)

- **Semieje mayor a**
Semisuma de los radios, máximo y mínimo, con respecto a un foco. En mecánica orbital el radio máximo equivale al afelio (apogeo) y el mínimo al perihelio (perigeo), en función si se trata de una órbita solar o terrestre.
- **Excentricidad e**
Parámetro comprendido entre 0 y 1 que indica el achatamiento de la elipse. Cuando alcanza el valor 1, se obtiene una circunferencia. La excentricidad se calcula como el cociente entre la distancia focal c y el semieje mayor a .
- **Ascensión recta del nodo ascendente Ω**
Partiendo de un sistema de coordenadas geocéntrico ecuatorial (Fig. 1.1), la ascensión recta del nodo ascendente se define como el ángulo comprendido entre la dirección del

Punto Aries del sistema geocéntrico y la dirección que une en el centro del sistema con el nodo ascendente. Este último punto marca el lugar donde el objeto en órbita pasa del hemisferio sur al hemisferio norte siguiendo el sistema de la imagen.

- **Inclinación i**

Ángulo comprendido entre el plano ecuatorial y el plano orbital.

- **Argumento del perigeo ω**

Ángulo contenido en el plano de la órbita comprendido entre la dirección del nodo ascendente y la dirección del perigeo orbital.

- **Anomalía verdadera ν**

Ángulo contenido en el plano orbital comprendido entre la dirección del perigeo de la órbita y el punto en el que se encuentra el cuerpo. A diferencia de los otros ángulos varía con el tiempo.

El último elemento que queda por exponer es la ecuación del movimiento para un sistema sometido a la fuerza de la gravedad de un cuerpo central (*Curtis, Howard D. 2013*).

$$\ddot{\vec{r}} + \frac{\mu}{r^3}\vec{r} = 0 \quad (1.1)$$

La solución de esta ecuación para el caso de una órbita es la siguiente:

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \nu} \quad (1.2)$$

Esta expresión es totalmente equivalente a la ecuación de la elipse en coordenadas polares. Cabe señalar que la expresión solo depende de la anomalía verdadera una vez establecida la altura de la órbita. Se resolverá en el diseño de la misión para verificar todos los parámetros orbitales de la misma (*Curtis, Howard D. 2013*).

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivos Principales

Dentro de los objetivos principales del trabajo se encuentran los siguientes puntos:

- Diseñar el sistema energético de un satélite GEO siguiendo las tendencias actuales.
- Presentar y probar un método de optimización para dicho sistema.
- Recabar todas las posibles conclusiones sobre el método y compararlo con la forma de diseño tradicional.

2.2. Objetivos Secundarios

Se han definido como objetivos secundarios:

- Ofrecer una visión global de la órbita GEO, entendida como un recurso de vital importancia estratégica para los países.
- Presentar las normas y regulaciones actuales. Enumerando a su vez los problemas e inconvenientes del marco vigente.
- Dar a conocer como ha evolucionado la explotación de este recurso y los principales actores que lo explotan.

Capítulo 3

Metodología de análisis

*Para tener una plena comprensión de lo expuesto a continuación se debe leer el **Punto 3** del trabajo. No obstante, sirve para tener una primera idea de las líneas que sigue este estudio.*

Una vez seleccionadas las 6 **Funciones de optimización**, se estudiará el comportamiento teniendo en cuenta la similitud de forma entre los pares g_1 y g_2 , g_3 y g_4 y g_5 y g_6 . Se evaluarán una serie de parámetros de funcionamiento del panel, se buscará cada función óptima y se compararán entre sí. Para valorar a cada una de las funciones se han definido cuatro tipos de soluciones:

- **Soluciones válidas** o *SV*
- **Soluciones de Mínima Masa** o *SMM*
- **Soluciones de Máximo Rendimiento** o *SMR*
- **Soluciones de Maxima Potencia** o *SMP*

Las tres últimas no dejan de ser **Soluciones válidas** que hacen que el sistema quede optimizado con respecto a su parámetro nominal. Los filtros adoptados para definir como válida a una solución son los siguientes:

- El valor mínimo de X será un 10 % de la longitud total del panel.
- El valor máximo de X será un 35 % de la longitud total del panel.
- La Potencia a la que se llega en cada solución debe ser mayor o igual a la Potencia requerida del sistema, 3050 W.

El proceso de análisis de los pares de funciones con un único parámetro adimensional de control, es decir, g_1 y g_2 y g_3 y g_4 , es el siguiente:

1. Representación de los parámetros de funcionamiento de cada panel, para la función g_i correspondiente, con un K equivalente a la unidad.
2. Representación, para cada panel y función g_i , del comportamiento de los parámetros de funcionamiento para distintos valores de K.
3. Optimización de la función.

4. Comparativa entre pares de funciones, dentro de este apartado se representan los siguientes aspectos:
 - Comparación de los parámetros de funcionamiento entre funciones para $K = 1$.
 - Análisis del número de soluciones de cada tipo.
 - Representación de la evolución de los valores óptimos de funcionamiento con respecto al parámetro K .

Para el caso de las funciones g_5 y g_6 , que cuentan con dos parámetros adimensionales de control, el proceso de análisis es ligeramente diferente:

1. Comparación de las isolíneas de funcionamiento de cada panel, para ambas funciones, con un K equivalente a la unidad.
2. Optimización de las funciones.
3. Comparativa entre pares de funciones, dentro de este apartado se representan los siguientes aspectos:
 - Comparación de los parámetros de funcionamiento entre funciones.
 - Análisis del número de soluciones de cada tipo.
 - Representación de la evolución de los valores óptimos de funcionamiento con respecto al parámetro K .

En ambos procesos se habla del punto de **Optimización de las funciones**. Una función g_i queda optimizado cuando, de la familia de funciones que se generan mediante el parametro K , se halla aquella que ofrece un compromiso entre los distintos tipos de soluciones definidas. Para llegar a dicha g_i optimizada se somete a la función al siguiente algoritmo:

1. Obtención de los cuatro valores de K que maximizan cada tipo de solución.
2. Obtención del número máximo de soluciones para cada uno de los K obtenidos en el apartado anterior.
3. Definición del valor de filtro para cada tipo de solución:
 - N_{SV} mayor o igual al 40 % de N_{SV}^{max}
 - N_{SMM} mayor o igual al 50 % de N_{SMM}^{max}
 - N_{SMR} mayor o igual al 50 % de N_{SMR}^{max}
 - N_{SMP} mayor o igual al 35 % de N_{SMP}^{max}
4. Cálculo, para cada panel, del número de soluciones en función de K .
5. Eliminación de cada fila de la matriz de soluciones que contenga algún elemento nulo en alguna de sus cuatro columnas.
6. Eliminación de todas aquellas filas que queden por debajo del filtro calculado.
7. Obtención del máximo número de soluciones de máximo rendimiento que quedan tras aplicar el filtro.
8. Eliminación de cada fila que quede por debajo del nuevo N_{SMR}^{max} .

De esta forma, los candidatos a K óptimo serán aquellos que maximicen las soluciones de cada tipo en el siguiente orden de prioridad N_{SMR} , N_{SMM} , N_{SMP} , N_{SV} . Con este método se pretende dar respuesta a las siguientes cuestiones:

- *¿Se puede concluir que la distribución de X e Y afecta a la performance del sistema?*
- *¿Permiten las funciones estudiadas optimizar la performance del sistema?*
- *¿Qué función ofrece una mejor proporción de soluciones optimizadas en cuanto a potencia, masa, rendimiento y pérdidas?*
- *¿En base al tiempo de procesamiento y manejo de datos, es más conveniente emplear uno o dos parámetros de control en el proceso de diseño?*

]

Capítulo 4

La órbita geoestacionaria durante la historia, análisis de tendencias e impacto económico

4.1. Nota histórica

Detrás del desarrollo de satélites geoestacionarios se encuentran varios científicos de la primera mitad del siglo XX. Cronológicamente, en 1929 el austriaco Herman Potóčnik plantea las ecuaciones para la órbita geosíncrona y propone el caso de geoestacionario. No obstante, no fue hasta 1942 cuando el escrito Arthur Clarke populariza el concepto, como una herramienta mediante la cual mejorar exponencialmente las telecomunicaciones.

La idea acabó llegando a un trabajador de Hughes Aircraft, la principal contratista aeroespacial del ejército estadounidense en aquella época. El ingeniero en cuestión, Harold Rosen, comenzó a trabajar en un modelo de satélite en 1959 que, finalmente, fue lanzado bajo el nombre de Syncom 1 en 1961. Sin embargo, la radiación del medio espacial acabó por malograr la electrónica del aparato. Al año siguiente, se lanzó con éxito el Syncom 2, constituyéndose así el primer satélite geoestacionario exitoso de la historia.

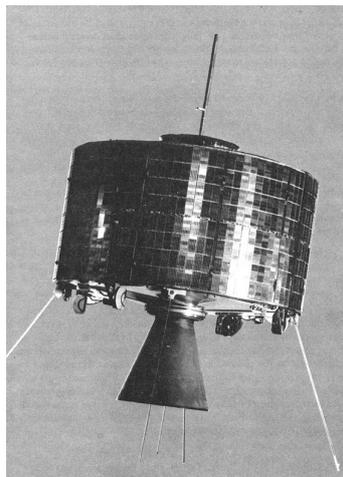


Figura 4.1: Primer satélite en operar la órbita geoestacionaria, Syncom 2 (*FUENTE: NASA* (<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1963-031A>))

Mediante dicho satélite (Fig. 2.1) se logró comunicación telefónica de larga distancia de la

historia, poniendo en contacto telefónico presidente estadounidense Jhon F. Kennedy con el primer ministro nigeriano Abubakar Tafawa Balewa. En 1964, se lanzó el Syncom 3 que dio la posibilidad a grandes eventos de la época, como los juegos olímpicos de Tokio, de obtener coberturas nunca antes vistas, llegando a ser transmitidos en África.

4.2. Asignación y capacidad total

Los satélites en órbita geoestacionaria componen un anillo alrededor del ecuador terrestre. En un principio, las limitaciones tecnológicas impusieron la división del anillo en 120 slots, es decir, una separación de 3 grados por slot. Los avances tecnológicos permitieron reducir la separación entre slots sin que ello produjese interferencias. Actualmente, la separación entre slots es de 2 grados, por lo que existen 180 slots. A finales de 2022, la órbita geoestacionaria estaba ocupada por alrededor de 550 satélites (*Sgobba, Tommaso. 2013*).

El organismo que se encarga de la gestión de este recurso es la UIT. La Unión Internacional de Telecomunicaciones es el departamento de la ONU sobre el que recae las tareas de gestión y regulación de las telecomunicaciones mundiales. Por lo que se encargan también de la administración de la órbita geoestacionaria.

La asignación de slots se basa en el principio de *First come, first served*, es decir, se basa en el orden de llegada. Existen dos sistemas de asignación (*Finch, Michael J. 1985*) (*Hwang, Ho-Won. 2014*):

- **A posteriori.** Derivado directamente de *First come, first served*, constituye el primer mecanismo creado. Los slots son entregados en función del orden de solicitud por parte de organizaciones o países. En un principio, cuando este recurso solo era accesible para unos pocos países avanzados tecnológicamente, el sistema se adaptaba correctamente a las condiciones del momento. Con el tiempo y la llegada de nuevos actores se comprobó que este método de asignación colocaba en una posición de desventaja aquellos países que no pueden formalizar a tiempo sus registros por limitaciones tecnológicas. El único criterio que existía era evitar las interferencias, por lo que los países que llegaban los últimos debían ajustarse a los requerimientos de los ya posicionados.
- **A priori.** Surge como respuesta al Sistema a Posteriori con el fin de mitigar las desventajas para los países con menos capacidad de desarrollar y aplicar a estos programas. Los criterios de asignación se ajustan a una planificación preestablecida. Este sistema está estrechamente ligado al libre mercado, cada país es libre de vender o alquilar los slots no requeridos y es el mismo país el encargado de gestionar su explotación. Para este sistema la UIT ha creado un conjunto que se denomina Bloque, comprendido por una frecuencia, una posición orbital y un uso predeterminado. Los bloques se encuadran en los slots y es la organización la encargada de repartirlos buscando la equidad.

Puesto que no se ha creado un sistema absoluto y objetivo, surgen confrontaciones usualmente entre países u organizaciones, exceso de burocracia y desigualdades entre los países más y menos pudientes. Por lo que el desarrollo de estos últimos se ve limitado al no poder acceder a este recurso tan valioso.

La UIT se reserva el derecho exclusión. Todo aparato que pretenda operar la órbita geoestacionaria debe ajustarse a las condiciones impuestas en el documento de Radioregulaciones de la organización. Además, durante la operativa de la misión un país puede perder el slot si introduce cambios en el aparato que no se ajusten al documento regulatorio anteriormente mencionado o si causa interferencias dañinas con los aparatos adyacentes (*Reglamento ITU, 1998*).

4.3. Análisis de tendencias

Para terminar de entender este recurso como algo de vital importancia estratégica a nivel mundial, se debe mostrar como los diferentes países y organizaciones han invertido en el desarrollo y lanzamiento de estos satélites (*Base de datos N2YO*).

De esta manera, se analizarán tres puntos:

- Análisis con respecto al número total de lanzamientos.
- Evolución del número de lanzamientos a lo largo de los años a nivel mundial.
- Evolución del número de lanzamientos a lo largo de los años para las principales entidades.

4.3.1. Primer estudio

En esta primer estudio se analizará que países y entidades se erigen como dominantes en cuanto a puesta en órbita de estos satélites. A partir de los datos recabados, se ha elaborado el siguiente gráfico de barras.

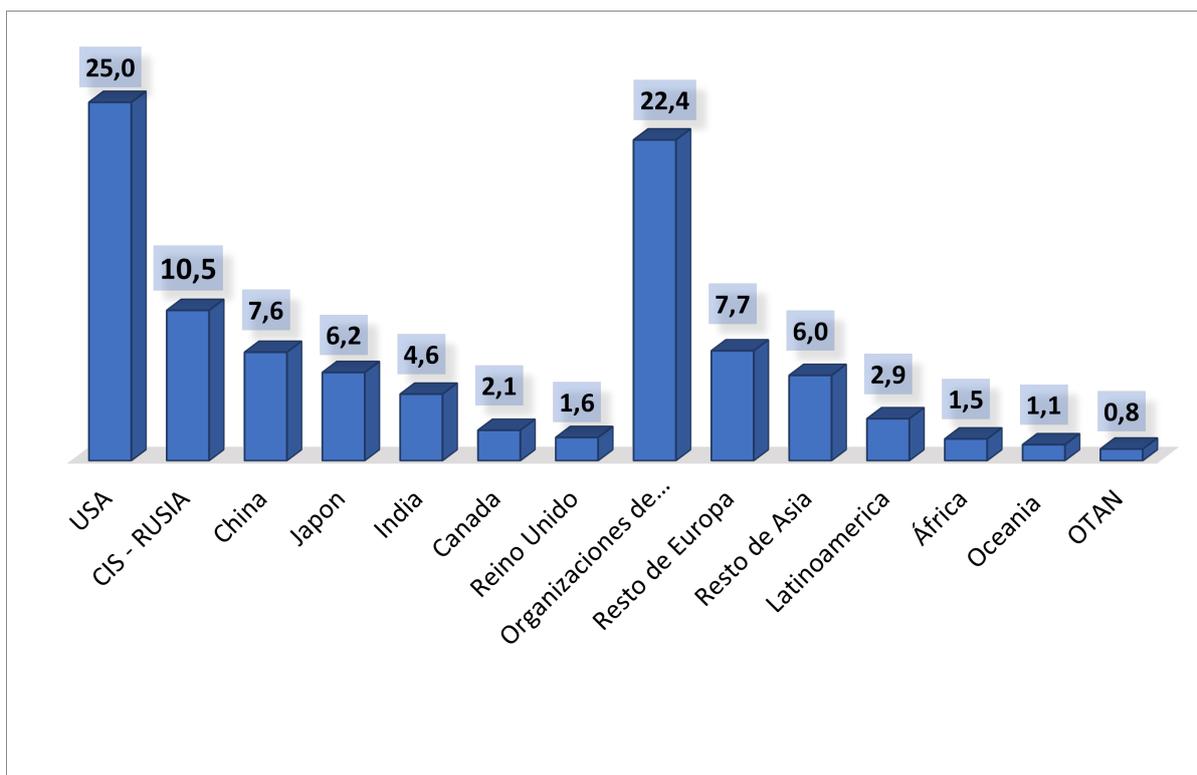


Figura 4.2: Distribución porcentual de los lanzamientos totales históricos (*FUENTE: Elaboración propia*)

El gráfico (Fig. 2.2) muestra el porcentaje del total de lanzamientos históricos de cada entidad. Desde 1961, fecha en la que se lanza el primer satélite, la órbita geostacionaria ha recogido un total de 1000 aparatos, aproximadamente (no confundir con satélites actualmente en órbita). En la tabla aparecen en primer lugar los países que cuentan con más de 15 lanzamientos, seguidos de las organizaciones dedicadas a las telecomunicaciones y agrupaciones de países, por continentes, que cuentan con menos de 15 lanzamientos. Podemos señalar una serie de conclusiones:

- Estados Unidos domina claramente la órbita geostacionaria, seguida de Rusia. Estos dos países se desmarcaron, en un principio, como consecuencia de la carrera espacial que vivieron durante la Guerra Fría, no obstante, Estado Unidos acabó por imponerse a la URSS, hecho que se ve reflejado también en la diferencia entre ambos países.
- Un porcentaje notable del total pertenece a organizaciones destinadas a los servicios de telecomunicaciones. Seguidamente, se analiza los principales organismos que componen este grupo.
- El continente asiático está fuertemente representado por Japón, India y China. Con satélites de reciente puesta en marcha, este hecho constata una prueba más del fuerte crecimiento que están experimentando. Aventajando notablemente al Resto de Europa.
- A medio plazo se puede esperar que otros actores vayan adquiriendo cada vez más peso en este aspecto, especialmente, Arabia Saudí y Catar.
- El efecto de los inconvenientes que conllevó el Sistema a Posteriori se puede apreciar notablemente en Latinoamérica y África.
- Todos los países están explotando este recurso. Su valor es incalculable, tanto económica como estratégicamente.

A su vez, es interesante, mostrar como están repartidos los lanzamientos entre las organizaciones destinadas a las telecomunicaciones.

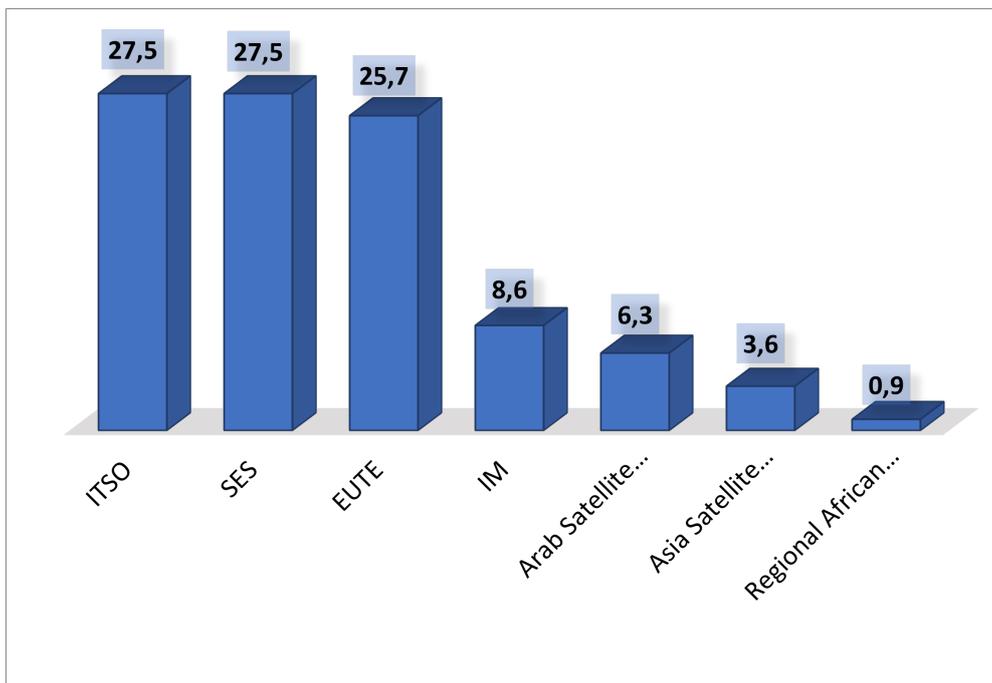


Figura 4.3: Distribución porcentual de los lanzamientos por parte de las Organizaciones de Telecomunicaciones (*FUENTE: Elaboración propia*)

Estas organizaciones (Fig. 2.3), dedicadas a ofrecer señal y cobertura a los países, han puesto en órbita un total de 222 satélites. Los principales actores que se ven en el gráfico son los siguientes:

- **ITSO** International Telecommunications Satellite Organization, es la encargada de supervisar las misiones Intelsat. En un principio, se creó como una organización internacional,

reuniendo a países a lo largo de los 5 continentes. Por cuestiones económicas, se privatizó en 2001. La escisión dio lugar a Intelsat S.A con sede en Estados Unidos y a la actual ITSO encargada de supervisar que Intelsat cumpla con sus deberes públicos. Intelsat S.A tiene parte de capital privado y en su mayoría está distribuida entre los países que dentro de la ITSO invirtieron y se involucraron en mayor medida en las misiones.

- **SES** Organización privada luxemburguesa.
- **EUTE** European Telecommunications Satellite Organization, es la encargada de supervisar las misiones EutelSat entre otras. Es un caso similar al que sucedió con la ITSO, se dividió en dos EutelSat S.A con sede en Francia y la EUTE como organismo supervisor
- **IMSO** International Mobile Satellite Organization. Al igual que la ITSO y la EUTE, fue pública en su creación y terminó por dividirse en el organismo regulador IMSO y INMARSAT S.A con sede en Reino Unido. Esta empresa u organización se enmarca en un nicho más reducido y en el que prácticamente no tiene competencia. Sus servicios se orientan a ofrecer cobertura a sistemas de comunicación en áreas donde no existe cobertura de otros sistemas. Tienen especial relevancia en el ámbito marítimo y aeronáutico.
- **Arab Satellite Communication Organization**
- **Asia Satellite Telecommunications Company**
- **Regional African Satellite Communications Organization**

Se pueden extraer las siguientes conclusiones de la gráfica:

- Las telecomunicaciones a nivel mundial están monopolizadas por el bloque occidental. Producto de la rápida expansión de este desde mediados del siglo XX.
- Fruto del momento de expansión económica en Asia y el conglomerado de países árabes, especialmente en Catar y Emiratos Árabes, se comienza a apreciar la intención de independizarse de estos sistemas sujetos a las políticas del bloque occidental.
- Por otra parte, África continúa lastrada, sin embargo, durante la última década los países están comenzando a desarrollar programas espaciales más serios, llegando a organizarse formando la RASC, que cuenta con dos satélites en órbita.

4.3.2. Segundo estudio

Para esta segunda parte se analizará como han evolucionado la cantidad de lanzamientos a lo largo de los años, tratando de justificar su variación a lo largo de los años (*Base de datos N2YO*).

Década	Lanzamientos	Media
2013-2022	205	20.5
2003-2013	258	25.8
1993-2003	259	25.9
1983-1993	167	16.7
1973-1983	79	7.9
1963-1973	23	2.3

Tabla 4.1: Número de lanzamientos por década (*FUENTE: Elaboración propia*)

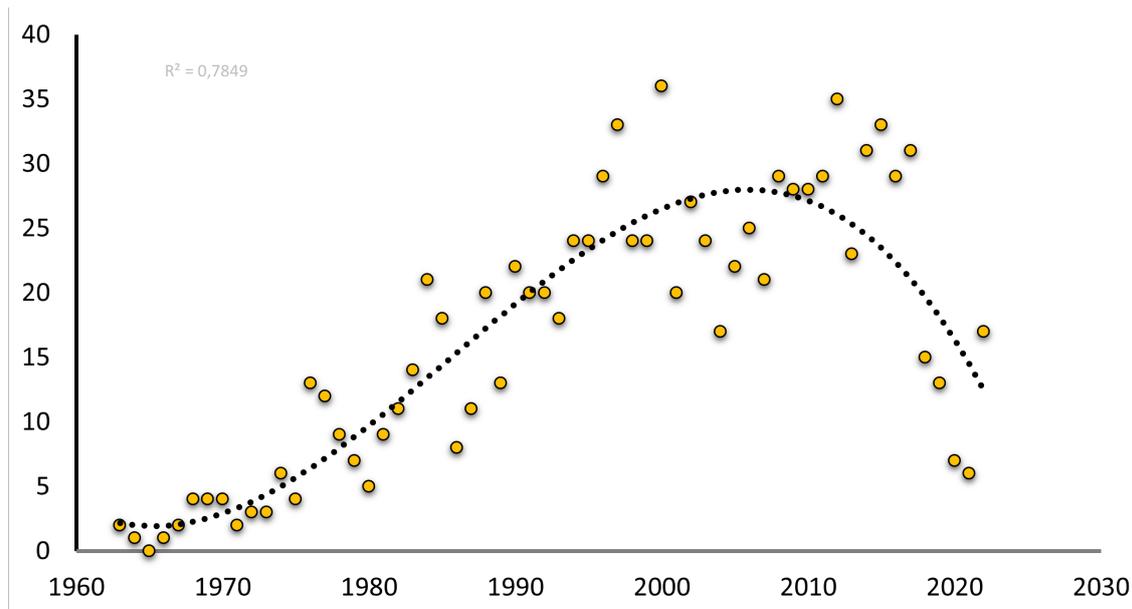


Figura 4.4: Evolución del número de Lanzamientos Anuales (*FUENTE: Elaboración propia*)

- Se observa una tendencia creciente (Tabla 2.1) en el número de lanzamientos hasta la última década del siglo XX y primera del XXI, donde se observa una estabilización. La caída presente en la última década, aunque ligera, debe ser señalada. La causa más factible sería la pandemia mundial. La redistribución de presupuestos y la creación de ayudas en todos los países provocó que los programas tuvieran que retrasarse.
- La fase de estabilización observada (Fig. 2.4) coincide con el período de máxima hegemonía de los Estados Unidos. Cabe esperar que, con la llegada de las economías emergentes vistas en el estudio anterior, es decir, India, China, Japón, y los países Árabes, en las próximas décadas se vuelva a experimentar un crecimiento en el número de lanzamientos. Además de los países que ganen protagonismo, la normativa con respecto a la duración de las misiones va a ser más limitante. Se espera que en el medio plazo la duración de las misiones pase de oscilar entre los 10 y 15 años a los 7 a 10 años. Lo que provocará un aumento en el número de lanzamientos y posibilitará que otros países en posiciones de desventaja ganen protagonismo, sea ya sea el caso de África o Latinoamérica.

4.3.3. Tercer estudio

En este último análisis se evaluará cómo ha sido el crecimiento de los distintos organismos desde 1963. Tanto para los distintos países como para las organizaciones dedicadas a las telecomunicaciones. Para ambos estudios se han analizado los siguientes parámetros:

- Cálculo de la media de lanzamientos para cada uno de los 12 lustros, desde 1963 hasta 2022.
- Cálculo de la media de lanzamientos entre los dos siglos abarcados.

A partir de los datos obtenidos y los parámetros calculados se han elaborado una serie de conclusiones. A continuación, se exponen los resultados obtenidos para los distintos países. Cabe destacar los siguientes aspectos:

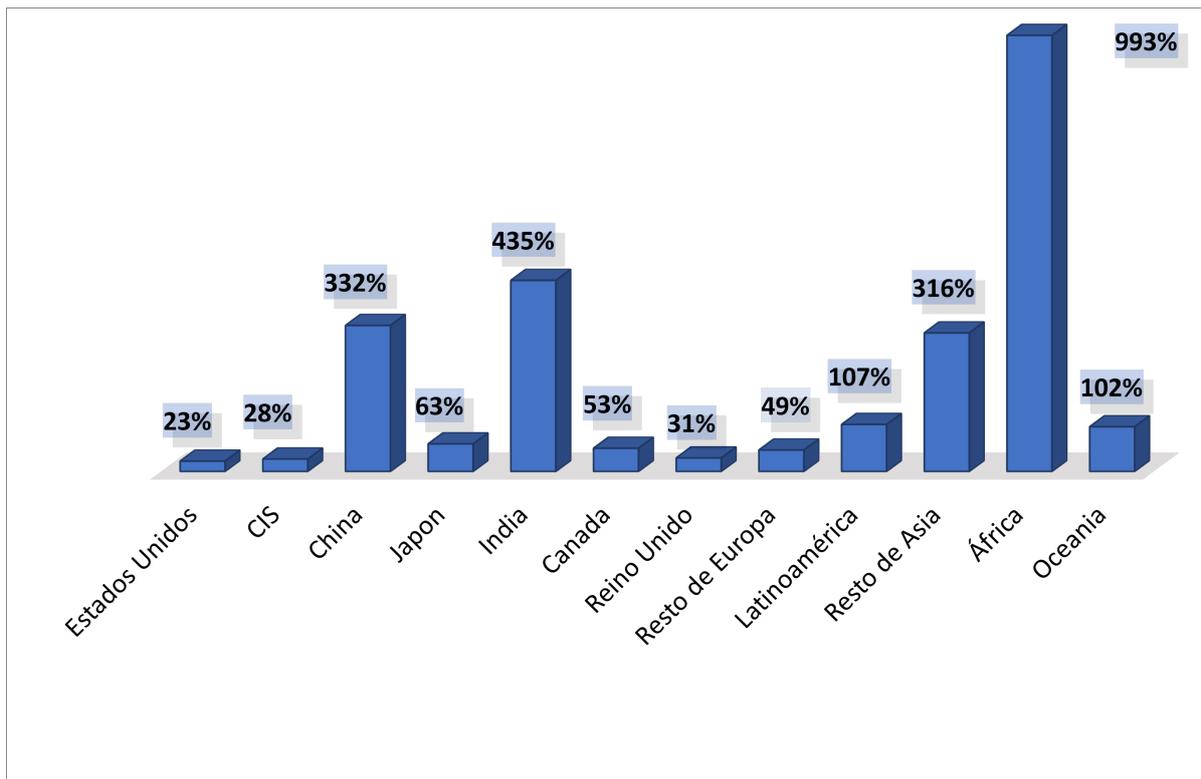


Figura 4.5: Tasa porcentual de crecimiento entre el siglo XX y el XXI (*FUENTE: Elaboración propia*)

- Las mayores tasas (Fig 2.5) de crecimiento se dan en Asia, con China e India a la cabeza, seguido del resto de países. África presenta una tasa excesivamente elevada. Debido a que los países del continente están comenzando a lanzar sus sistemas.
- En América del Sur el crecimiento también es notable. Mientras que los países que dominaron el recurso muestran tasas de crecimiento reducidas. Producto del establecimiento como fuertes dominadores de la órbita.

Sin embargo, el analizar el crecimiento no aporta una visión global de la situación. Puesto que Estados Unidos, cada año de media, pone en órbita casi el triple de satélites que el siguiente en la lista, que es Rusia. En la siguiente gráfica se aprecia:

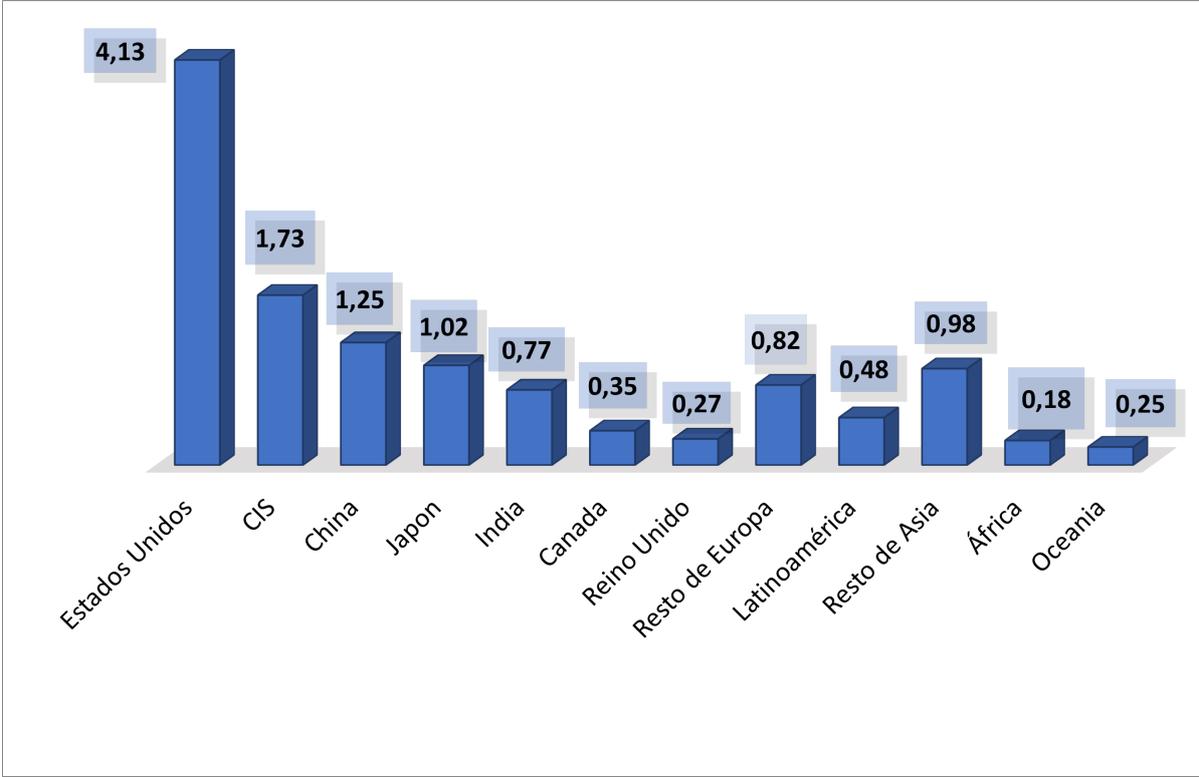


Figura 4.6: Media histórica de lanzamientos para los distintos países (*FUENTE: Elaboración propia*)

Echando un vistazo a cómo ha evolucionado la media a lo largo de los lustros para diferentes países se pueden sacar más conclusiones:

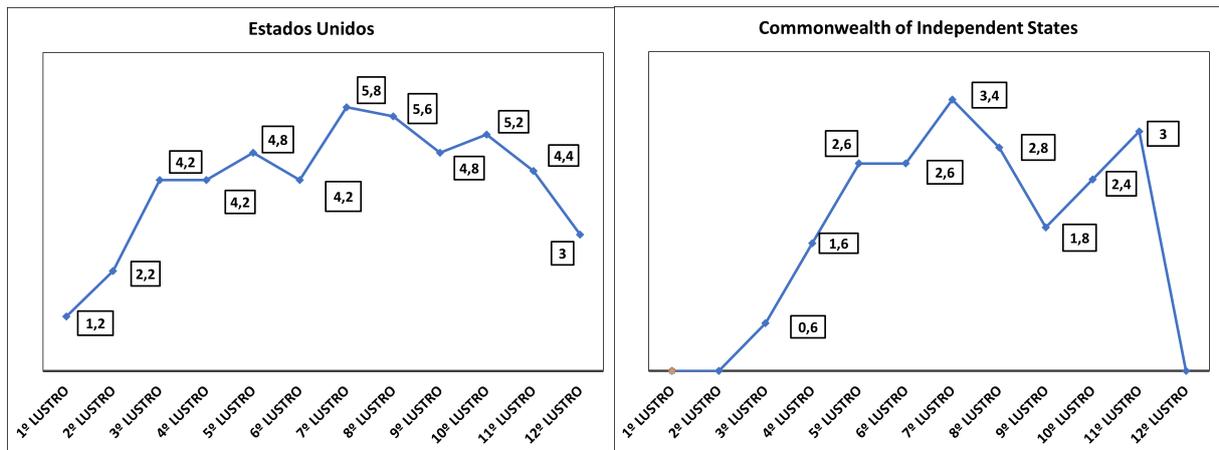


Figura 4.7: Comparativa de la evolución de la media de lanzamientos entre los principales dominadores de la órbita GEO (*FUENTE: Elaboración propia*)

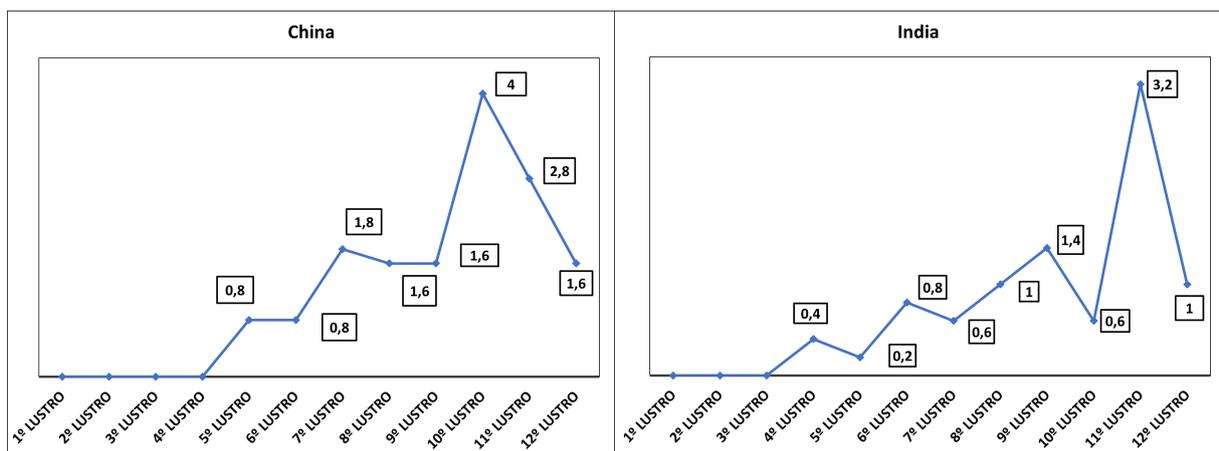


Figura 4.8: Comparativa de la evolución de la media de lanzamientos las principales potencias emergentes (*FUENTE: Elaboración propia*)

- Estados Unidos y Rusia (Fig 2.7) se encuentran en una fase de estabilización. Continúan lanzando satélites a un ritmo mayor que las potencias emergentes.
- Hace 5 años del último lanzamiento de Rusia, la crisis sanitaria y los conflictos armados en distintas ubicaciones están empezando a afectar al programa espacial. Perdiendo poder en este aspecto.
- China e India (Fig. 2.8) representan los países con una mayor tasa de crecimiento. Han pasado de situarse en entorno de menos de un lanzamiento cada cinco años a situarse en el entorno de los 2 (incluso 3) cada lustro.
- Es de señalar como durante los últimos 60 años, Estados Unidos ha mantenido constante su media de lanzamientos. Erigiéndose como dominador claro de este recurso.

A su vez, es interesante mostrar cómo es la tendencia para el resto de países del continente europeo y asiático. Puesto que ambos representan a los países ya asentados frente a los que comienzan a despegar.

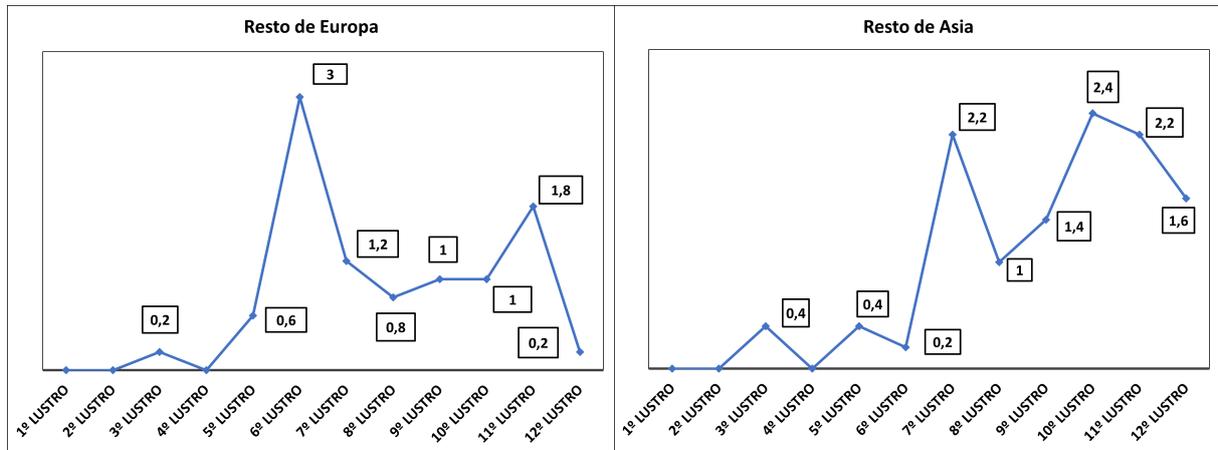


Figura 4.9: Comparativa de la evolución de la media de lanzamientos entre el resto de Europa y Asia (*FUENTE: Elaboración propia*)

- La media de lanzamientos (Fig 2.9) con respecto al resto de países de Europa (aquellos que a fecha de 2022 cuentan con menos de 15 lanzamientos históricos) ha entrado en una fase de estabilización.
- Siguiendo la tendencia de China, Japón o India, el resto de países de Asia han experimentado un fuerte crecimiento.
- Mientras que actualmente la media europea oscila el entorno de un lanzamiento al lustro, en Asia oscila en el entorno de dos lanzamientos.

Por otro lado, si bien se ha demostrado que las telecomunicaciones están claramente dominadas por ITSO, EUTE Y SES, se debe estudiar el crecimiento y evolución de todas aquellas involucradas.

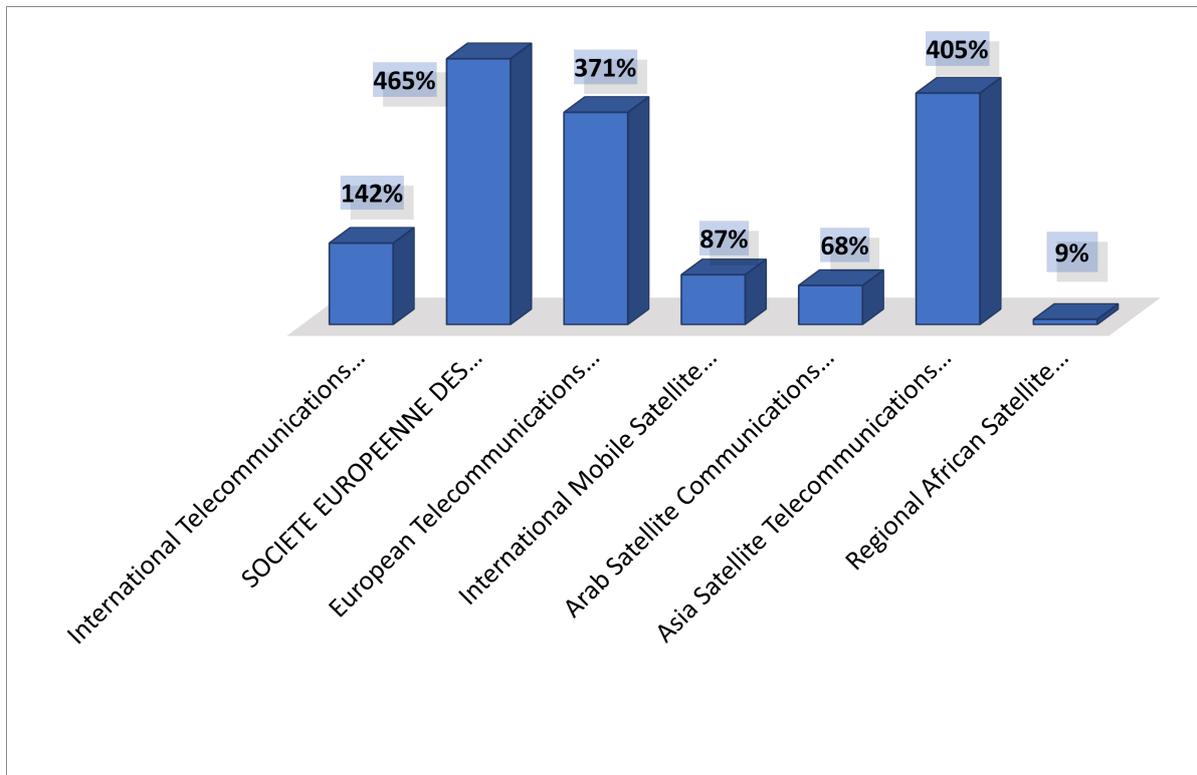


Figura 4.10: Tasa porcentual de crecimiento entre el siglo XX y el XXI (*FUENTE: Elaboración propia*)

- Se evidencia como el mercado sigue totalmente dominado por las tres compañías. Destacando el crecimiento de la empresa privada luxemburguesa SES. Motivo por el cual ha logrado alcanzar a ITSO y superar a EUTE en lanzamientos.
- SES reivindica la gestión privada frente a la pública. ITSO y EUTE está fuertemente influenciadas por los países que las conformaron en su día. La gestión de las mismas, pese a la reciente privatización del sector operacional, ha conllevado un lastre en el crecimiento. Actualmente, SES se está planteando comprar las misiones Intelsat, absorbiendo de esta manera la ITSO.
- El crecimiento de la compañía asiática (Fig. 2.10) de comunicaciones es claro. Los países de oriente están invirtiendo para dejar de comprar esos servicios a compañías europeas.
- IM no precisa de una inversión en desarrollo tan cuantiosa, puesto que su nicho está prácticamente explotado por ellos únicamente.

Capítulo 5

Diseño y Optimización del Sistema Energético

5.1. Introducción

Esta parte del trabajo está dedicada a la optimización del sistema energético del satélite. El foco recae sobre el sistema de captación de energía, es decir, las placas solares desplegadas. Siguiendo la línea de análisis de misiones geoestacionarias, los procedimientos se aplicarán al diseño de un sistema implantable en un satélite GEO. Los parámetros operativos de dicha misión se recogerán de las misiones actuales Hispasat, con el fin de obtener unas conclusiones fidedignas y aplicables a sistemas reales.

5.2. Misiones de referencia

Las misiones Hispasat actuales más notables vienen recogidas en la siguiente tabla. A excepción de SpainSAT, todas ellas se basan en la puesta en órbitas de satélites de comunicaciones. De forma que España pueda ofrecer servicios de televisión e internet a distintas zonas de Latinoamérica y Europa (*Hispasat*)

Satélites	Fecha de lanzamiento	Empresa	Cobertura
Amazonas 5	11-09-2017		América
Amazonas 4	22-03-2014		Brasil
Amazonas 3	07-02-2013		Sudamerica
Amazonas 2	30-09-2009	Hispasat	América
Hispasat 36W-1	28-01-2017		España, Portugal y Sudamerica
Hispasat 1E	29-12-2010		África, América y Europa
Spainsat	11-03-2006	Hisdesat	Soporte a las Fuerzas Armadas Españolas

Tabla 5.1: Satélites españoles en órbita (*FUENTE: Web Oficial Hispasat*)

Los parámetros en los que se basa el trabajo están estrechamente relacionados con los expuestos en las siguientes tabla. Siendo de especial relevancia para el diseño del sistema energético tener una referencia de las potencias útiles instaladas en estos (*Hispasat*).

Satélite	Masa (kg)	Longitud	Potencia (kW)	Bandas cubiertas	Antenas
Amazonas 5	5900	61° W	11.5	Ka, Ku	5
Amazonas 4	2938	73.9° W	6.2	Ku	2
Amazonas 3	6255	61° W	14.0	Ka, Ku, C	6
Amazonas 2	5460	61° W	15.1	Ku,C	5
Hispasat 36W-1	3200	36° W	6.0	Ku, Ka	4
Hispasat 1E	5300	30° W	13.0	Ku, Ka	4
Spainsat	3683	30° W	5.8	X, K	6

Tabla 5.2: Parámetros operativos de sistemas similares (*FUENTE: Web Oficial Hispasat*)

5.3. Parámetros preliminares

Para el satélite a diseñar se definirán los parámetros orbitales y operacionales sobre los que se comenzará la fase de diseño:

Parámetros orbitales	
Semieje mayor (km)	42164
Excentricidad	0
Periodo (s)	86400
Inclinación (°)	0
Duración de la misión (Años)	12
Parámetros operacionales	
Masa (kg)	5000
Subpaneles / Ala (kg)	4
Potencia máxima (kW)	5500-6500

Tabla 5.3: Parámetros de diseño de referencia (*FUENTE: Elaboración propia*)

5.4. Sistema Energético

5.4.1. Introducción a la fase de diseño del panel

Para comenzar la fase de diseño se precisa de una serie de inputs (*Patel, Mukund R. 2004*):

- **Potencia de diseño.** Recogida en base a las potencia de las misiones Hispasat y otras misiones GEO actuales.
- **Tensión de Bus.** Establecida en 50 V. Estos satélites precisan de tensiones de Bus superiores para soportar las intensidades de corriente que demandan los requisitos de potencia. Para ello se deben montar en plataformas especializadas. Un ejemplo de plataforma de este tipo, es la SSL1300 de Maxar Technologies. Capaza de soportar hasta 100 V de tensión de Bus, óptima para este tipo de aplicaciones.
- **Duración de la misión.** Una serie de parámetros correctores empleados en esta fase son calculados a partir de la duración de la misión
- **Datos sobre la performance de las células solares, así como de las celdas de las baterías.** Generalmente, proporcionados por el mismo fabricante. Capitales, pues aportan información de las características eléctricas y dimensionales de ambos elementos.
- **Parámetros configurativos** En algunas casos, se suele dar la distancia de plegado. Para este estudio se ha fijado el número de subpaneles a emplear.

Los parámetros anteriores se han establecido en los siguientes valores:

Parámetros de diseño	
Potencia de diseño (kW)	6100
Tensión de Bus (V)	50
Número de Subpaneles	4

Tabla 5.4: Parámetros de diseño de referencia (*FUENTE: Elaboración propia*)

A partir de aquí se siguen dos fases, la fase de **Diseño Conceptual** y la fase de **Diseño eléctrico**. Ambas fases se realizan sobre 5 modelos de célula solar diferentes.

5.4.2. Diseño Conceptual

En esta primera fase se obtiene una primera estimación del número de células totales a emplear, el área total del sustrato y la masa total de partida. El proceso de cálculo es el siguiente:

- Obtención, mediante datos del fabricante, de la potencia de la célula al principio de su vida.
- Cálculo de los factores correctores. Estos dependen de los parámetros de la misión, es decir, tipo de órbita y duración de la misma y de las características de las células a estudiar.
- Corregir la potencia al principio de la vida mediante los factores correctores para obtener la potencia al final de su vida.

- La primera estimación del número de células totales es el cociente entre la Potencia de diseño y la Potencia al final de la vida.

Los resultados obtenidos para cada modelo de célula son los siguientes:

Modelo	3G28C	3G30C (40x80)	3G30C (120x60)	3G30C (80x80)	30.7%
$P_{BOL}(W)$	1.155	1.217	2.763	2.426	1.151
$P_{EOL}(W)$	0.77	0.805	1.815	1.595	0.809
N	7922	7579	3360	3825	7544
A (m ²)	30	29	29	29	26
Masa (kg)	141	136.3	136.3	136.3	122.2

Tabla 5.5: Resultados Diseño Conceptual(*FUENTE: Elaboración propia*)

5.4.3. Diseño Eléctrico

En esta fase se obtiene una valoración más precisa de los parámetros eléctricos y dimensionales del panel. El proceso de cálculo es el siguiente:

- Obtención del Voltaje y la Intensidad de corriente a la que operará la célula para las características de la misión.
- Cálculo del número de células dispuestas en serie y paralelo a partir del voltaje e intensidad calculados, respectivamente.
- Cálculo de las dimensiones del panel, es decir, anchura y longitud, a partir del número de células en serie y en paralelo, respectivamente.
- Determinar el área del sustrato y la masa del mismo.

Esta fase es crucial, de ella se obtiene uno de los parámetros sobre los que girará todo el estudio, la longitud del panel. De esta manera, los resultados obtenidos son los siguientes:

Modelo	3G28C	3G30C (40x80)	3G30C (120x60)	3G30C (80x80)	30.7%
N_{serie}	25	25	25	25	26
$N_{paralelo}$	144	135.5	60	68.5	143.5
Anchura (m)	2	2	3	2	1.8
Longitud total (m)	5.76	5.42	3.6	5.48	5.69695

Tabla 5.6: Resultados Diseño Eléctrico (*FUENTE: Elaboración propia*)

En la tabla, el número de células en paralelo que aparece, representa la cantidad que hay por cada ala del sistema. El número total es el doble de dicha cantidad.

5.4.4. Primera aproximación al estudio de optimización

A partir de este momento, los parámetros expuestos en las secciones anteriores permanecen invariantes. Se impone que cada panel del sistema energético debe estar compuesto por 4 subpaneles. Esto implica que el parámetro de control es la longitud de los subpaneles. En esta primera fase se comprobará si existe, o no, una relación entre las propiedades del panel y la relación de longitudes entre los subpaneles. Para ello, se proponen cuatro situaciones:

- *Subpaneles de igual longitud*
- *Subpanel exterior arbitrariamente inferior a los interiores, ampliamente diferenciado*
- *Subpanel exterior arbitrariamente inferior a los interiores, poco diferenciado*
- *Subpanel exterior arbitrariamente superior a los interiores*

Los parámetros recogidos son los siguientes:

- **Potencia Util**
- **Porcentaje de pérdidas por efecto Joule**
- **Caida de tensión media**
- **Masa total del sistema**

3G28C

Estudio	3G28C			
	1	2	3	4
Longitud Panel Exterior (m)	1.44	1.12	1.28	1.56
Longitud Panel Interior (m)	1.44	1.56	1.52	1.4
Potencia Útil (kW)	3074.41	3095.46	3116.66	3074.10
Porcentaje de pérdidas por Joule	1.15	1.17	1.18	1.16
Caida de tensión media (V)	0.576	0.580	0.586	0.576
Masa total (kg)	103.35	104.03	104.78	103.35

Tabla 5.7: Primeros resultados - Célula 3G28C (*FUENTE: Elaboración propia*)

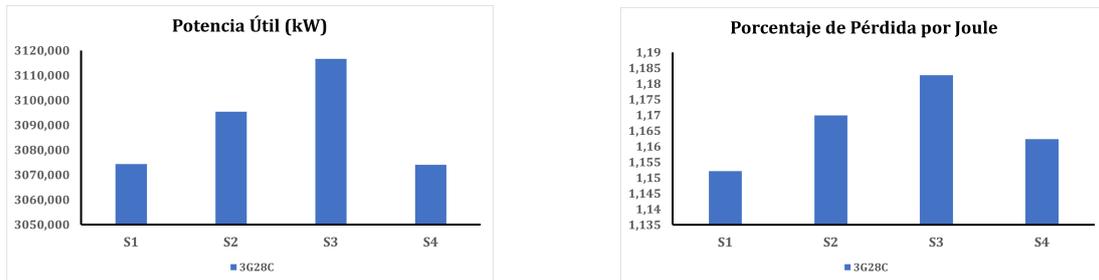


Figura 5.1: Primeros Resultados - Célula 3G28C (*FUENTE: Elaboración propia*)

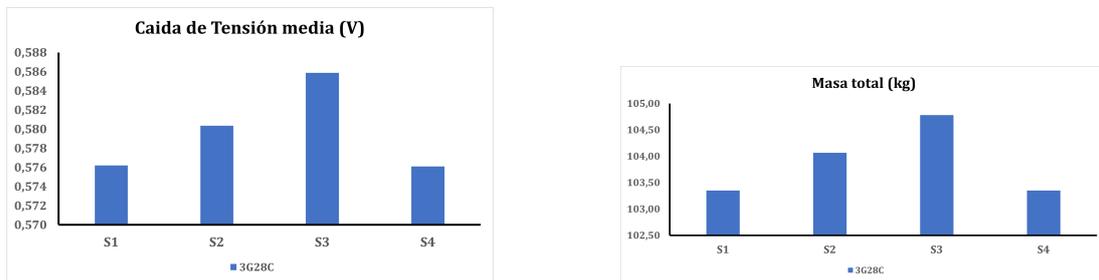


Figura 5.2: Primeros Resultados - Célula 3G28C (*FUENTE: Elaboración propia*)

3G30C 40x80

Estudio	3G30C 40x80			
	1	2	3	4
Longitud Panel Exterior (m)	1.36	1.08	1.24	1.52
Longitud Panel Interior (m)	1.36	1.48	1.40	1.32
Potencia Útil (kW)	3144.27	3189.853	3144.38	3166.61
Porcentaje de pérdidas por Joule	1.14	1.18	1.14	1.17
Caída de tensión media (V)	0.569	0.580	0.570	0.575
Masa total (kg)	99.33	99.07	97.65	98.36

Tabla 5.8: Primeros resultados - Célula 3G30C 40x80 (*FUENTE: Elaboración propia*)

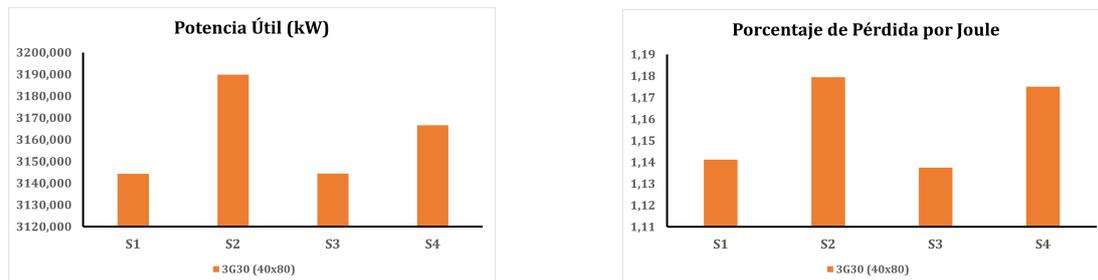


Figura 5.3: Primeros Resultados - Célula 3G30C 40x80 (*FUENTE: Elaboración propia*)

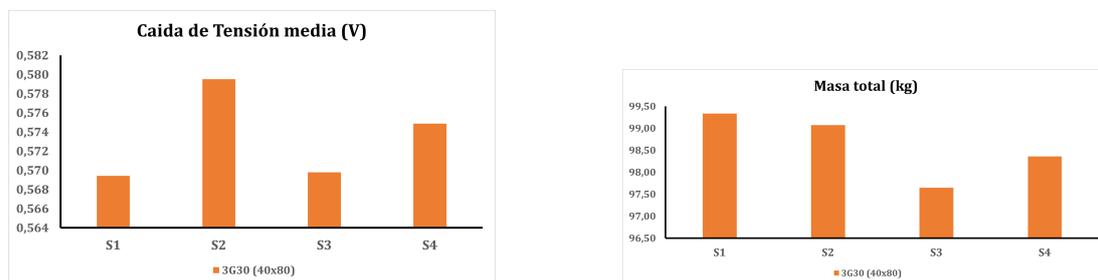


Figura 5.4: Primeros Resultados - Célula 3G30C 40x80 (*FUENTE: Elaboración propia*)

3G30C 120x60

Estudio	3G30C 120x60			
	1	2	3	4
Longitud Panel Exterior (m)	0.9	0.6	0.78	1.2
Longitud Panel Interior (m)	0.9	1.02	0.9	0.84
Potencia Útil (kW)	3135.25	3186.15	3186.901	3237.00
Porcentaje de pérdidas por Joule	1.04	1.11	1.10	1.17
Caida de tensión media (V)	0.524	0.533	0.534	0.544
Masa total (kg)	99.41	99.59	99.59	101.21

Tabla 5.9: Primeros resultados - Célula 3G30C 120x60 (*FUENTE: Elaboración propia*)

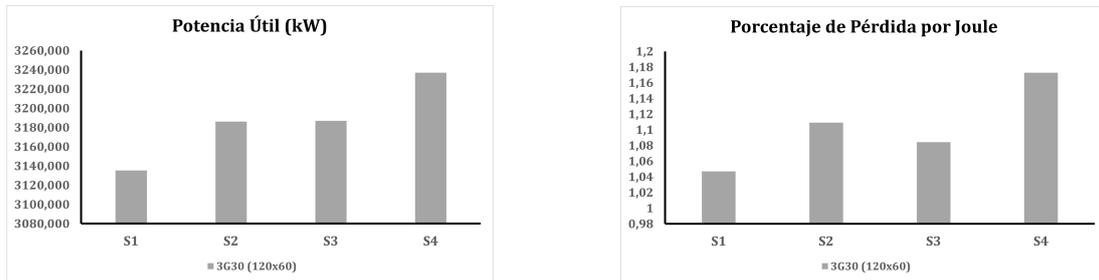


Figura 5.5: Primeros Resultados - Célula 3G30C 120x60 (*FUENTE: Elaboración propia*)

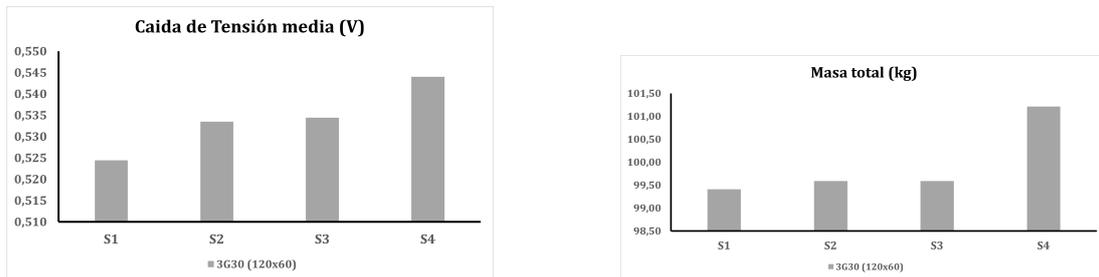


Figura 5.6: Primeros Resultados - Célula 3G30C 120x60 (*FUENTE: Elaboración propia*)

3G30C 80x80

Estudio	3G30C 80x80			
	1	2	3	4
Longitud Panel Exterior (m)	1.44	0.72	1.28	1.52
Longitud Panel Interior (m)	1.44	1.60	1.44	1.36
Potencia Útil (kW)	3750.18	3594.35	3647.88	3647.26
Porcentaje de pérdidas por Joule	1.654	1.57	1.55	1.58
Caida de tensión media (V)	0.690	0.651	0.667	0.667
Masa total (kg)	105.09	98.44	99.11	99.79

Tabla 5.10: Primeros resultados - Célula 3G30C 80x80 (*FUENTE: Elaboración propia*)

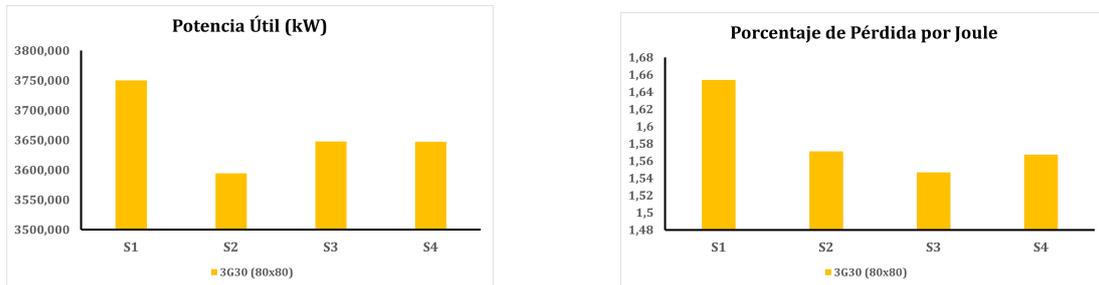


Figura 5.7: Primeros Resultados - Célula 3G30C 80x80 (*FUENTE: Elaboración propia*)

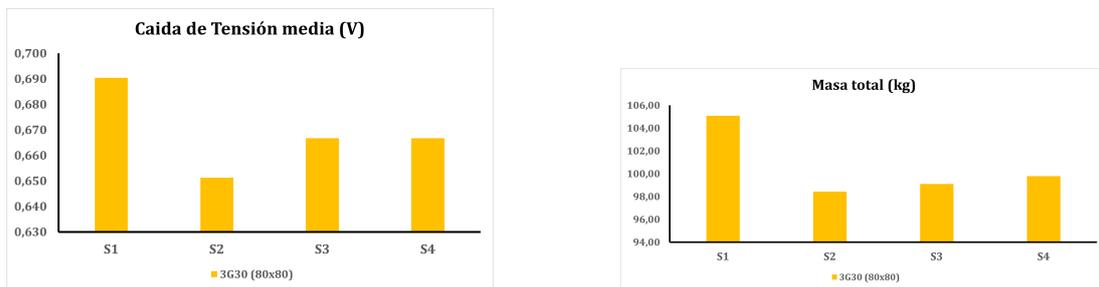


Figura 5.8: Primeros Resultados - Célula 3G30C 80x80 (*FUENTE: Elaboración propia*)

30.7

Estudio	30.7			
	1	2	3	4
Longitud Panel Exterior (m)	1.4292	1.2307	1.2704	1.64695
Longitud Panel Interior (m)	1.4292	1.5086	1.5086	1.35
Potencia Útil (kW)	3115.20	3136.68	3158.02	3178.50
Porcentaje de pérdidas por Joule	1.16	1.17	1.19	1.23
Caida de tensión media (V)	0.576	0.580	0.586	0.576
Masa total (kg)	103.35	104.03	104.78	103.35

Tabla 5.11: Primeros resultados - Célula 30.7 (*FUENTE: Elaboración propia*)

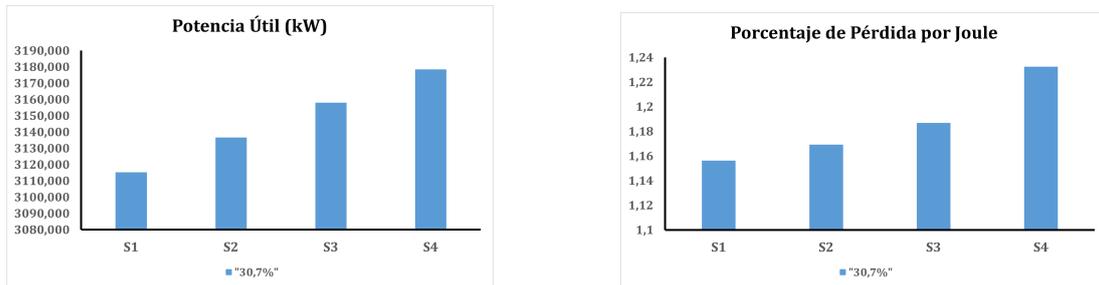


Figura 5.9: Primeros Resultados - Célula 30.7 (*FUENTE: Elaboración propia*)

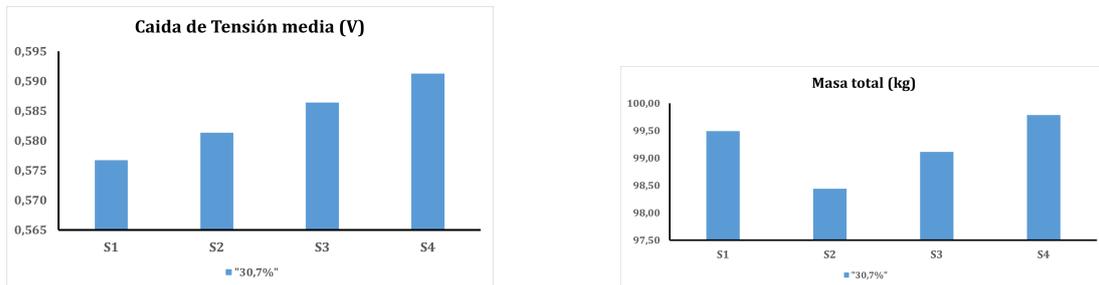


Figura 5.10: Primeros Resultados - Célula 30.7 (*FUENTE: Elaboración propia*)

5.4.5. Comparación entre soluciones para cada panel

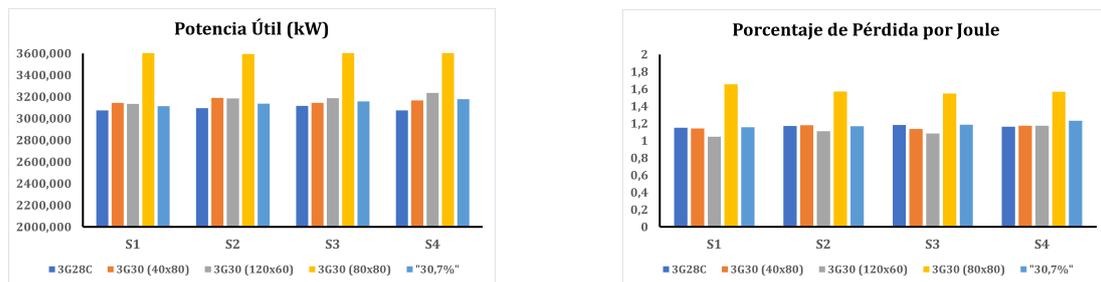


Figura 5.11: Comparativa entre paneles (*FUENTE: Elaboración propia*)

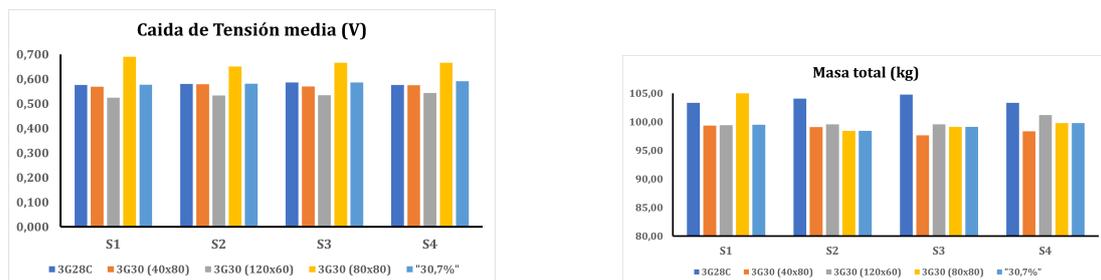


Figura 5.12: Comparativa entre paneles (*FUENTE: Elaboración propia*)

5.4.6. Conclusiones

De este primer estudio se pueden extraer una serie de conclusiones:

- Se puede afirmar que, efectivamente, existe una relación entre la forma de distribuir la longitud de los subpaneles y el comportamiento del panel.
- En función de la célula instalada el comportamiento varía notablemente.
- No solo varían los parámetros de funcionamiento del sistema, sino que la masa del mismo también se ve afectada.

5.4.7. Surge una nueva pregunta

El apartado anterior ha servido para constatar cómo, efectivamente, existe cierta relación entre las características funcionales del panel y la distribución de longitudes de los subpaneles. A partir de ahora, se denominará como X a la longitud del subpanel exterior y como Y a cada una de las longitudes de los subpaneles interiores.

Los valores X e Y fueron elegidos arbitrariamente, por lo que solo se tenía que cumplir una única condición, planteada en la siguiente ecuación:

$$L_t = X + 3Y \quad (5.1)$$

Es decir, hasta ahora se ha tratado con un sistema compatible indeterminado, en el que solo se tenía que dar un valor a una de las longitudes para hallar la otra. No obstante, la aproximación se antoja ligeramente escasa, por lo que cabría preguntarse que pasaría si se cerrase el problema transformándolo en un sistema determinado. Para este estudio se busca dar respuesta a la siguiente cuestión:

¿Existe una relación o un conjunto de relaciones, que permitan optimizar cada una de las variables de estudio?

O lo que es lo mismo:

¿Existe una ecuación o conjunto de ecuaciones que, añadidas a la primera ecuación, permitan obtener unas soluciones de potencia, rendimiento, caída de tensión y masa totalmente optimizadas?

5.5. Funciones de optimización

El estudio se basa en la construcción de una familia de funciones de la forma:

$$g_i(X, Y) = K \quad (5.2)$$

Estas han sido denominadas como **Funciones de optimización**. Si la condición obligatoria del problema (la suma de las longitudes de los subpaneles equivale a la longitud total) se escribe como:

$$f(X, Y) = 0 \quad (5.3)$$

$$f(X, Y) = X + 3Y - L_t \quad (5.4)$$

Se obtiene un sistema compatible determinado con una serie de parámetros de control adimensionales. Para llevar a cabo el análisis se han planteado 6 funciones diferentes. Las 4 primeras cuentan únicamente con dos parámetros adimensionales de control, las 2 siguientes cuentan con dos. Las funciones tienen la siguiente forma:

$$g_1(X, Y) = m \frac{X}{Y} \quad (5.5)$$

$$g_2(X, Y) = mXY \quad (5.6)$$

$$g_3(X, Y) = \alpha X - Y \quad (5.7)$$

$$g_4(X, Y) = \alpha X^2 - Y^2 \quad (5.8)$$

$$g_5(X, Y) = \alpha X^2 - \beta Y^2 \quad (5.9)$$

$$g_6(X, Y) = \alpha X^2 - \beta Y \quad (5.10)$$

Las constantes K se emplea para construir las familias de soluciones para cada g_i . Las soluciones se han evaluado mediante la modificación de estos parámetros, que a su vez han sido modelados de la siguiente forma:

- $m = \text{linspace}(0,10,101)$;
- $\alpha = \text{linspace}(0,10,101)$;
- $\beta = \text{linspace}(0,10,101)$;

No todas las soluciones son válidas, por lo que es necesario establecer una serie de criterios de filtrado, estableciendo así un número determinado de soluciones aceptables. Dicho criterio se expondrá a continuación. Para llevar a cabo el estudio se ha empleado el software MATLAB.

5.5.1. Metodología de análisis

Una vez seleccionadas las 6 **Funciones de optimización**, se estudiará el comportamiento teniendo en cuenta la similitud de forma entre los pares g_1 y g_2 , g_3 y g_4 y g_5 y g_6 . Se evaluarán una serie de parámetros de funcionamiento del panel, se buscará cada función óptima y se compararán entre sí. Para valorar a cada una de las funciones se han definido cuatro tipos de soluciones:

- **Soluciones válidas** o *SV*
- **Soluciones de Mínima Masa** o *SMM*
- **Soluciones de Máximo Rendimiento** o *SMR*
- **Soluciones de Maxima Potencia** o *SMP*

Las tres últimas no dejan de ser **Soluciones válidas** que hacen que el sistema quede optimizado con respecto a su parámetro nominal. Los filtros adoptados para definir como válida a una solución son los siguientes:

- El valor mínimo de X será un 10 % de la longitud total del panel.
- El valor máximo de X será un 35 % de la longitud total del panel.
- La Potencia a la que se llega en cada solución debe ser mayor o igual a la Potencia requerida del sistema, 3050 W.

El proceso de análisis de los pares de funciones con un único parámetro adimensional de control, es decir, g_1 y g_2 y g_3 y g_4 , es el siguiente:

1. Representación de los parámetros de funcionamiento de cada panel, para la función g_i correspondiente, con un K equivalente a la unidad.
2. Representación, para cada panel y función g_i , del comportamiento de los parámetros de funcionamiento para distintos valores de K.
3. Optimización de la función.
4. Comparativa entre pares de funciones, dentro de este apartado se representan los siguientes aspectos:
 - Comparación de los parámetros de funcionamiento entre funciones para $K = 1$.
 - Análisis del número de soluciones de cada tipo.
 - Representación de la evolución de los valores óptimos de funcionamiento con respecto al parámetro K.

Para el caso de las funciones g_5 y g_6 , que cuentan con dos parámetros adimensionales de control, el proceso de análisis es ligeramente diferente:

1. Comparación de las isóneas de funcionamiento de cada panel, para ambas funciones, con un K equivalente a la unidad.
2. Optimización de las funciones.

3. Comparativa entre pares de funciones, dentro de este apartado se representan los siguientes aspectos:
 - Comparación de los parámetros de funcionamiento entre funciones.
 - Análisis del número de soluciones de cada tipo.
 - Representación de la evolución de los valores óptimos de funcionamiento con respecto al parámetro K.

En ambos procesos se habla del punto de **Optimización de las funciones**. Una función g_i queda optimizado cuando, de la familia de funciones que se generan mediante el parametro K, se halla aquella que ofrece un compromiso entre los distintos tipos de soluciones definidas. Para llegar a dicha g_i optimizada se somete a la función al siguiente algoritmo:

1. Obtención de los cuatro valores de K que maximizan cada tipo de solución.
2. Obtención del número máximo de soluciones para cada unos de los K obtenidos en el apartado anterior.
3. Definición del valor de filtro para cada tipo de solución:
 - N_{SV} mayor o igual al 40 % de N_{SV}^{max}
 - N_{SMM} mayor o igual al 50 % de N_{SMM}^{max}
 - N_{SMR} mayor o igual al 50 % de N_{SMR}^{max}
 - N_{SMP} mayor o igual al 35 % de N_{SMP}^{max}
4. Cálculo, para cada panel, del número de soluciones en función de K.
5. Eliminación de cada fila de la matriz de soluciones que contenga algún elemento nulo en alguna de sus cuatro columnas.
6. Eliminación de todas aquellas filas que queden por debajo del filtro calculado.
7. Obtención del máximo número de soluciones de máximo rendimiento que quedan tras aplicar el filtro.
8. Eliminación de cada fila que quede por debajo del nuevo N_{SMR}^{max} .

De esta forma, los candidatos a K óptimo serán aquellos que maximicen las soluciones de cada tipo en el siguiente orden de prioridad N_{SMR} , N_{SMM} , N_{SMP} , N_{SV} . Con este método se pretende dar respuesta a las siguientes cuestiones:

- *¿Se puede concluir que la distribución de X e Y afecta a la performance del sistema?*
- *¿Permiten las funciones estudiadas optimizar la performance del sistema?*
- *¿Qué función ofrece una mejor proporción de soluciones optimizadas en cuanto a potencia, masa, rendimiento y pérdidas?*
- *¿En base al tiempo de procesamiento y manejo de datos, es más conveniente emplear uno o dos parámetros de control en el proceso de diseño?*

5.5.2. función g_1

La función g_1 tiene la siguiente forma:

$$m \frac{X}{Y} = K \quad (5.11)$$

La familia de soluciones que proporciona esta función tiene la siguiente forma:

$$X_1(X, Y) = \frac{L_t m}{1+3 \frac{m}{K}} \quad (5.12)$$

$$Y_1(X, Y) = \frac{m}{K} \frac{L_t m}{1+3 \frac{m}{K}} \quad (5.13)$$

Comparación entre paneles para $K = 1$

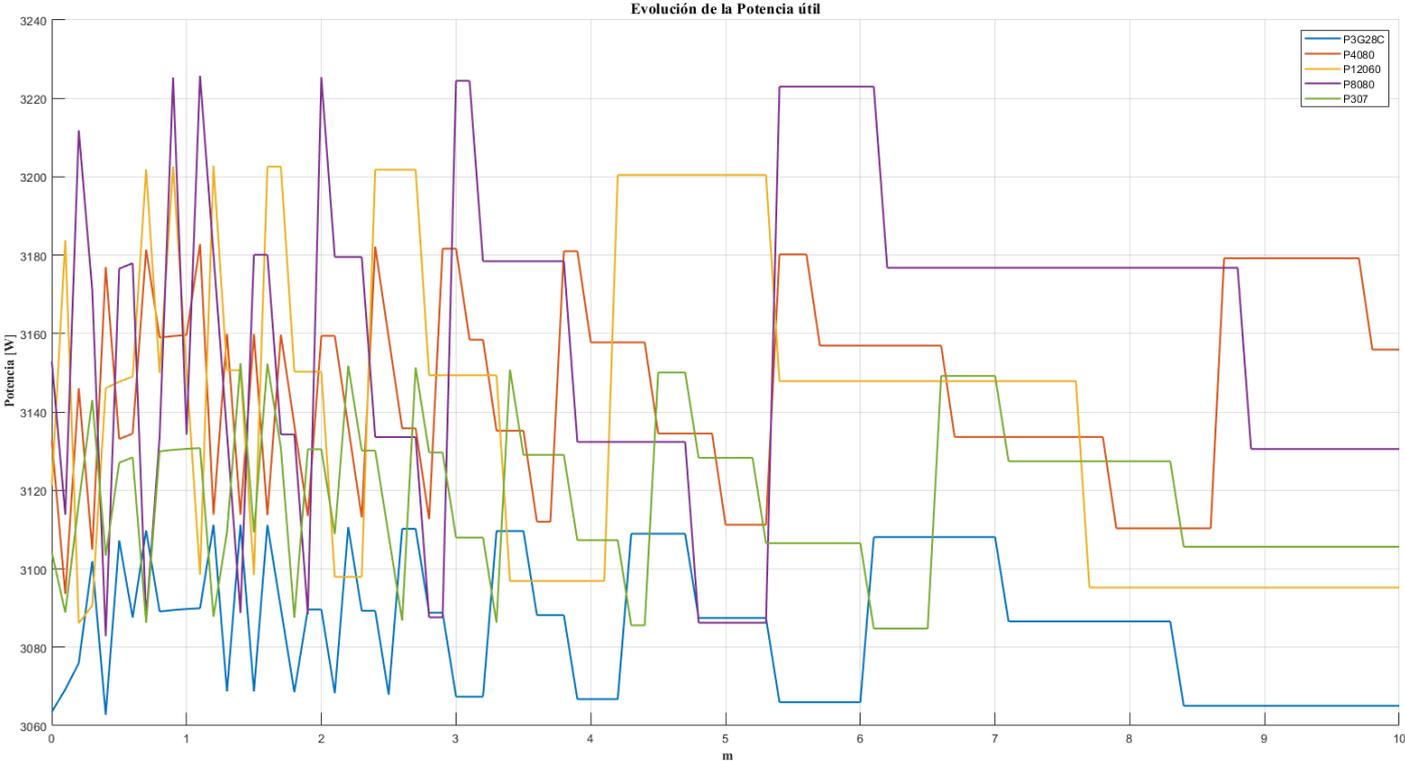


Figura 5.13: $K = 1$ - Comparativa Potencia, Función g_1 (FUENTE: Elaboración propia)

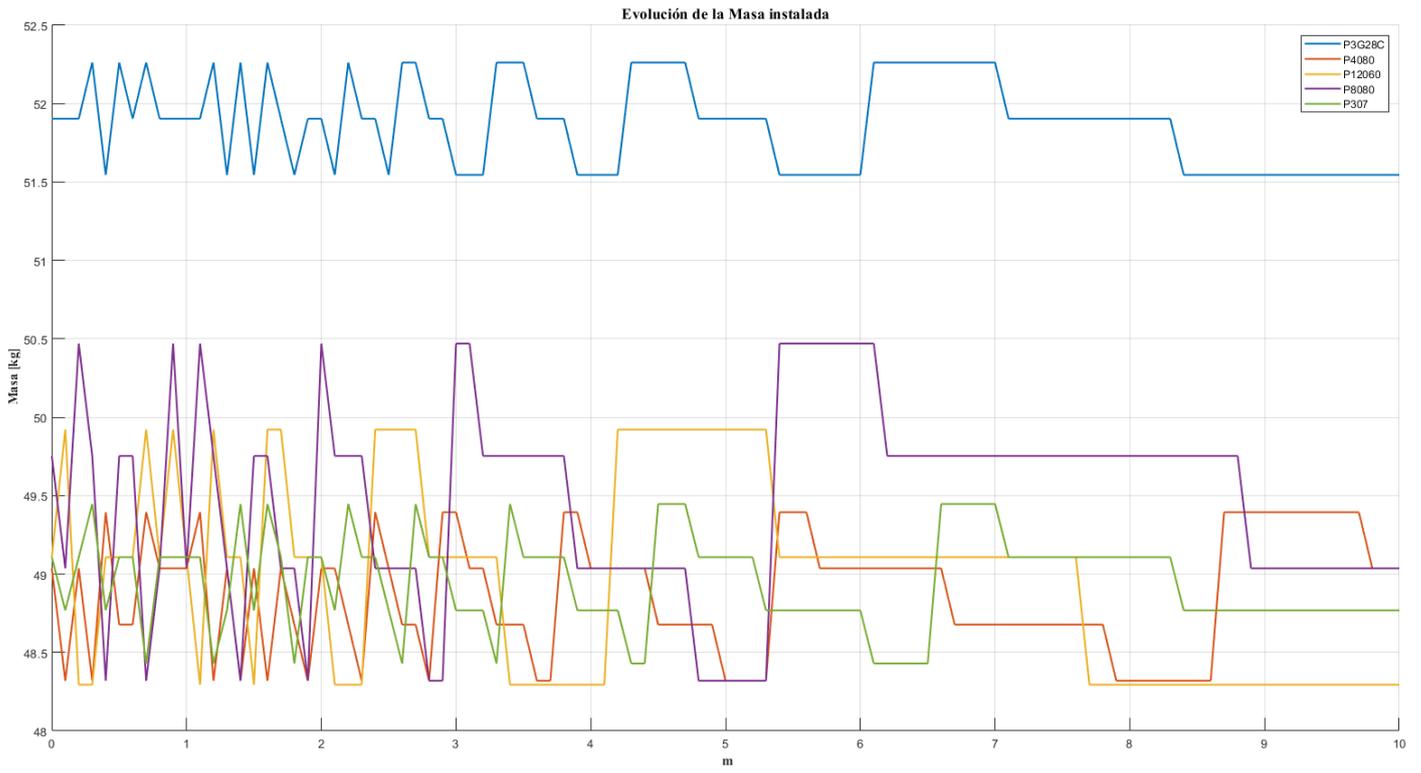


Figura 5.14: $K = 1$ - Comparativa Masa, Función g_1 (FUENTE: *Elaboración propia*)

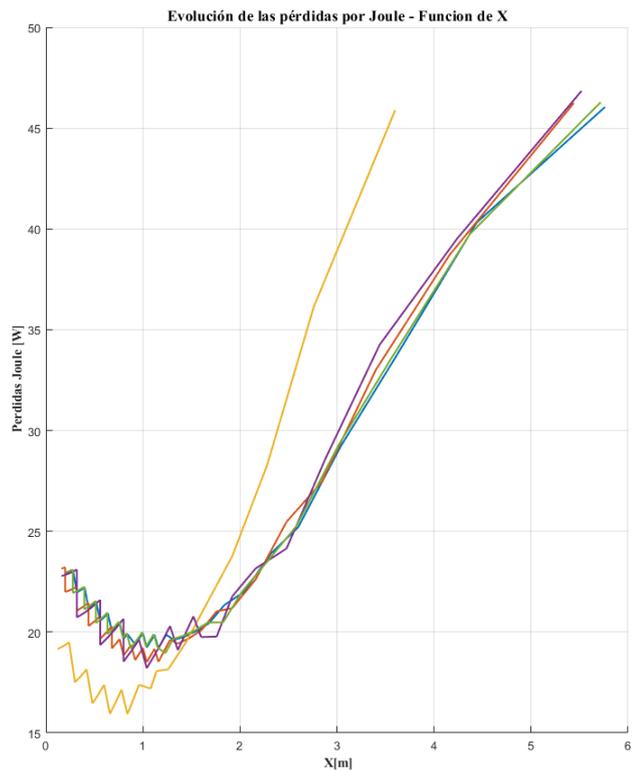
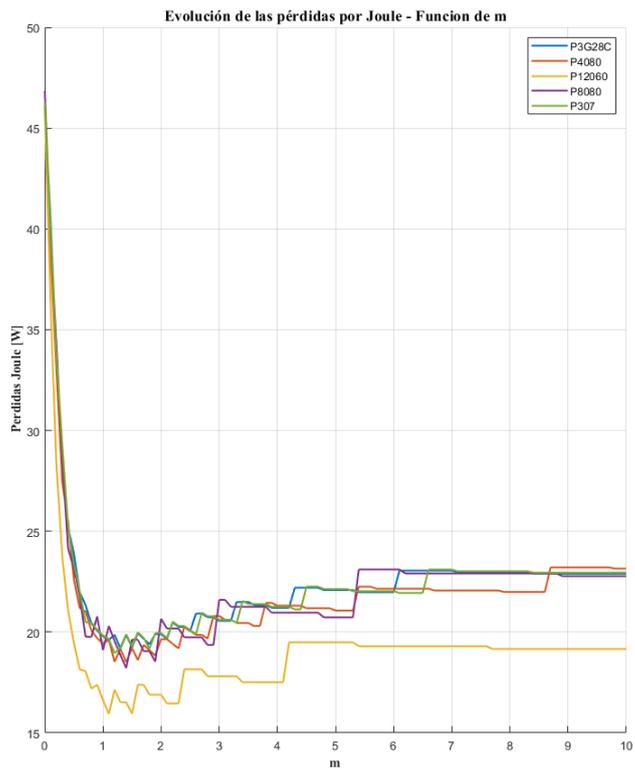


Figura 5.15: $K = 1$ - Comparativa Pérdidas por Joule, Función g_1 (FUENTE: *Elaboración propia*)

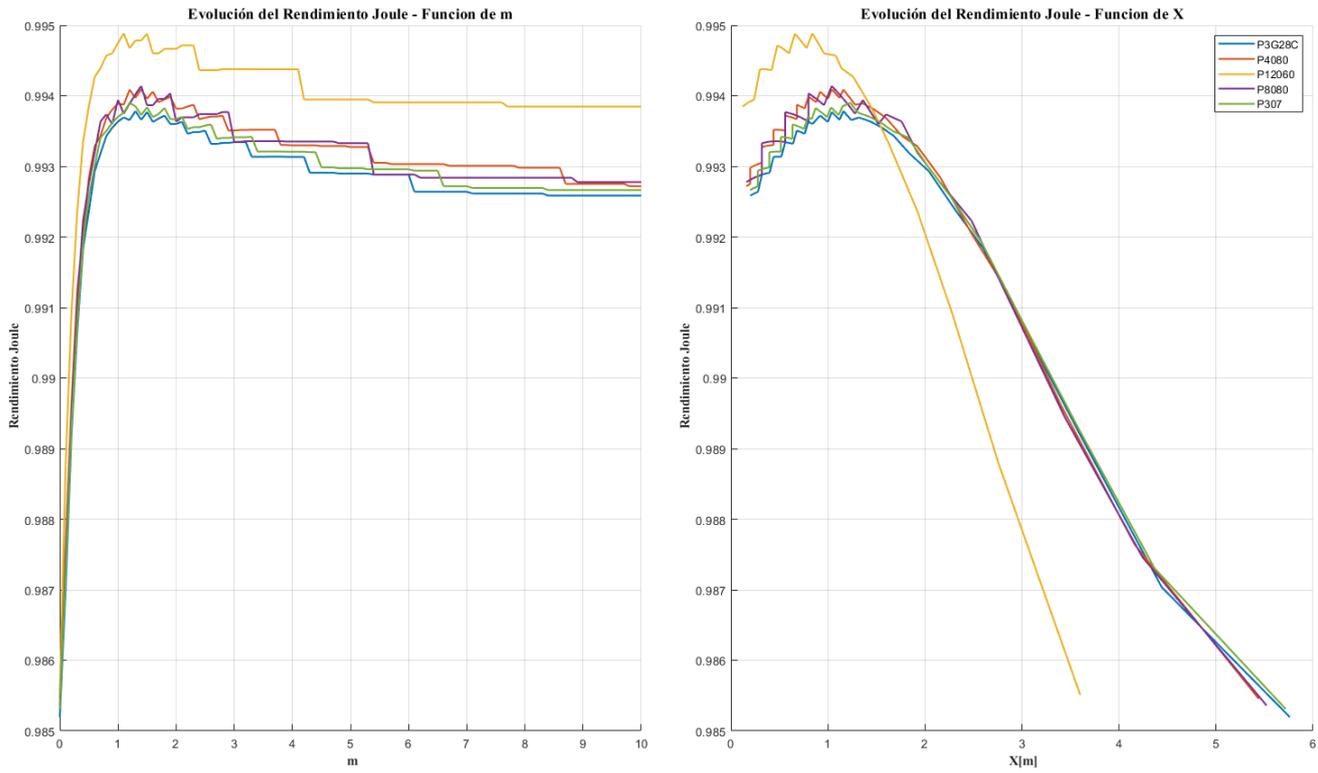


Figura 5.16: $K = 1$ - Comparativa Rendimiento Joule, Función g_1 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Comportamiento de los parámetros de funcionamiento en función de K

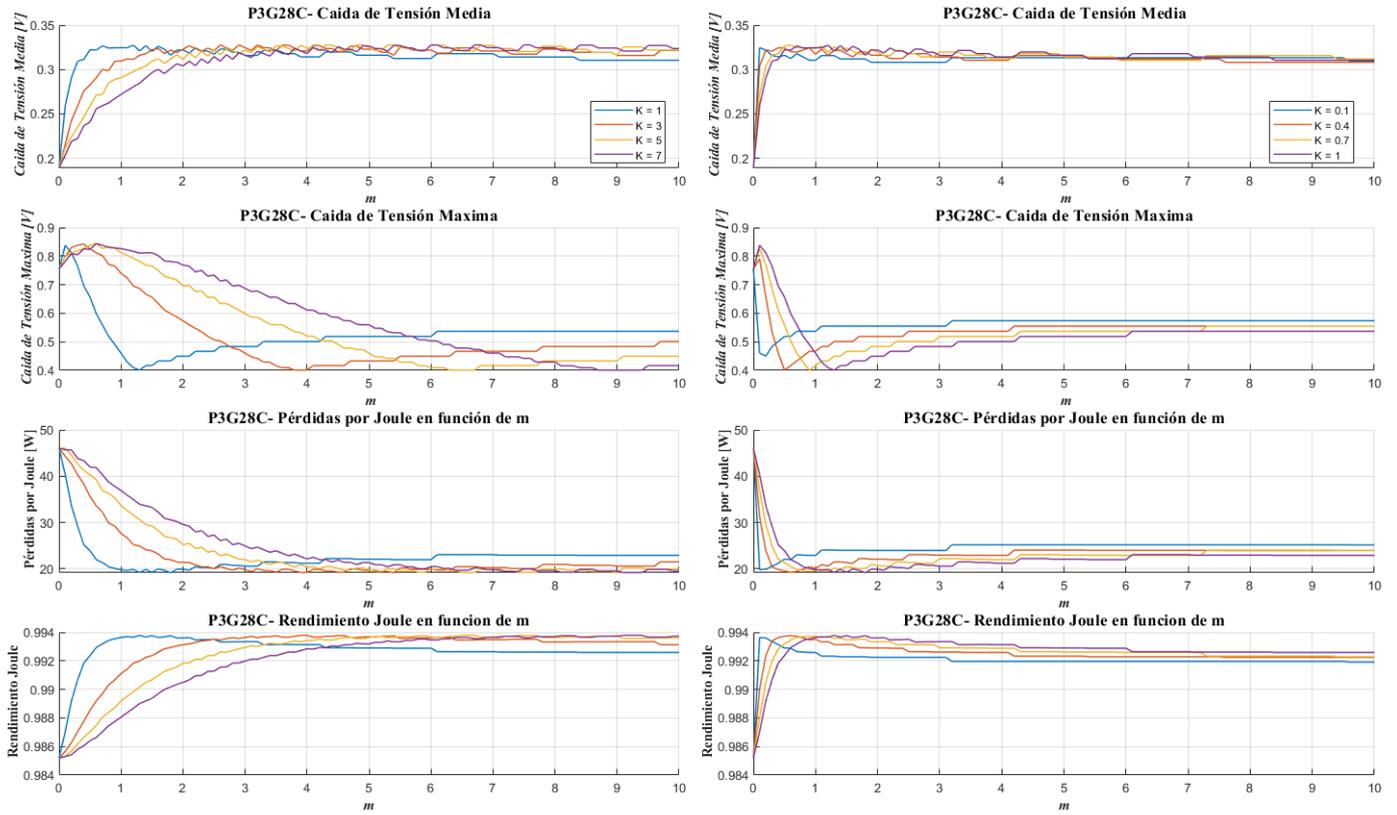


Figura 5.17: P3G28C - Parámetros en función K , Función g_1 (FUENTE: *Elaboración propia*)

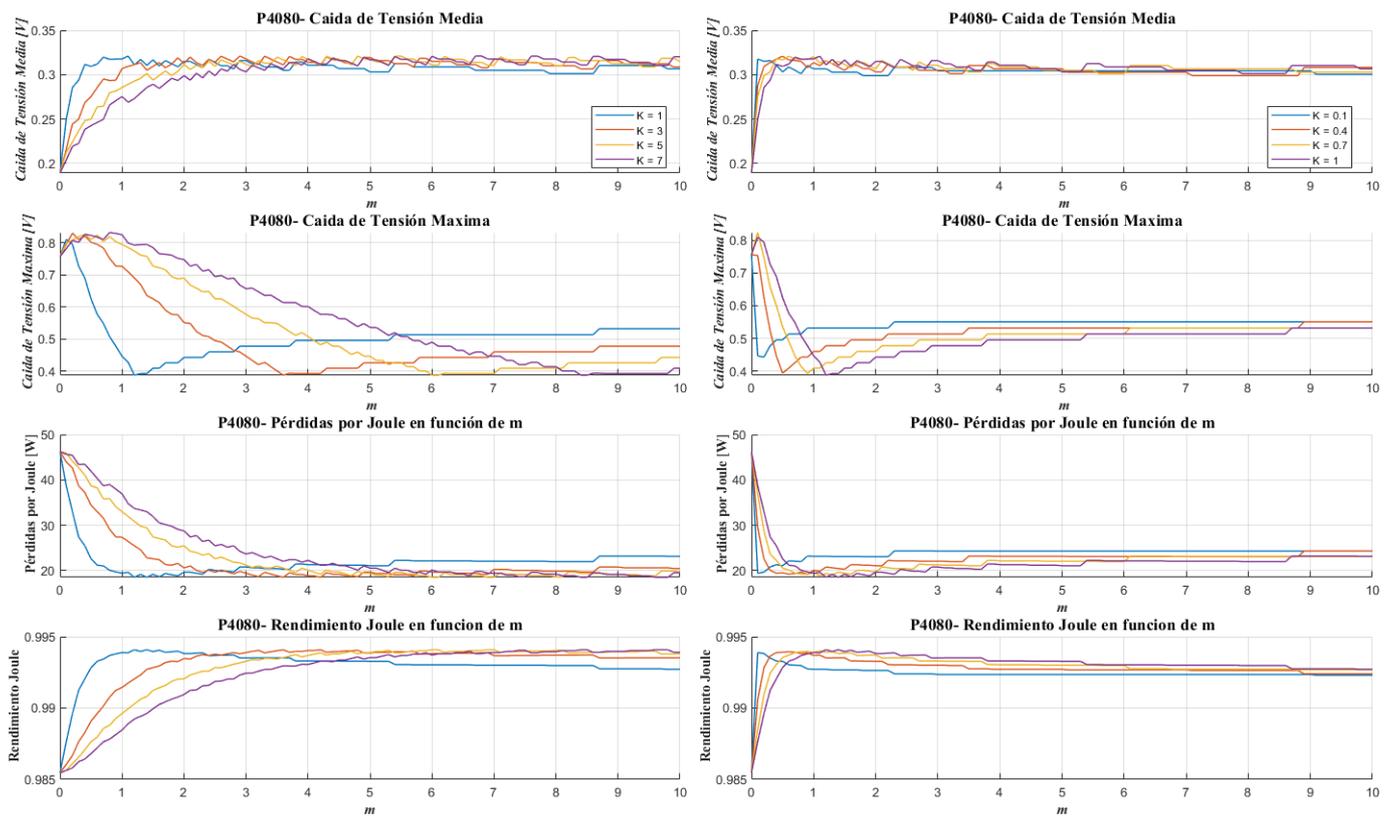


Figura 5.18: P4080 - Parámetros en función K, Función g_1 (FUENTE: Elaboración propia)

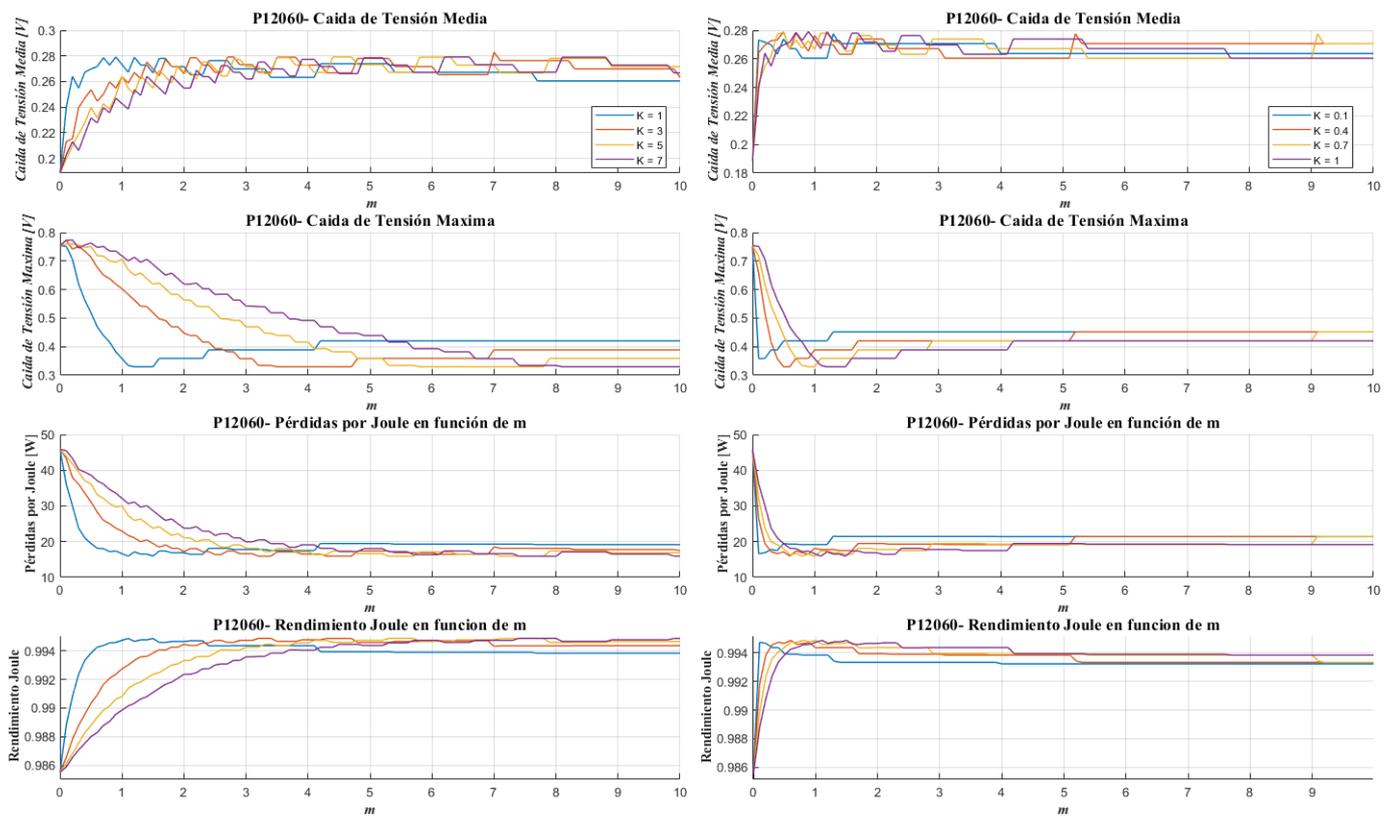


Figura 5.19: P12060 - Parámetros en función K, Función g_1 (FUENTE: Elaboración propia)

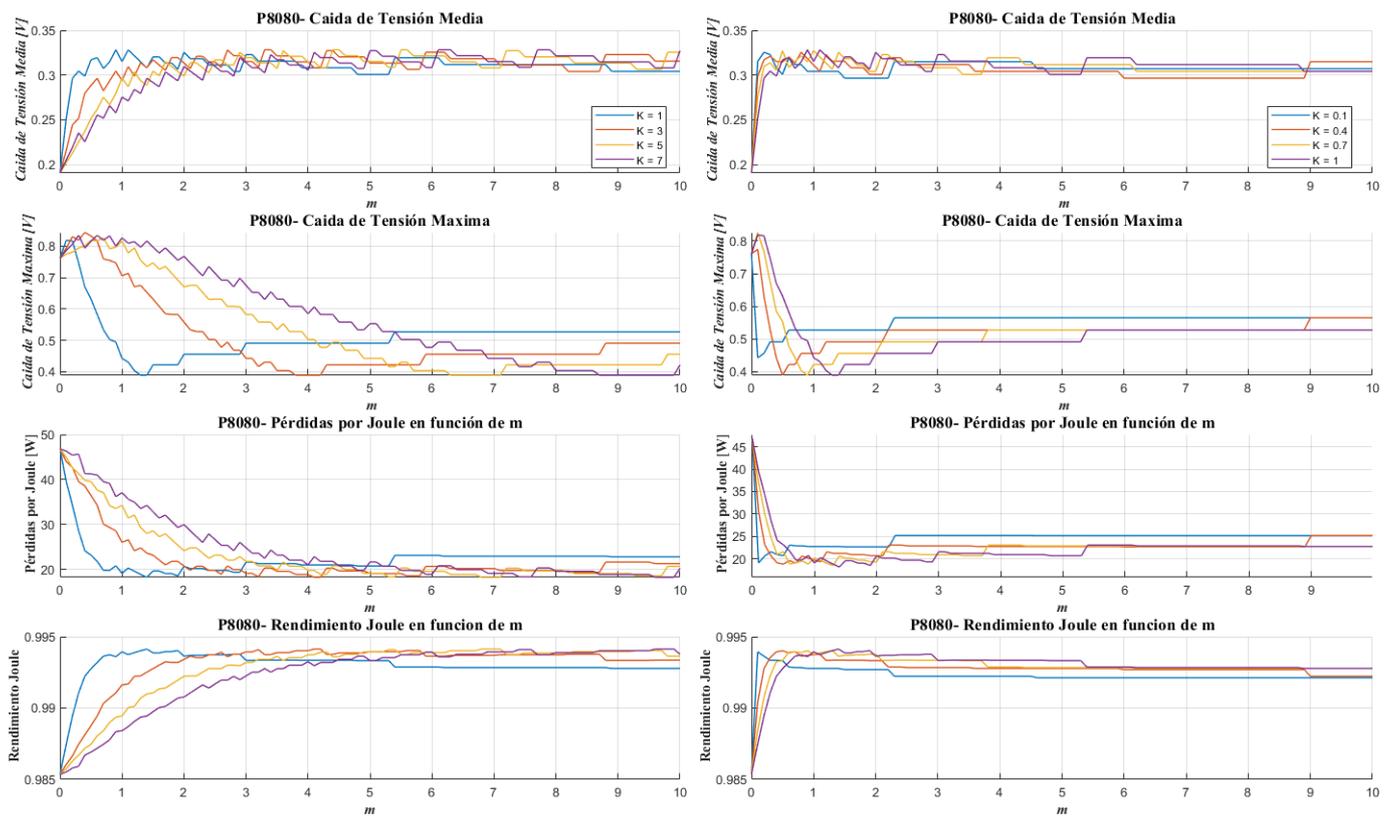


Figura 5.20: P8080 - Parámetros en función K, Función g_1 (FUENTE: Elaboración propia)

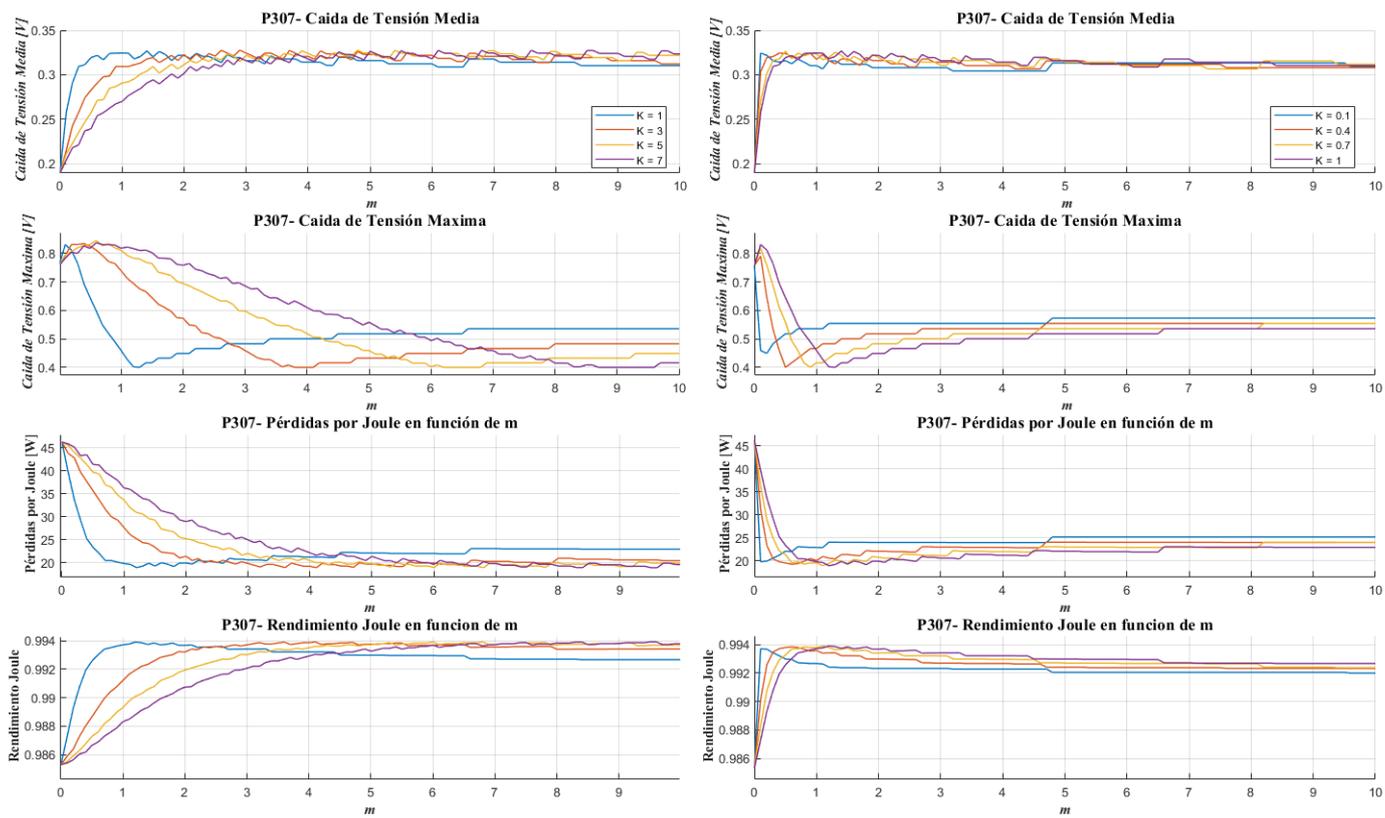


Figura 5.21: P307 - Parámetros en función K, Función g_1 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Optimización de la función

Aplicado el algoritmo obtenemos los siguiente valores:

	Valor	Validas		Mínima Masa		Maximo Rendimiento		Máxima Potencia	
		<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%
K_{P3G28C}	7.2	57	71.25	20	71.4286	4	100	5	100
K_{P4080}	7.0	57	71.25	11	68.75	3	75	2	66.666..
K_{P12060}	8.2	52	66.666..	19	61.2903	9	100	6	60
K_{P8080}	6.7	58	72.50	12	70.5882	5	71.4286	5	71.4286
K_{P307}	5.2	69	86.25	11	73.333	2	50	2	50

Tabla 5.12: Valores óptimos del parámetro K para la función g_1 (*FUENTE: Elaboración propia*)

5.5.3. función g_2

La función g_2 tiene la siguiente forma:

$$mXY = K \quad (5.14)$$

La familia de soluciones que proporciona esta función tiene la siguiente forma:

$$X_2(X, Y) = \frac{L_t - \sqrt{L_t^2 - 12\frac{K}{m}}}{2} \quad (5.15)$$

$$Y_2(X, Y) = \frac{K}{m} \frac{2}{L_t - \sqrt{L_t^2 - 12\frac{K}{m}}} \quad (5.16)$$

subsubsection*Comparación entre paneles para $K = 1$

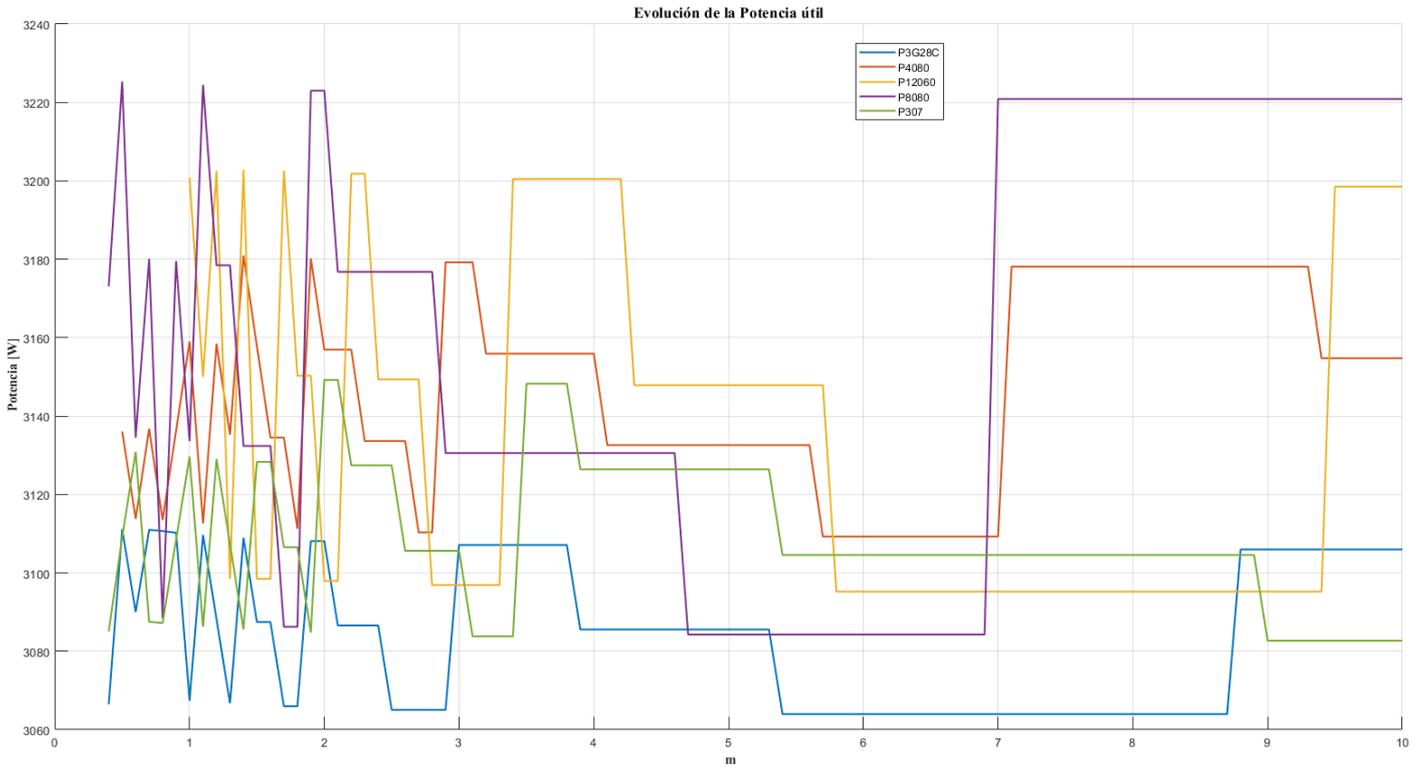


Figura 5.22: $K = 1$ - Comparativa Potencia, Función g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

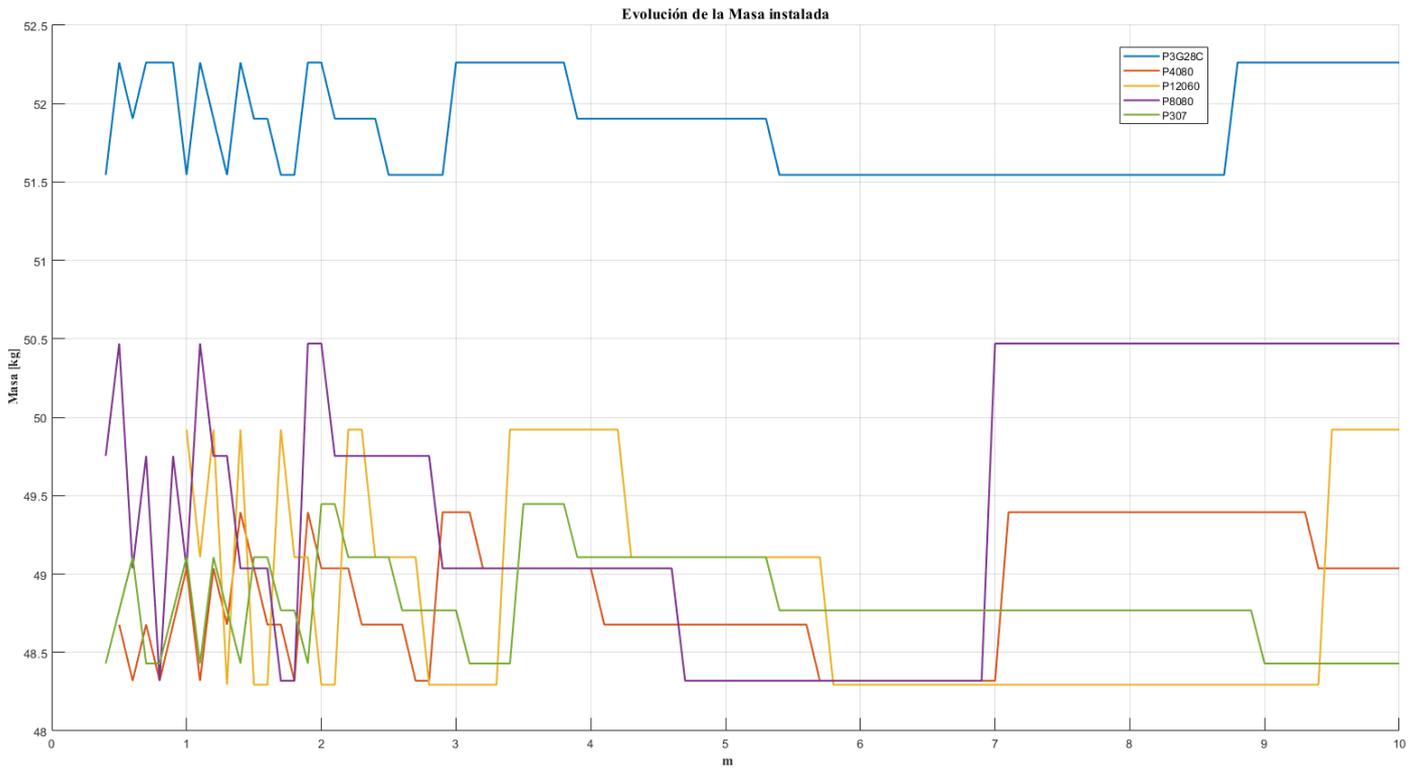


Figura 5.23: $K = 1$ - Comparativa Masa, Función g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

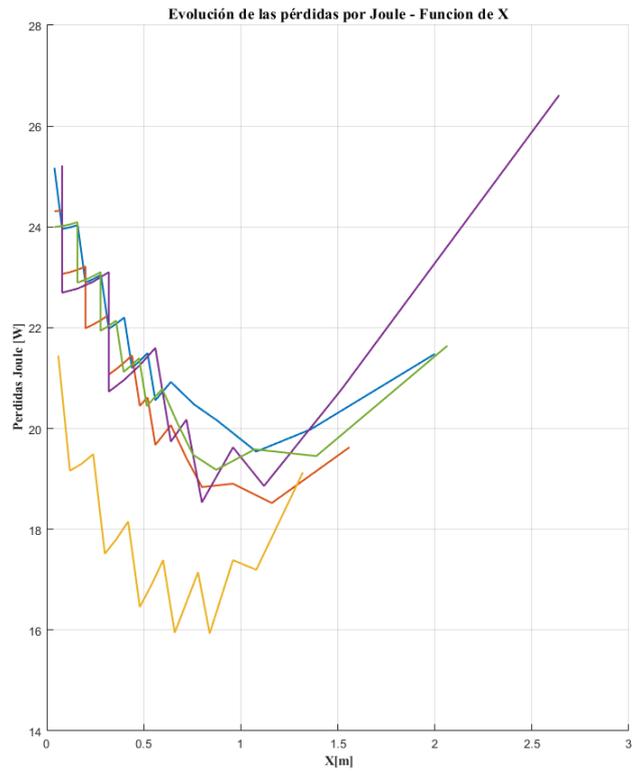
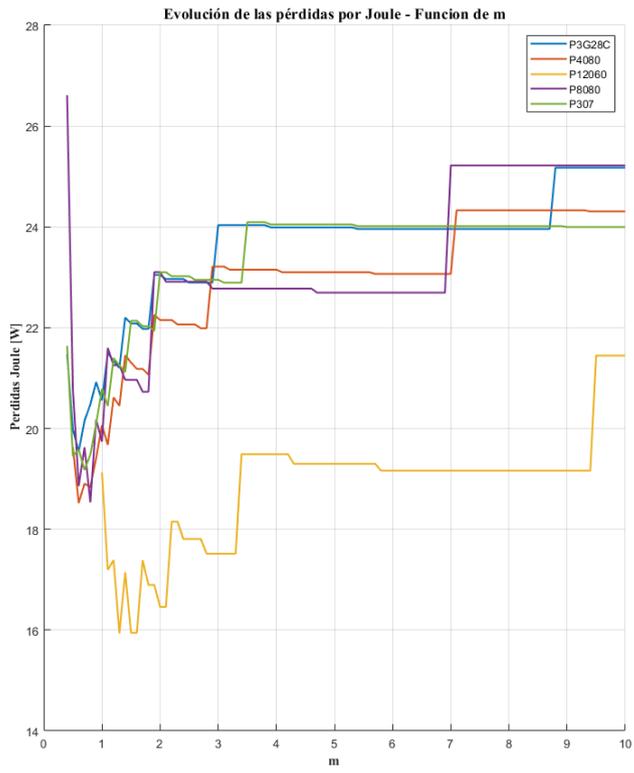


Figura 5.24: $K = 1$ - Comparativa Pérdidas por Joule, Función g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

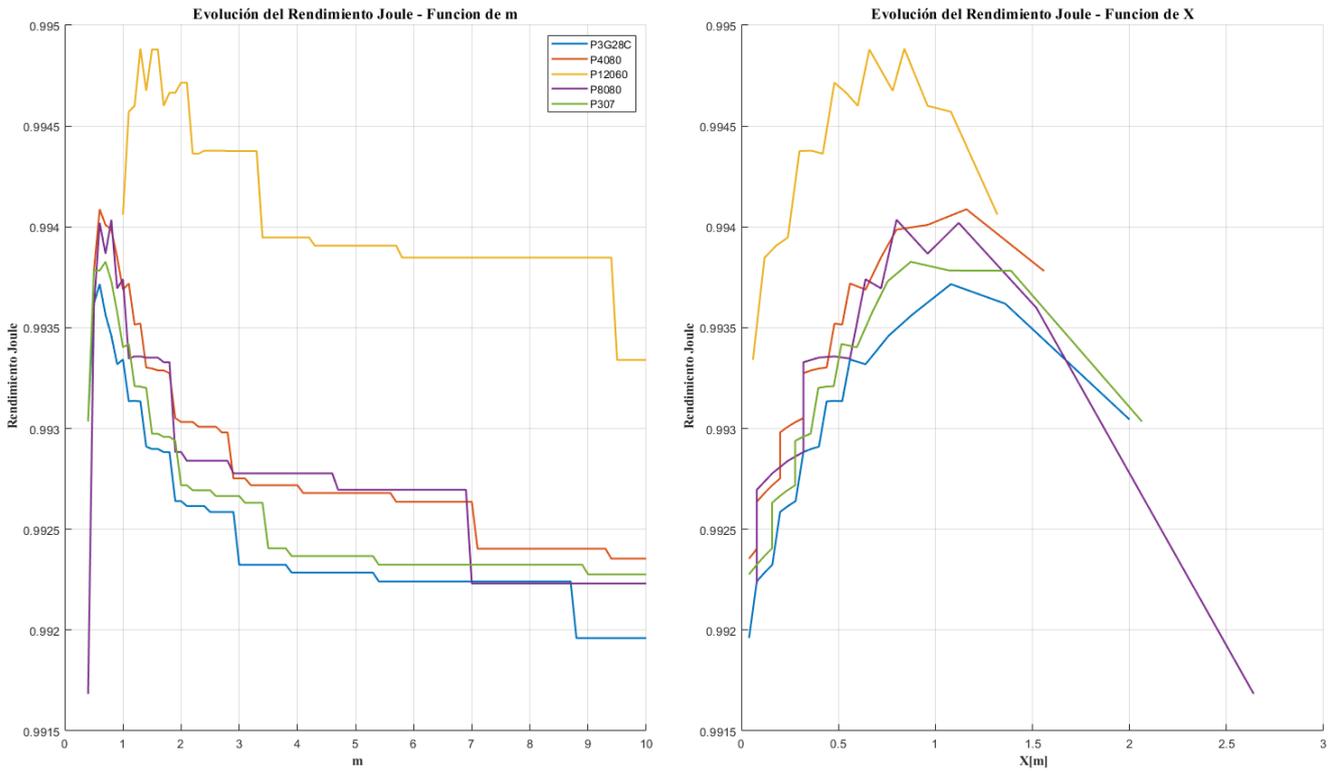


Figura 5.25: $K = 1$ - Comparativa Rendimiento Joule, Función g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Comportamiento de los parámetros de funcionamiento en función de K

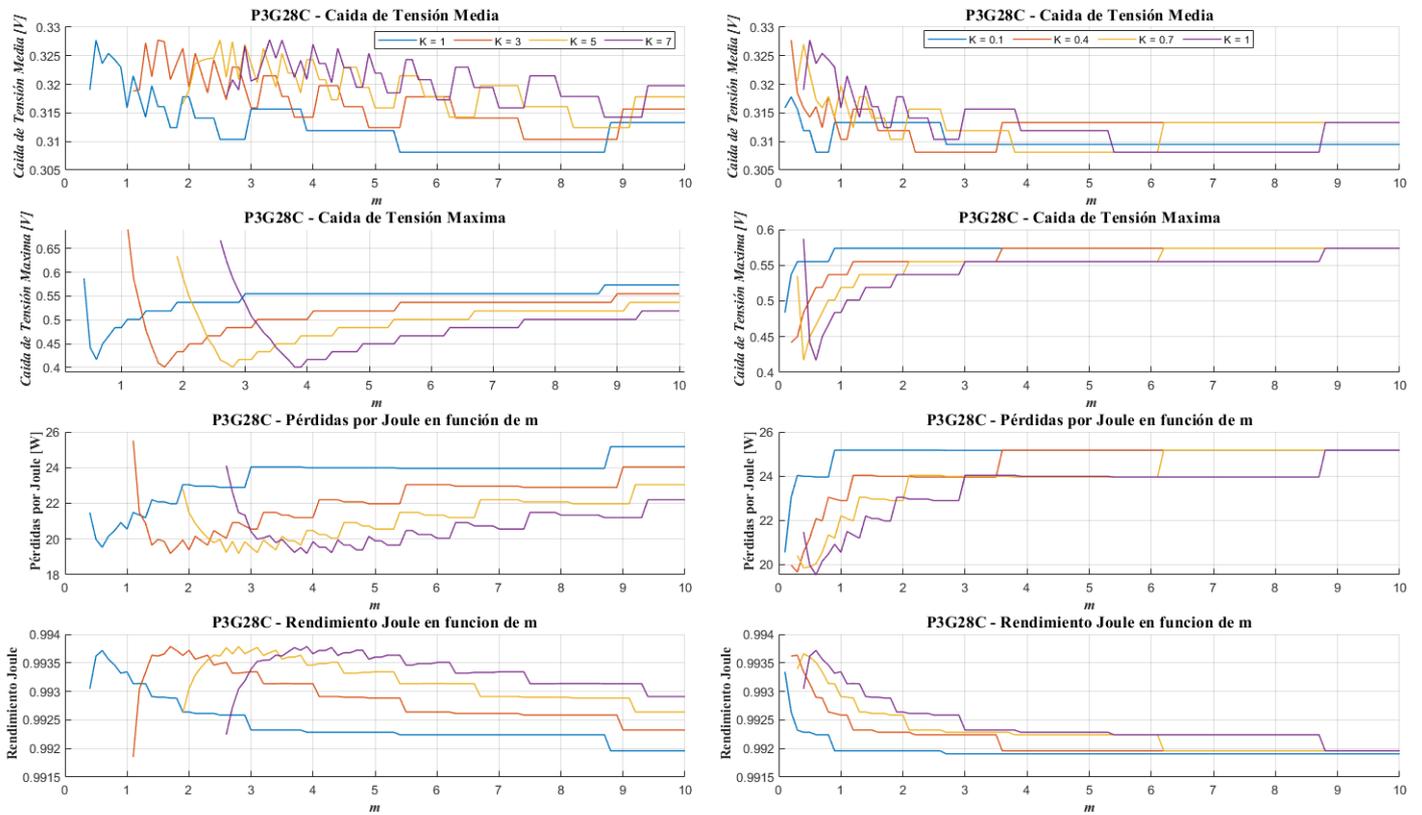


Figura 5.26: P3G28C - Parámetros en función K, Función g_2 (FUENTE: Elaboración propia)

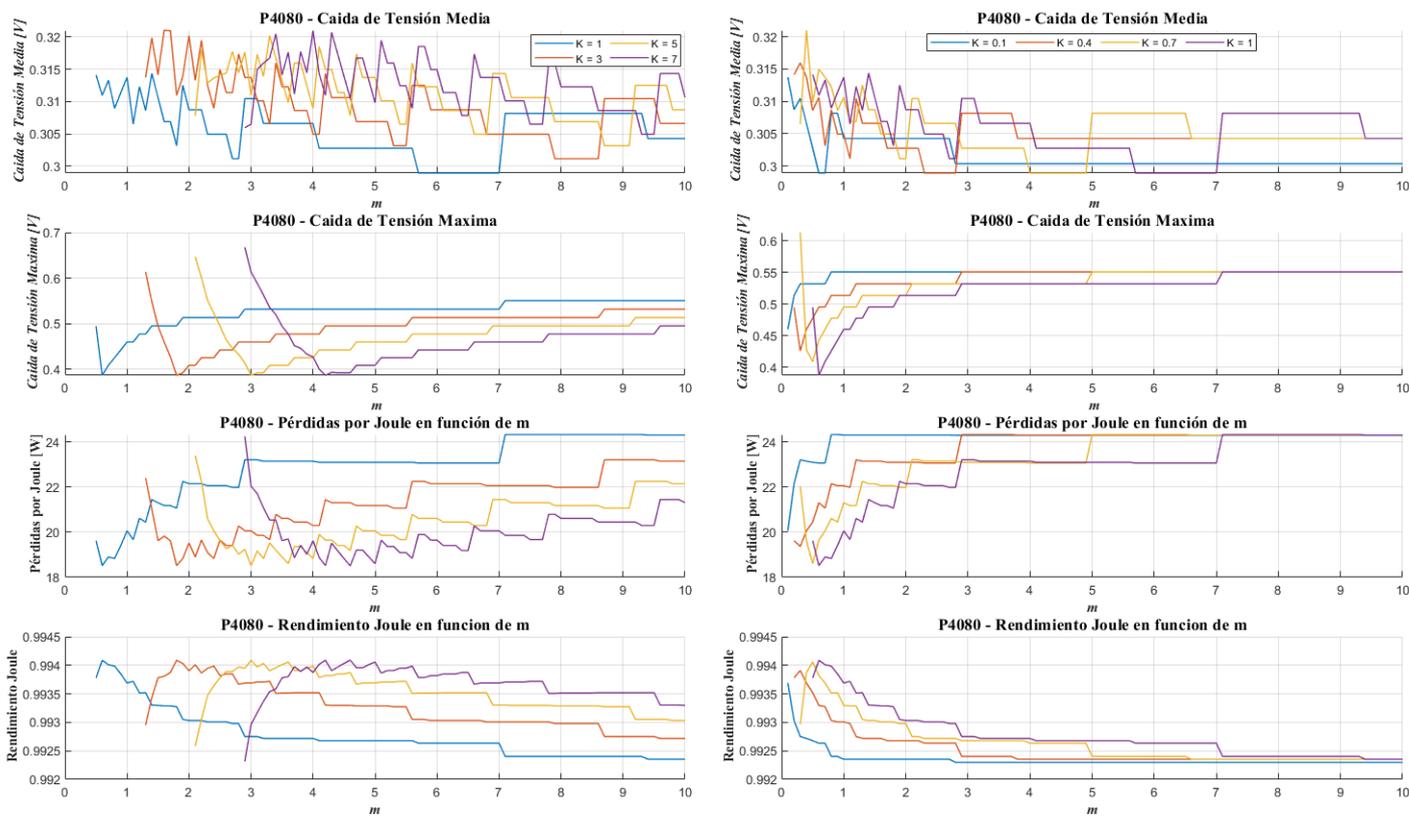


Figura 5.27: P4080 - Parámetros en función K, Función g_2 (FUENTE: Elaboración propia)

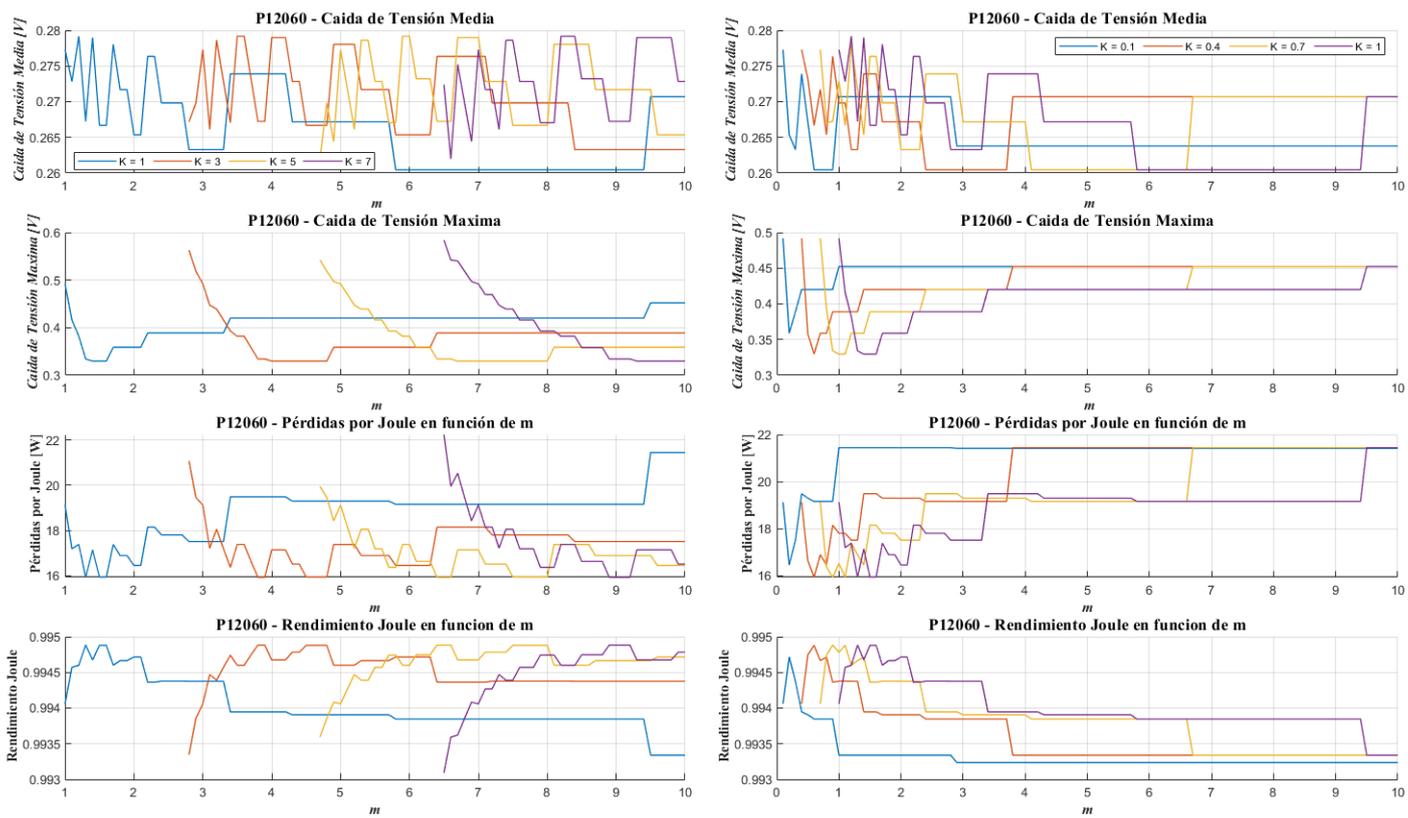


Figura 5.28: P12060 - Parámetros en función K, Función g_2 (FUENTE: Elaboración propia)

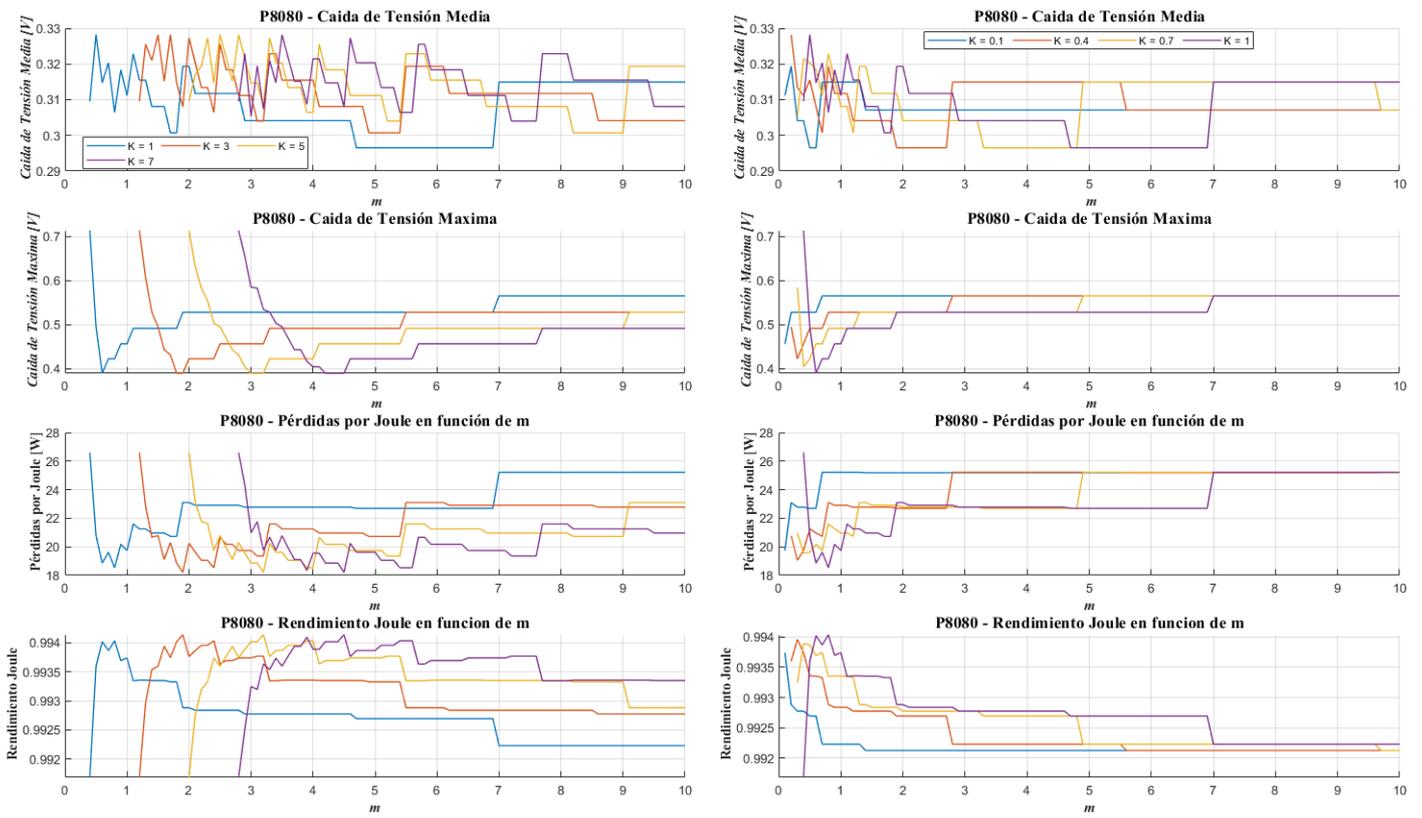


Figura 5.29: P8080 - Parámetros en función K, Función g_2 (FUENTE: Elaboración propia)

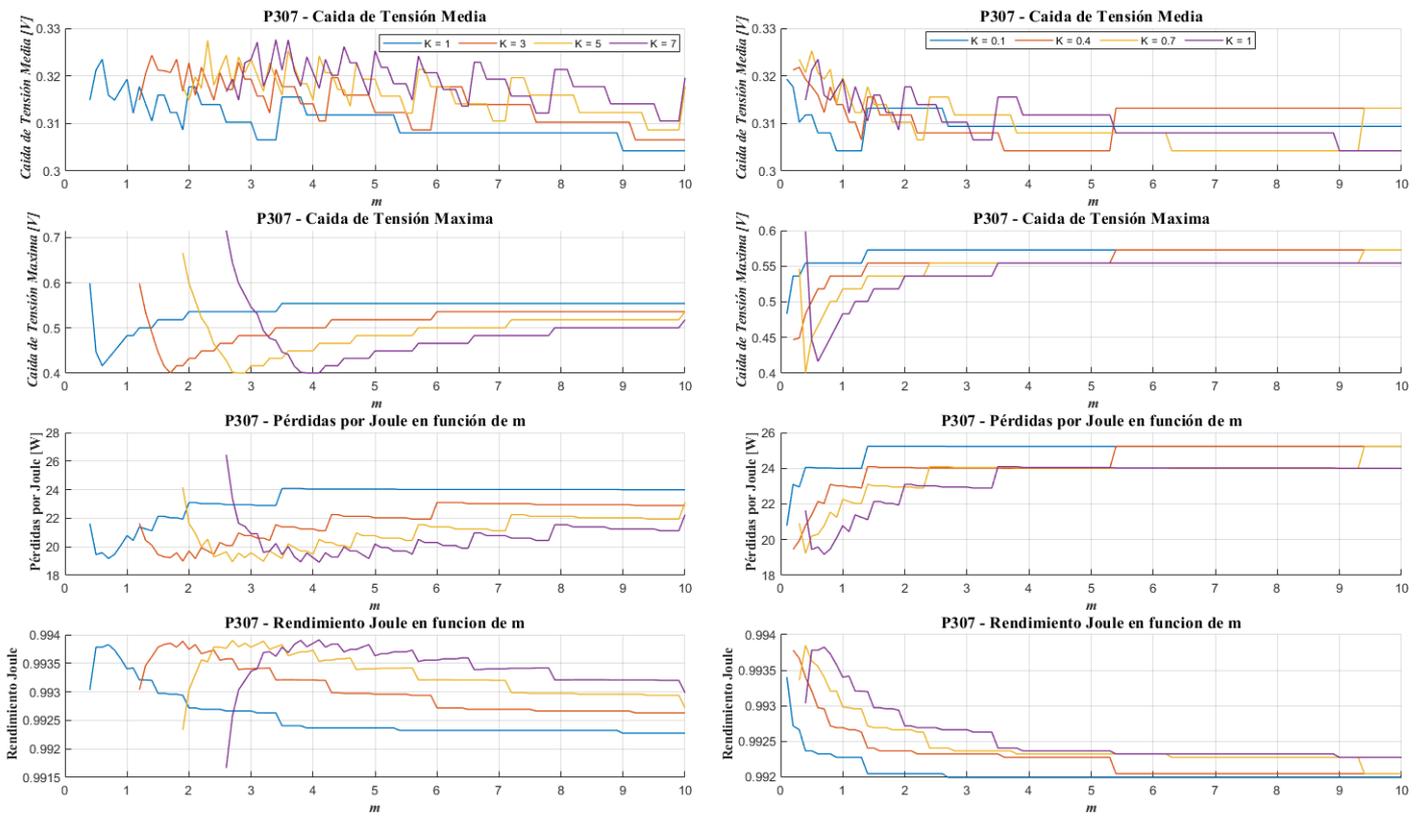


Figura 5.30: P307 - Parámetros en función K, Función g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Optimización de la función

Aplicando el algoritmo obtenemos los siguiente valores:

	Valor	Validas		Mínima Masa		Maximo Rendimiento		Máxima Potencia	
		<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%
K_{P3G28C}	14.4	43	71.66	16	69.5652	3	100	2	66.666
K_{P4080}	12.3	45	73.7705	11	78.5714	2	100	1	50
K_{P12060}	5.7	43	74.1379	15	71.4286	4	80	1	60
K_{P8080}	11.7	49	79.0323	10	71.4286	3	75	2	66.666
K_{P307}	14.8	49	68.33	9	69.2308	2	100	1	50

Tabla 5.13: Valores óptimos del parámetro K para la función g_2 (*FUENTE: Elaboración propia*)

5.5.4. Comparativa Funciones g_1 y g_2

Comparación entre funciones para $K = 1$

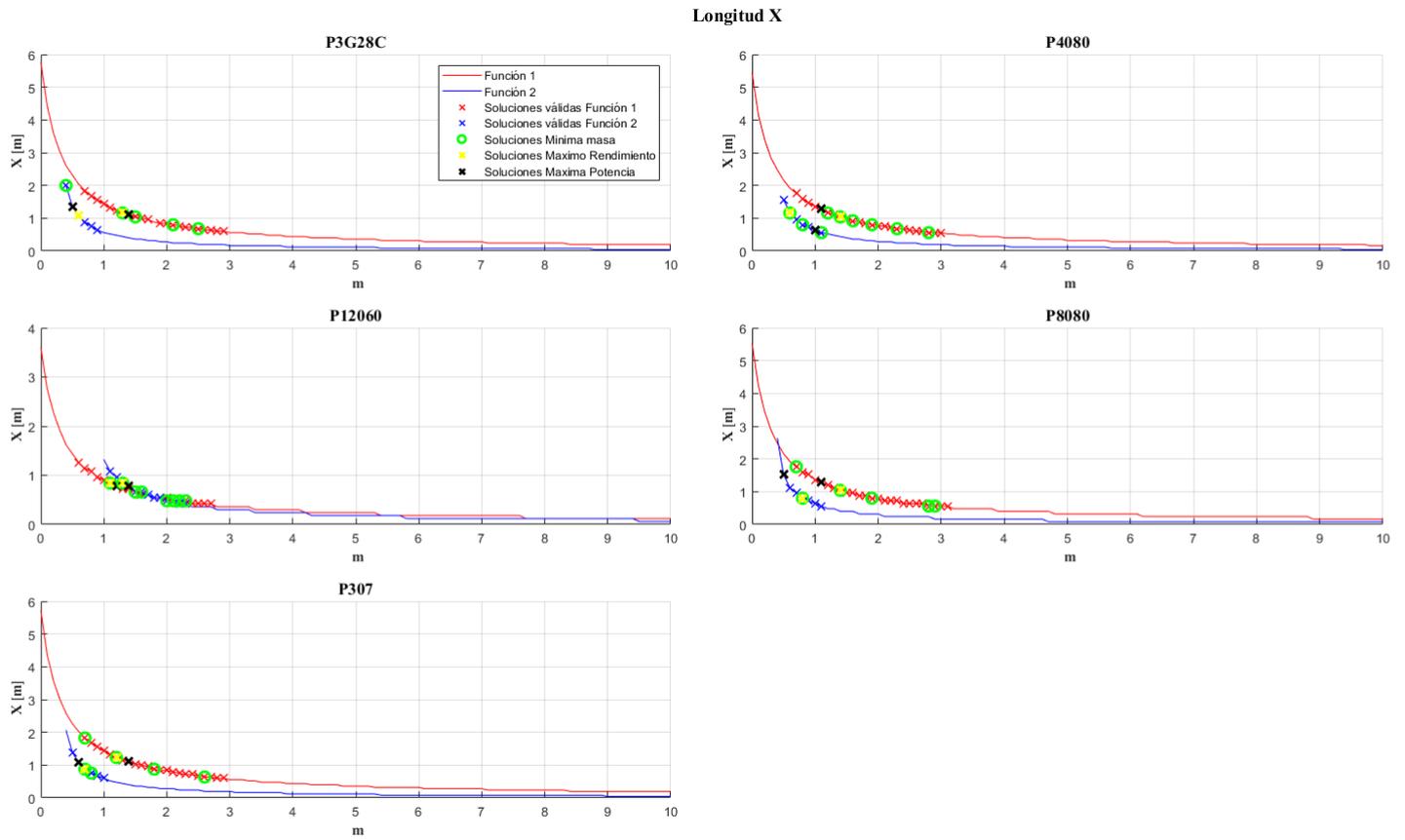


Figura 5.31: $K = 1$ - Distribución de X , g_1 y g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

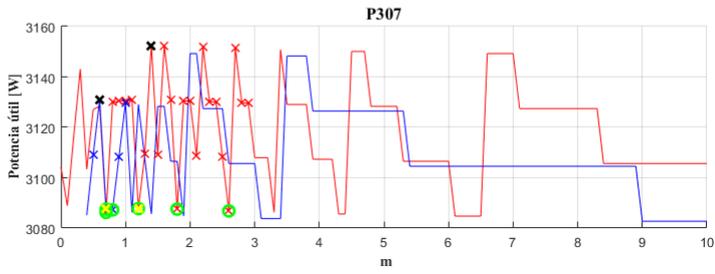
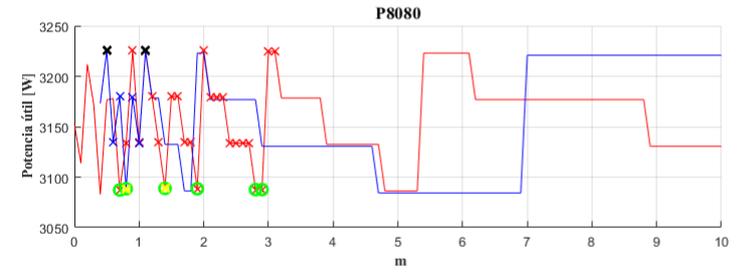
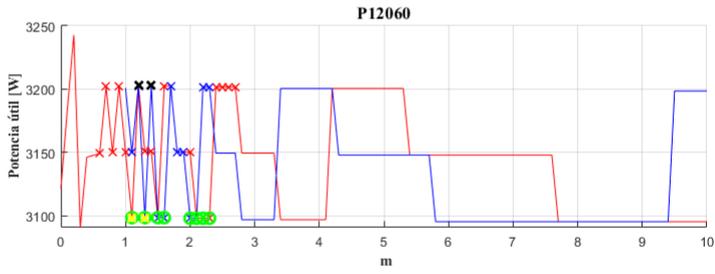
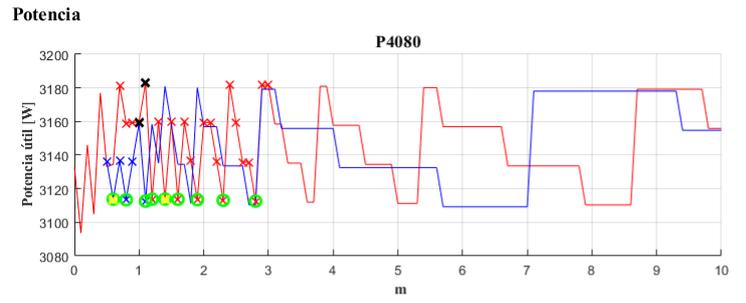
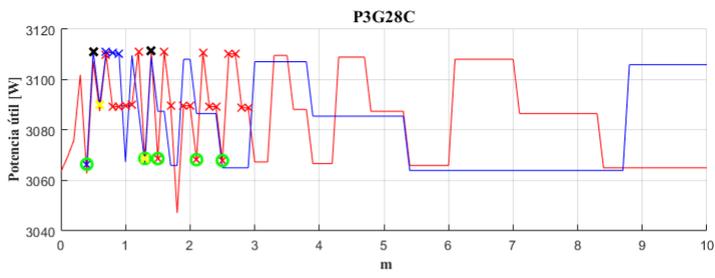


Figura 5.32: $K = 1$ - Potencia, g_1 y g_2 (FUENTE: Elaboración propia)

Pérdidas por Joule en función de m

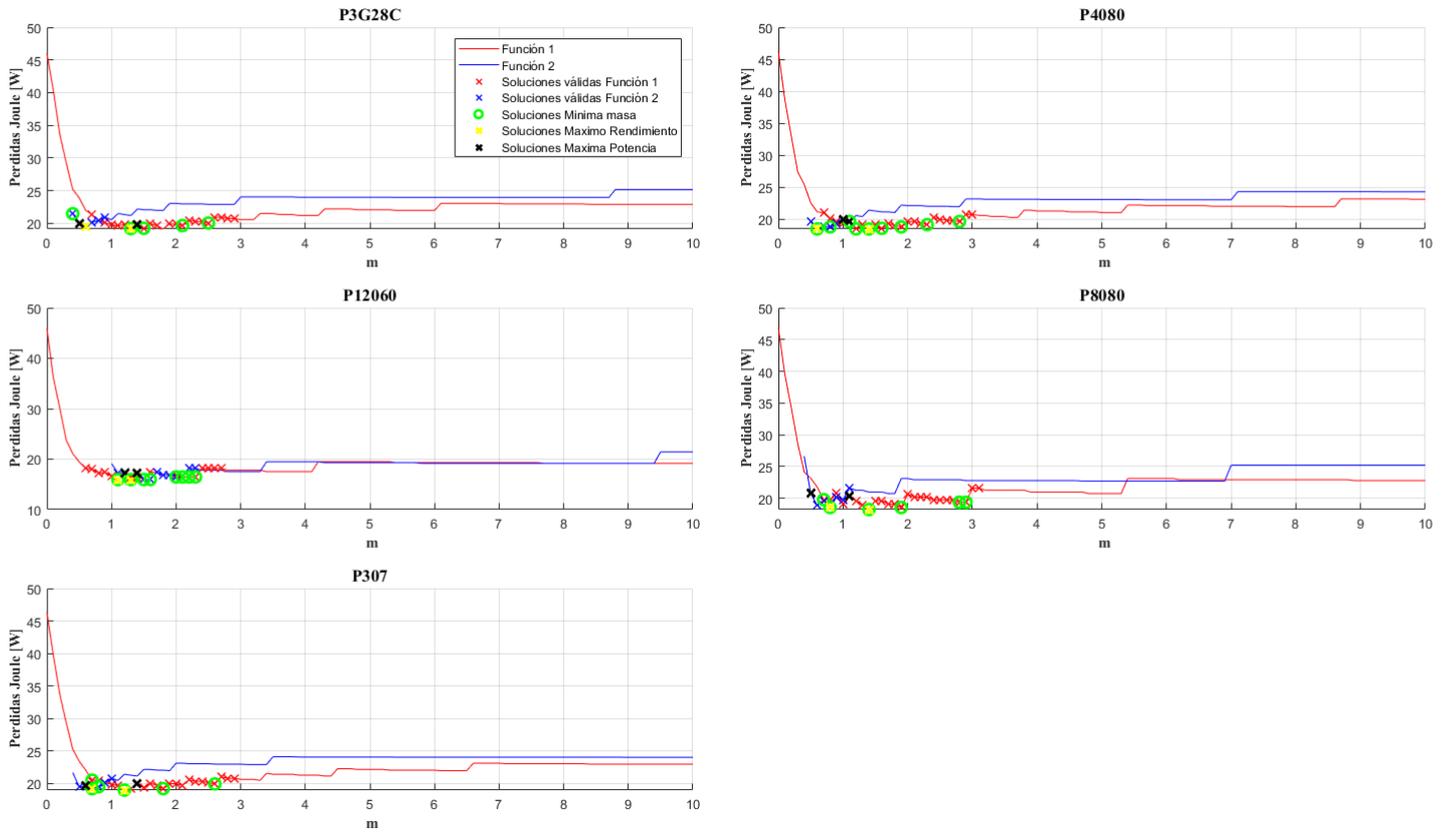


Figura 5.33: $K = 1$ - Pérdidas Joule en función de m, g_1 y g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Pérdidas por Joule en función de X

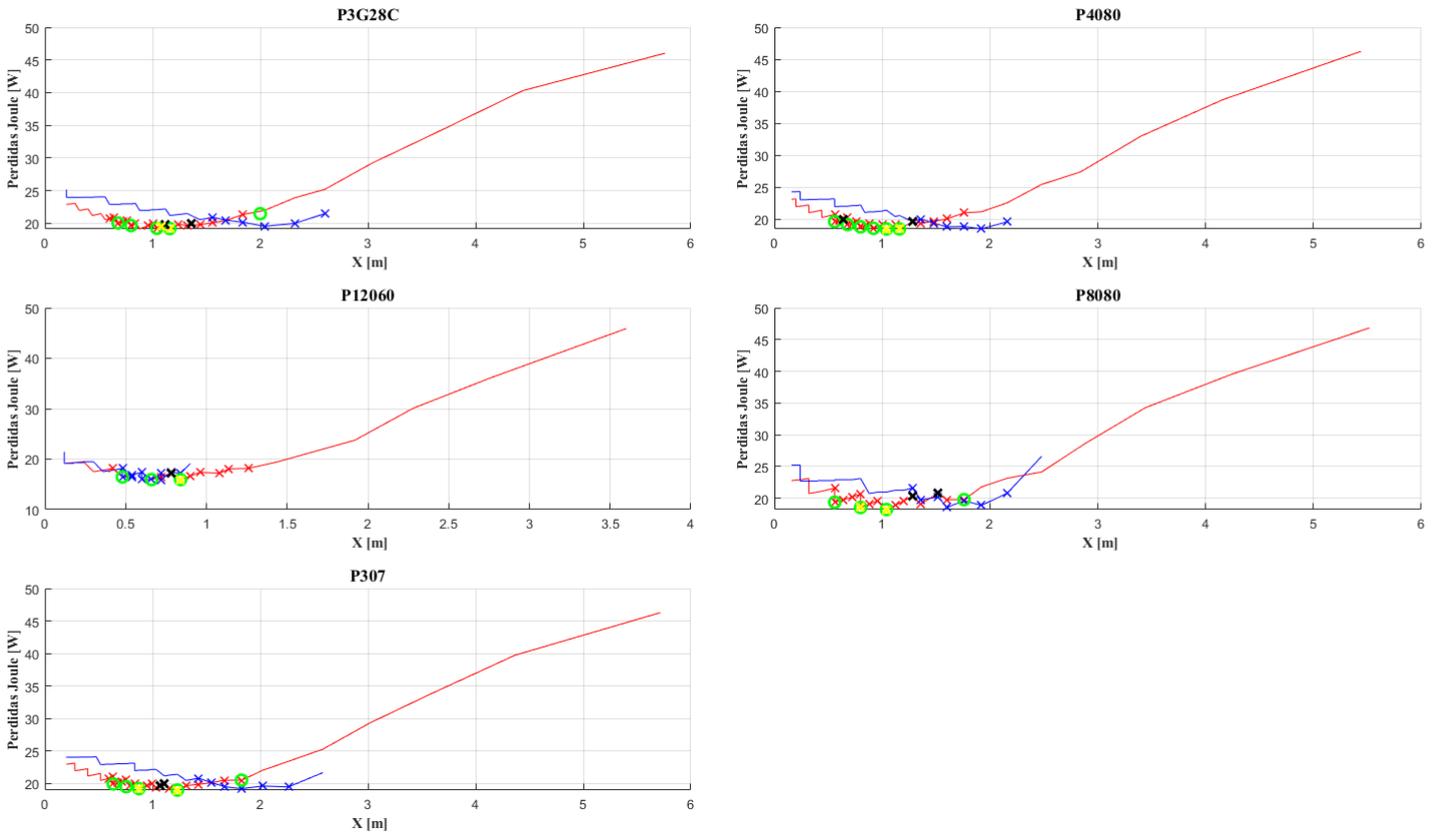


Figura 5.34: $K = 1$ - Pérdidas Joule en función de X, g_1 y g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

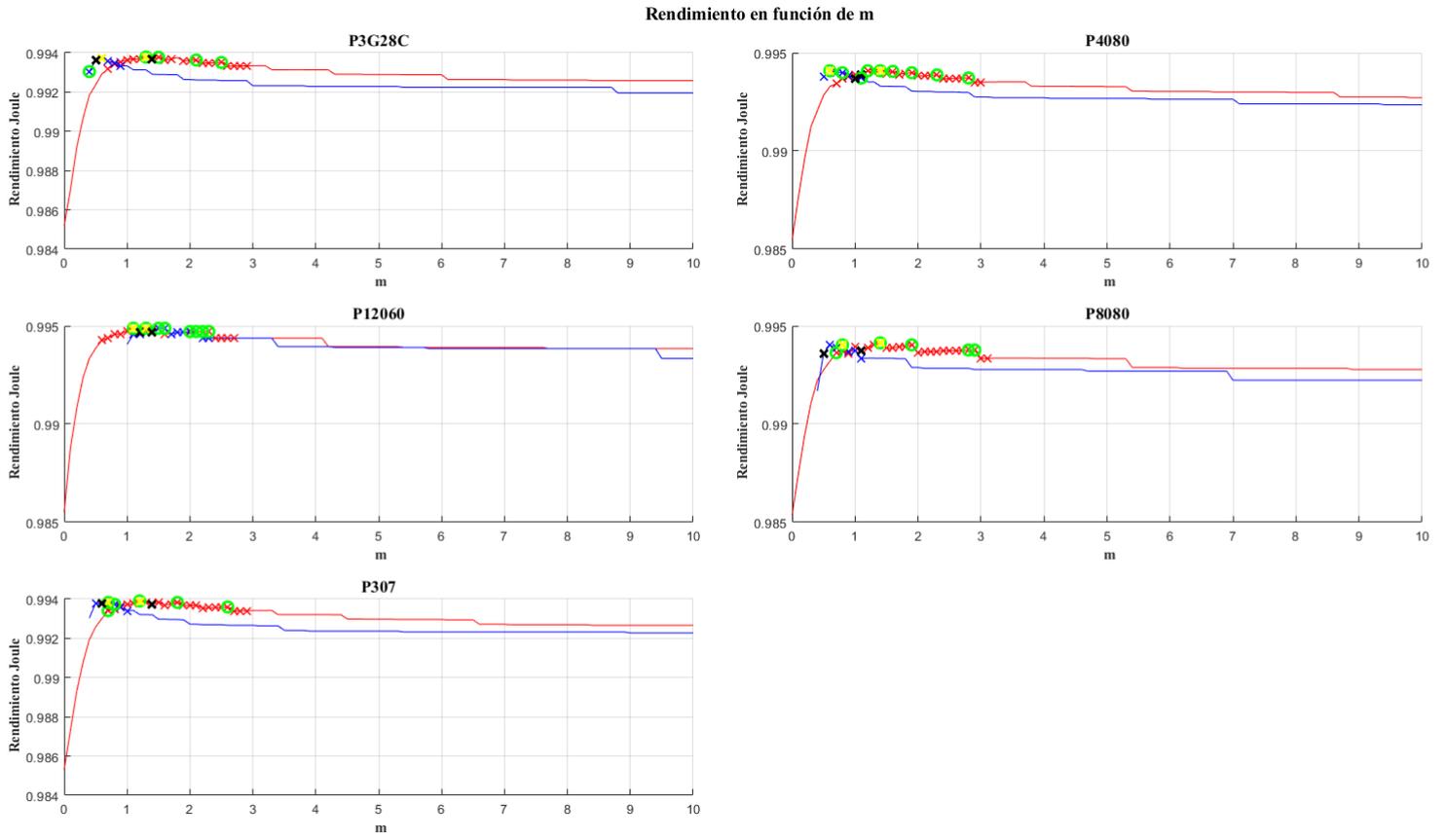


Figura 5.35: $K = 1$ - Rendimiento en función de m , g_1 y g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Rendimiento en función de X

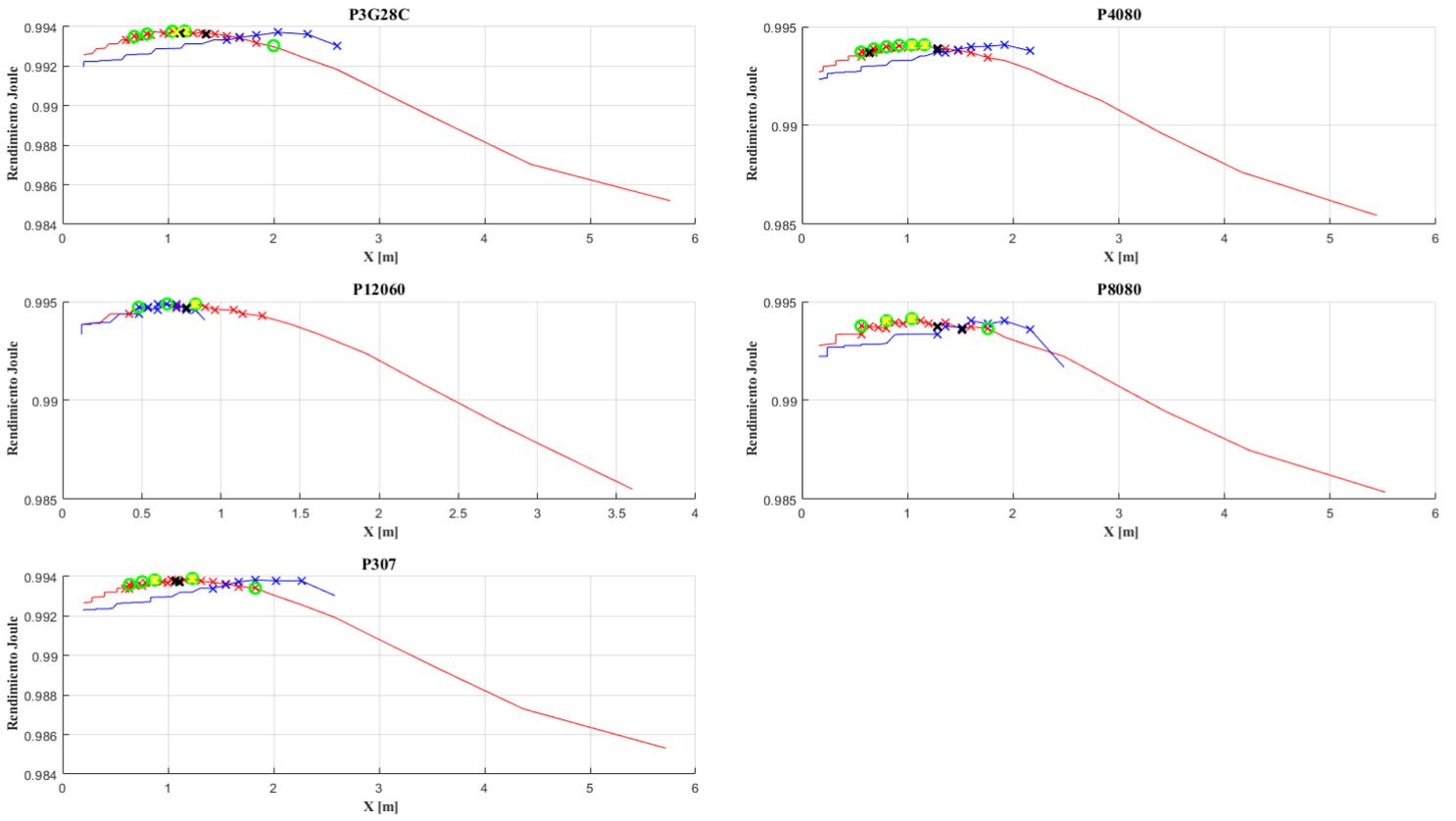


Figura 5.36: $K = 1$ - Rendimiento en función de m , g_1 y g_2 (FUENTE: Elaboración propia)

Número de soluciones en función de K

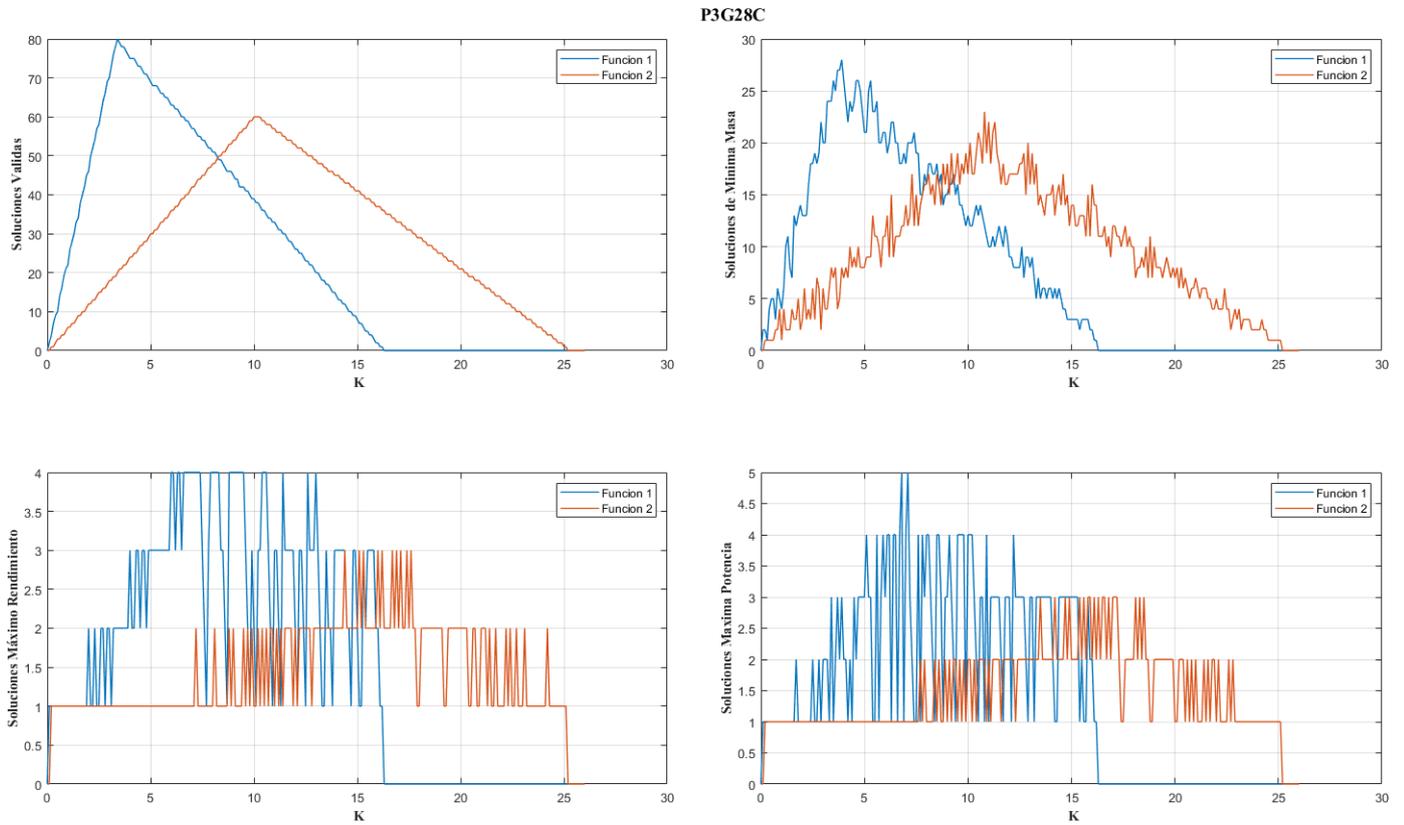


Figura 5.37: P3G28C - Número de soluciones g_1 y g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

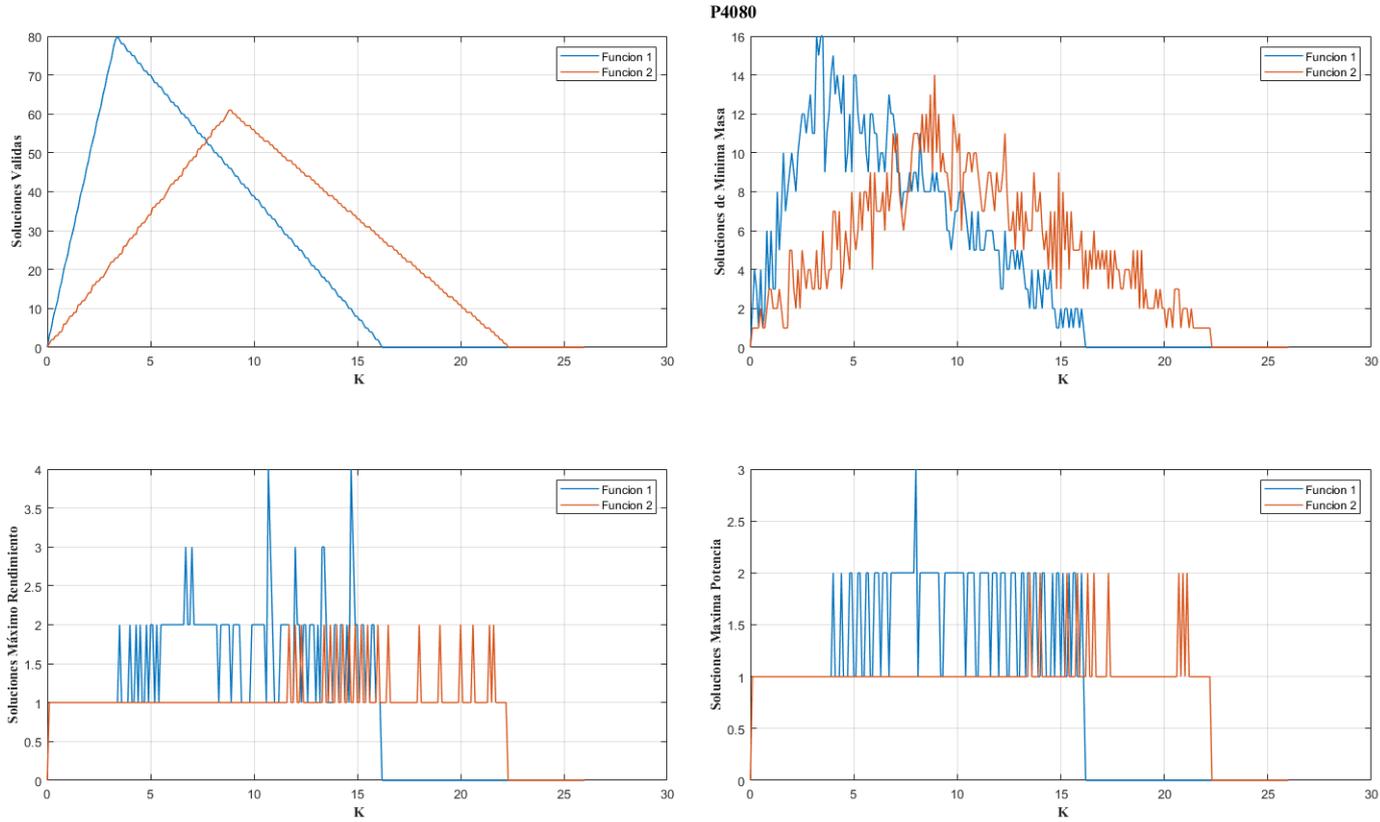
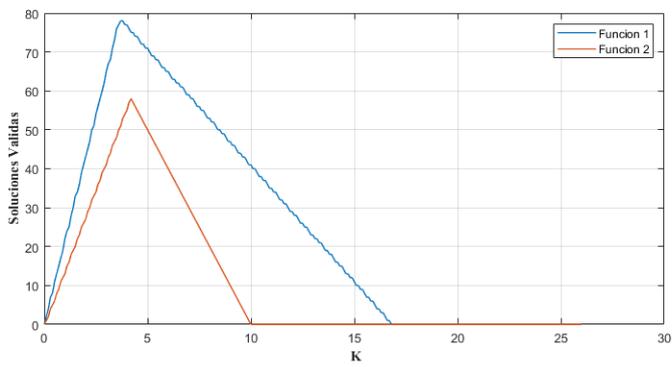


Figura 5.38: P4080 - Número de soluciones g_1 y g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)



P12060

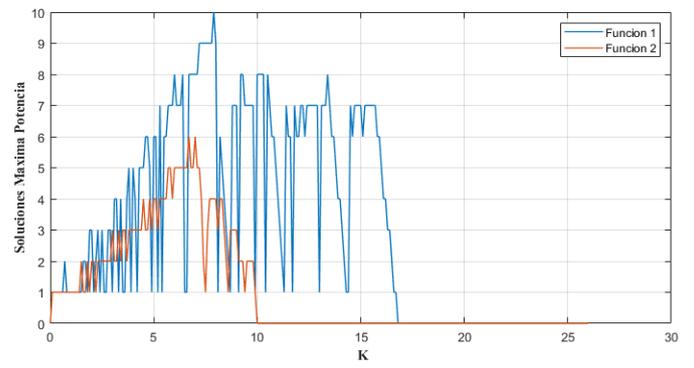
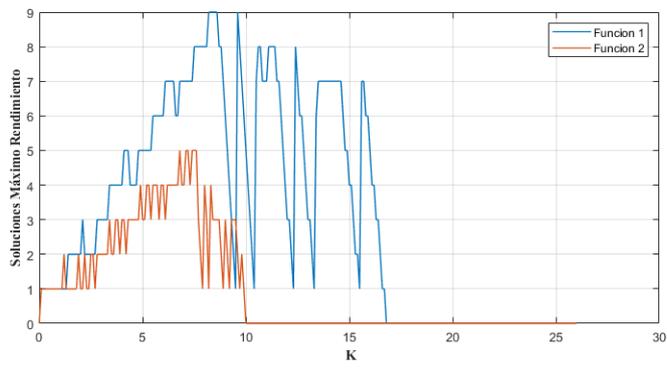
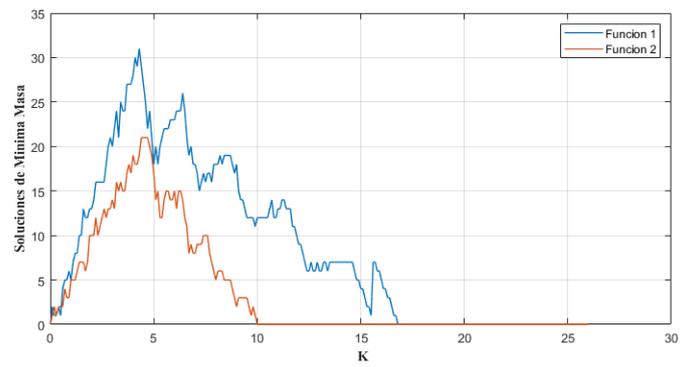
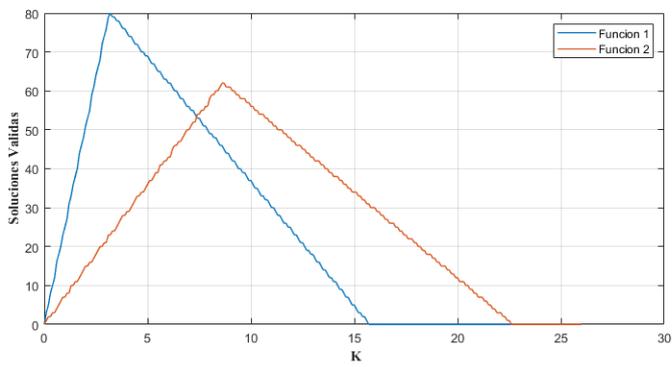


Figura 5.39: P12060 - Número de soluciones g_1 y g_2 (FUENTE: Elaboración propia)



P8080

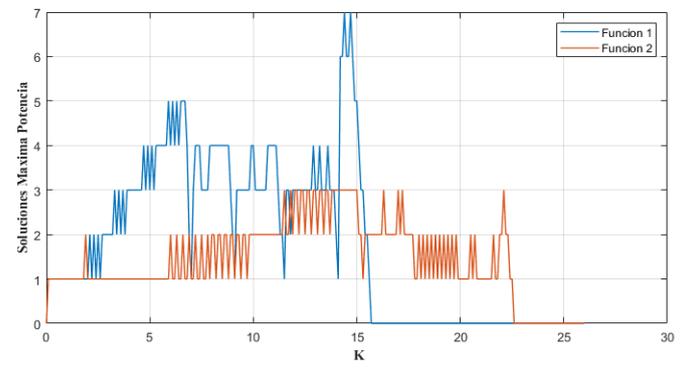
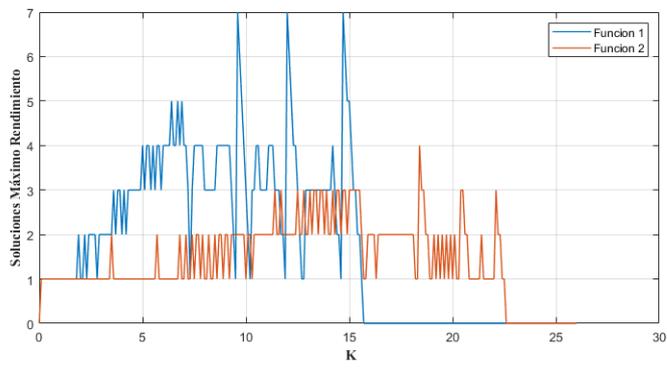
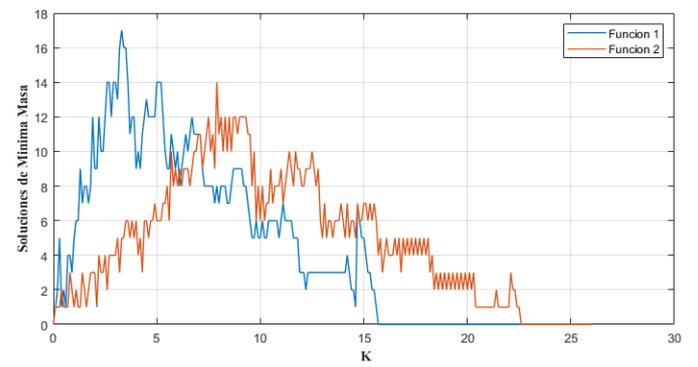


Figura 5.40: P8080 - Número de soluciones g_1 y g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

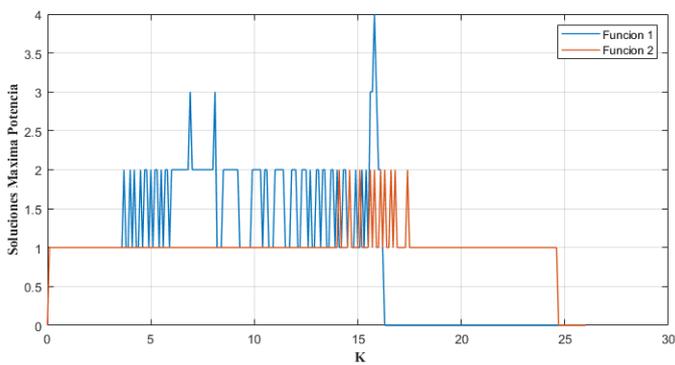
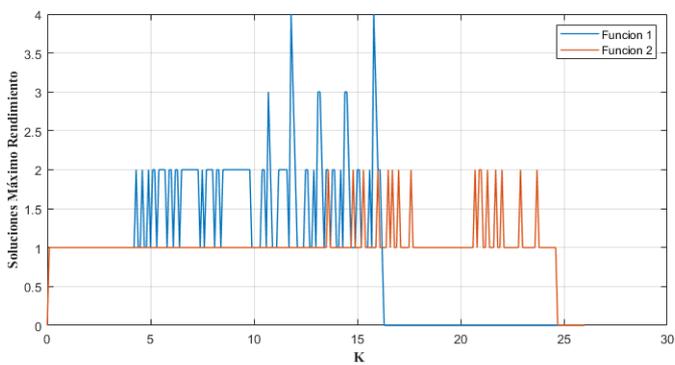
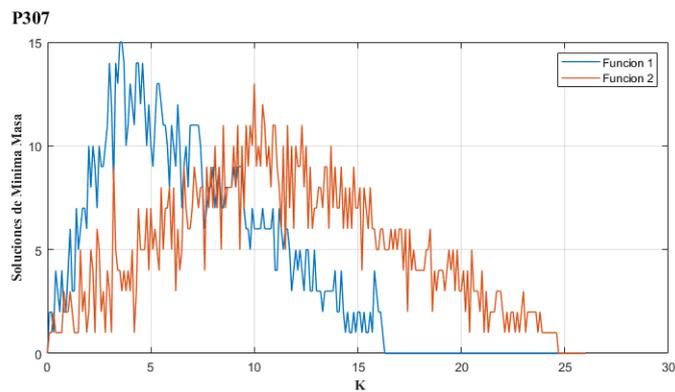
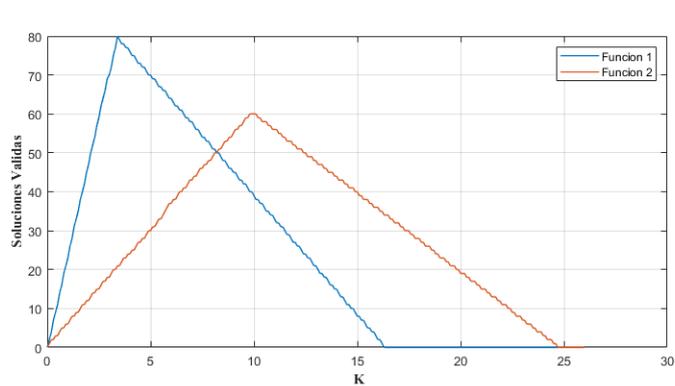


Figura 5.41: P307 - Número de soluciones g_1 y g_2 (FUENTE: Elaboración propia)

Parámetros optimizados en función de K

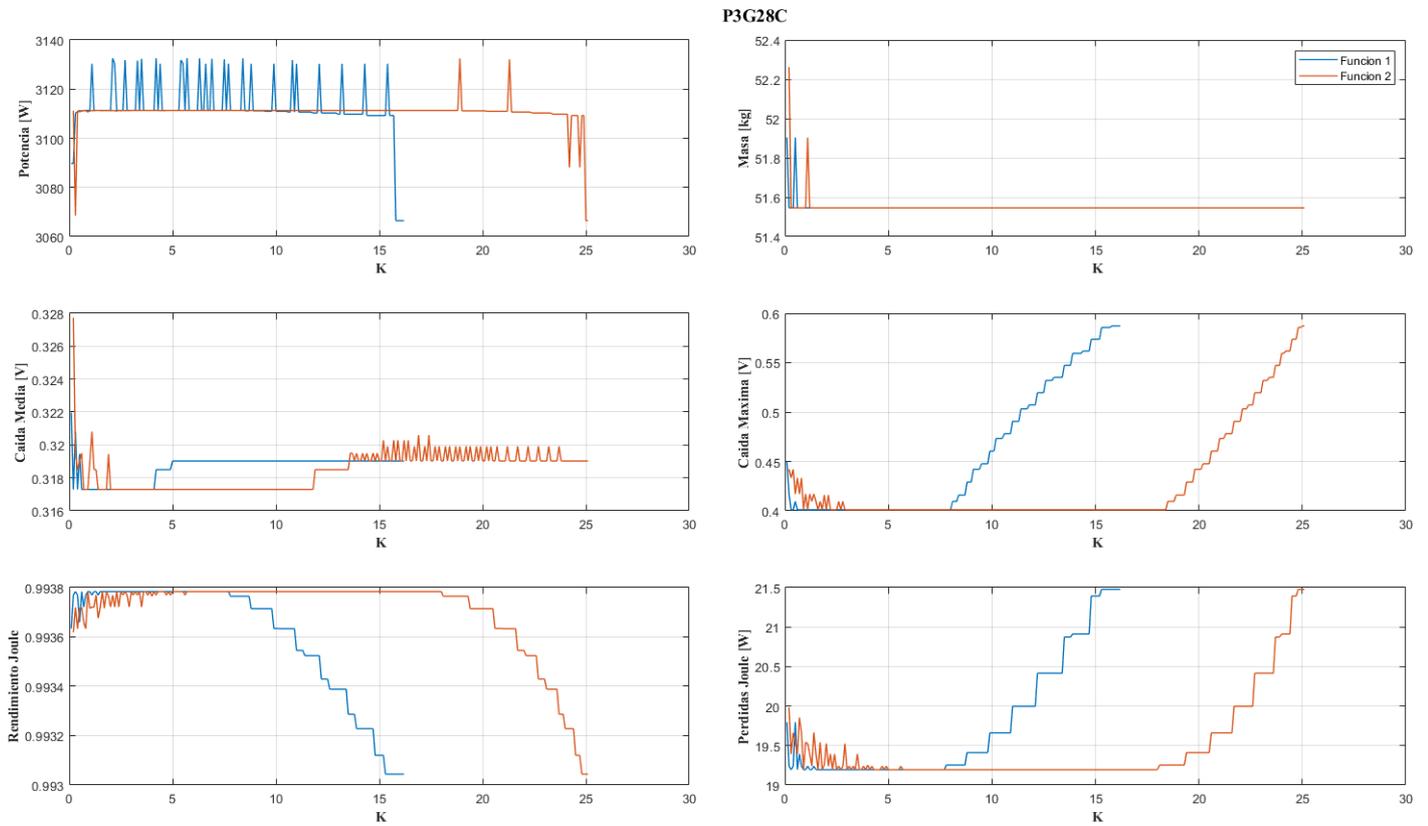


Figura 5.42: P3G28C - Parámetros optimizados g_1 y g_2 (FUENTE: Elaboración propia)

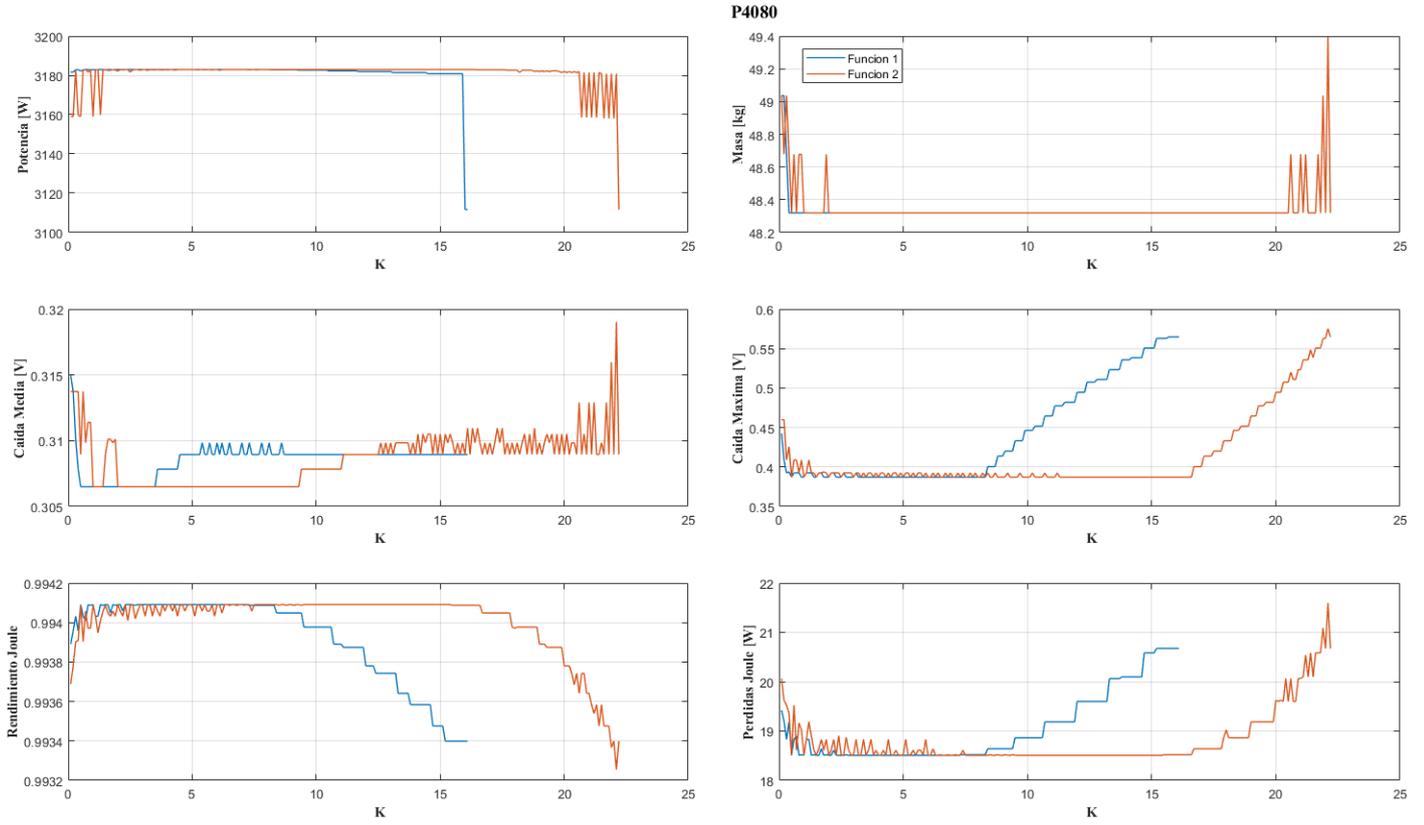


Figura 5.43: P4080 - Parámetros optimizados g_1 y g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

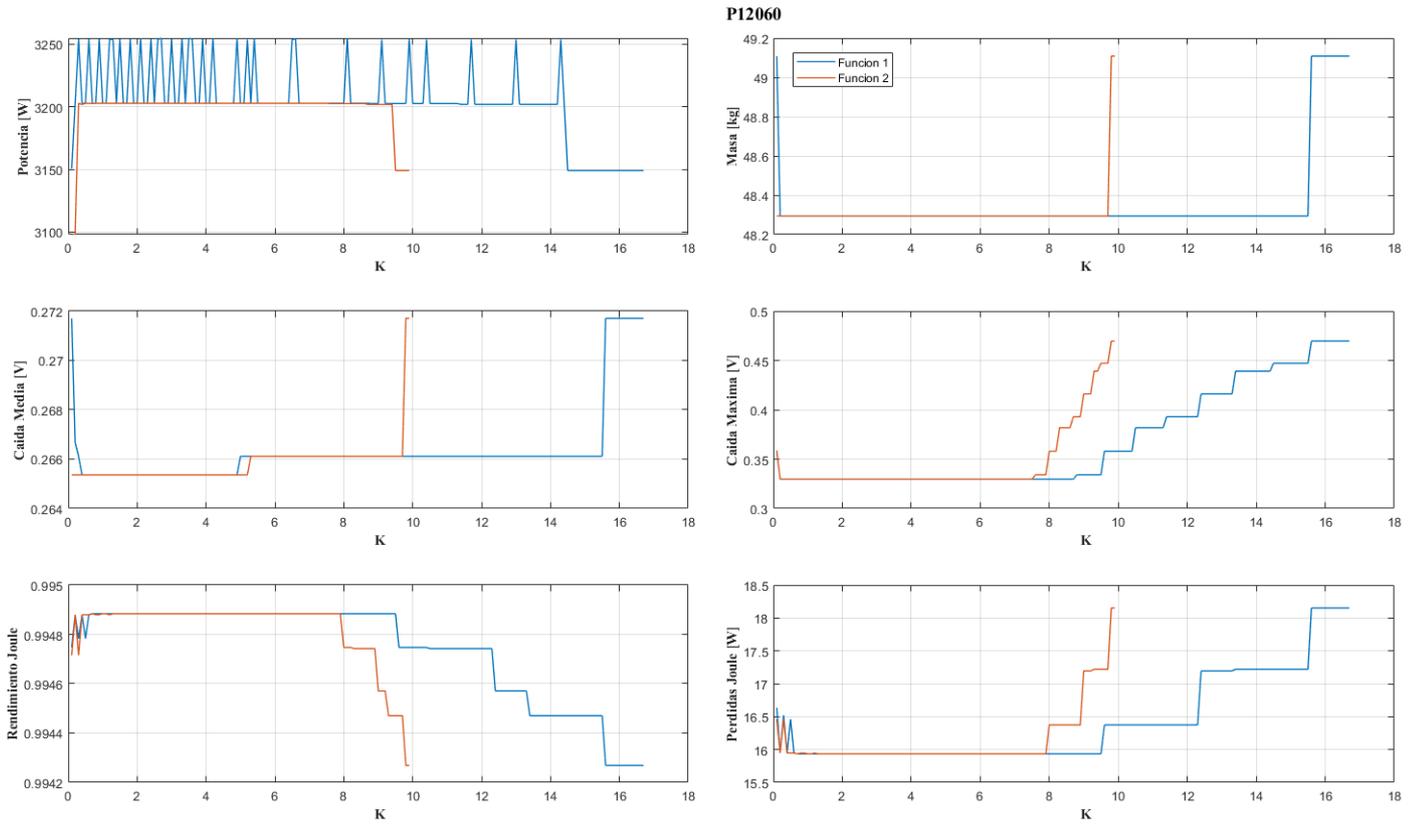


Figura 5.44: P12060 - Parámetros optimizados g_1 y g_2 (FUENTE: Elaboración propia)

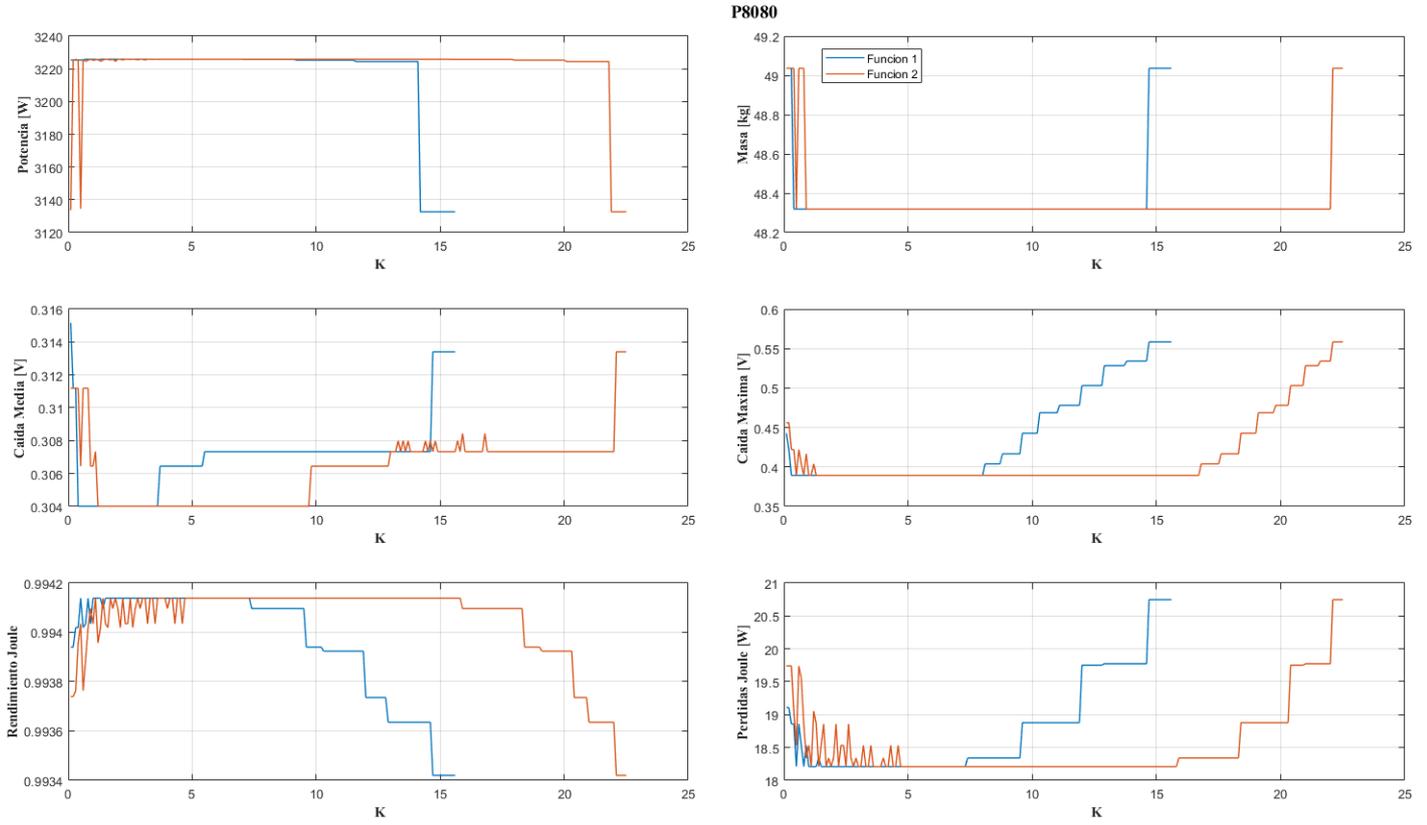


Figura 5.45: P8080 - Parámetros optimizados g_1 y g_2 (FUENTE: *Elaboración propia*)

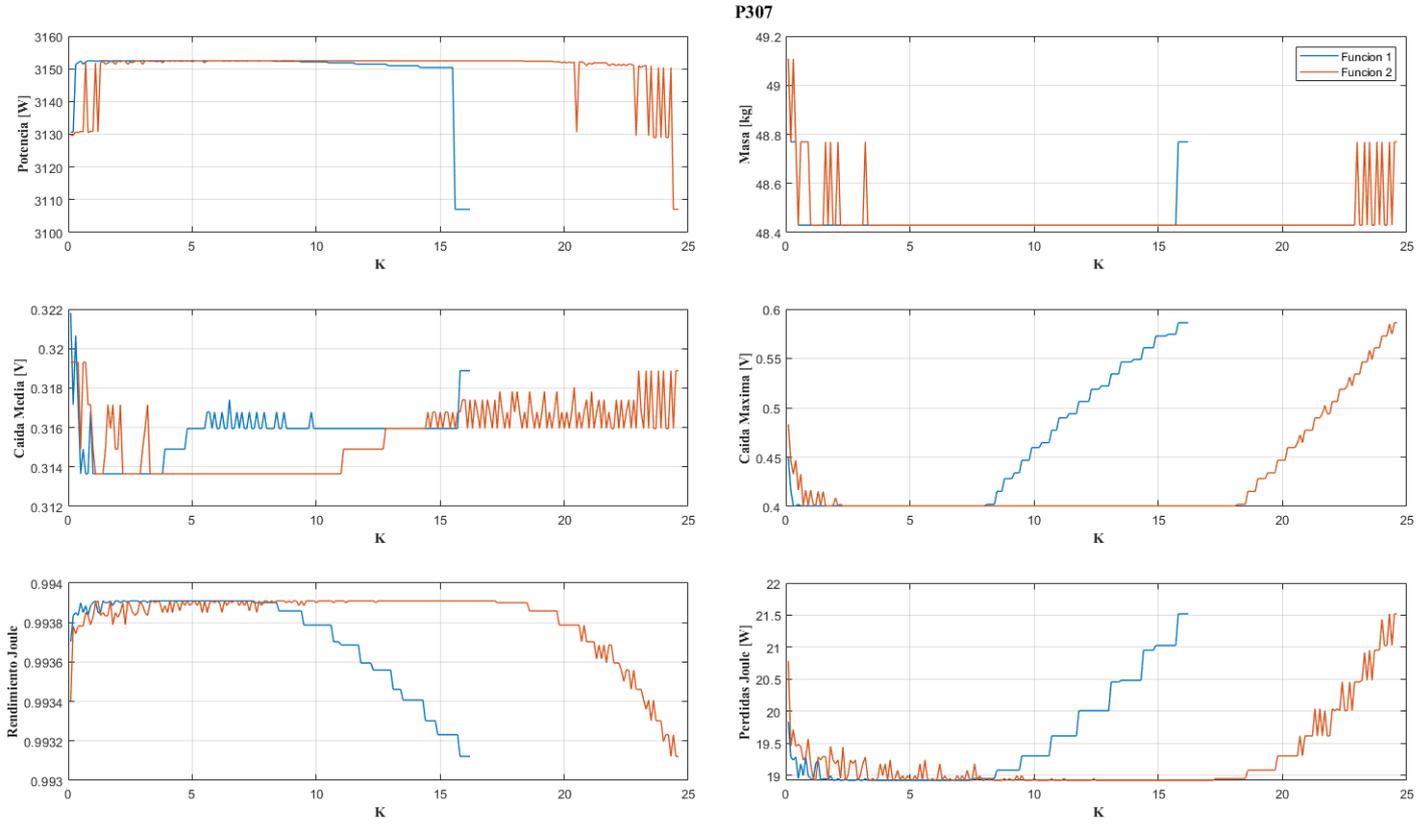


Figura 5.46: P307 - Parámetros optimizados g_1 y g_2 (FUENTE: Elaboración propia)

5.5.5. función g_3

La función g_3 tiene la siguiente forma:

$$\alpha X - Y = K \quad (5.17)$$

La familia de soluciones que proporciona esta función tiene la siguiente forma:

$$X_3(X, Y) = \frac{L_t + 3K}{1 + 3\alpha} \quad (5.18)$$

$$Y_3(X, Y) = \frac{\alpha L_t - K}{1 + 3\alpha} \quad (5.19)$$

Comparación entre paneles para $K = 1$

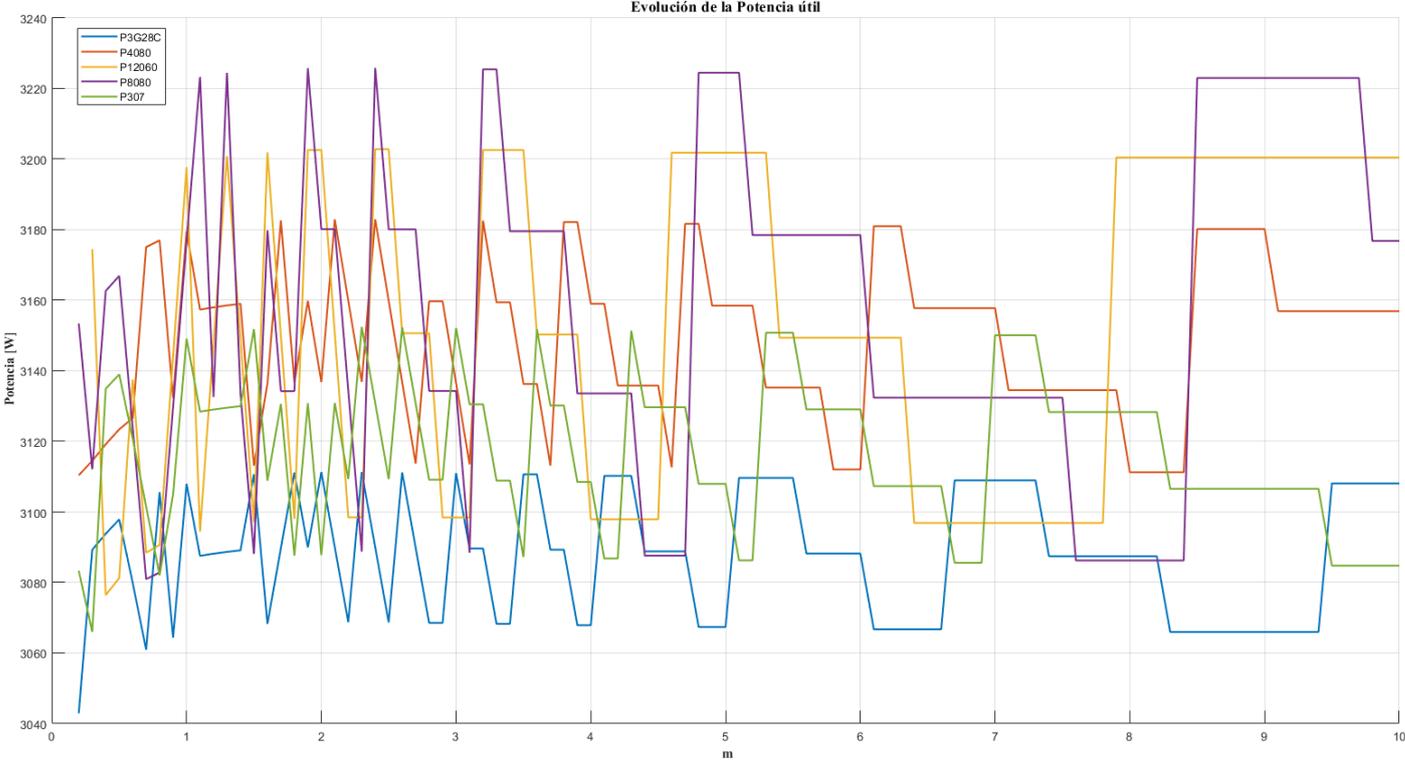


Figura 5.47: $K = 1$ - Comparativa Potencia, Función g_3 (FUENTE: Elaboración propia)

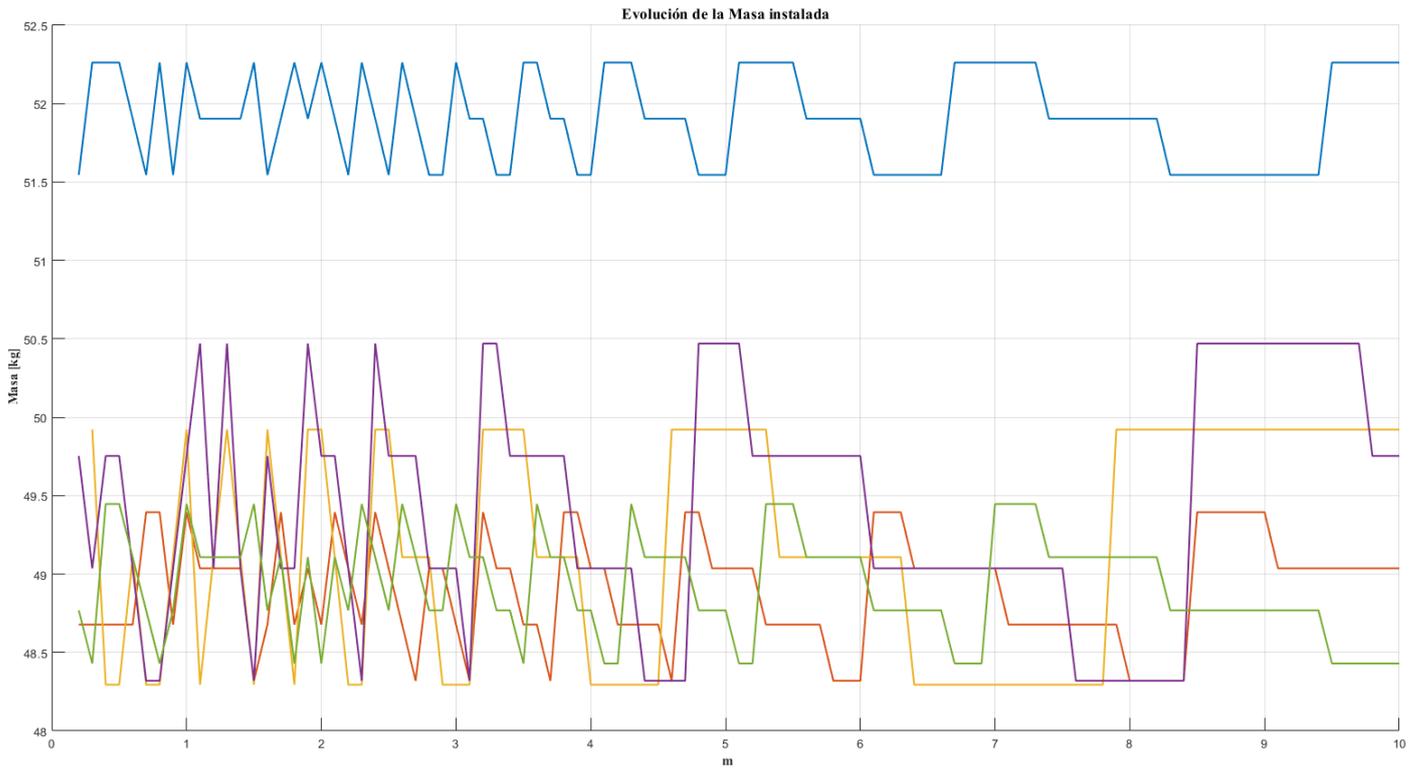


Figura 5.48: $K = 1$ - Comparativa Masa, Función g_3 (FUENTE: *Elaboración propia*)

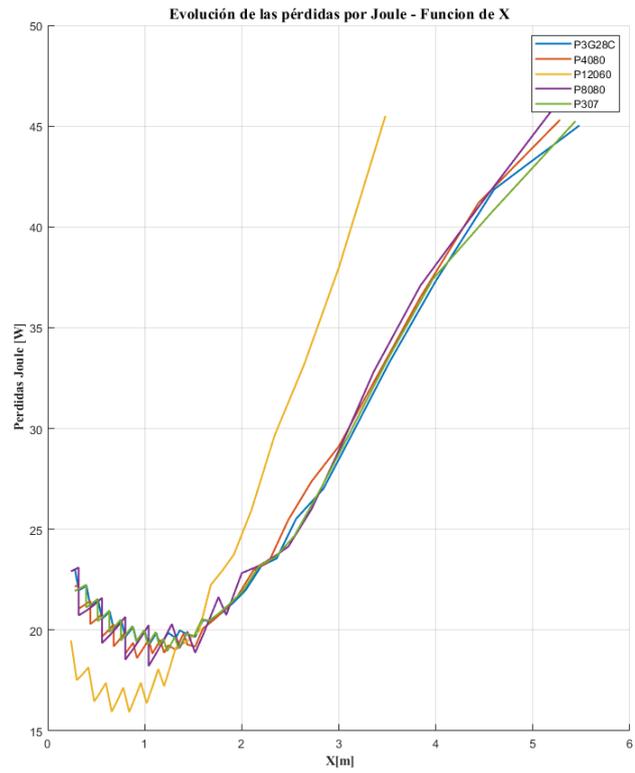
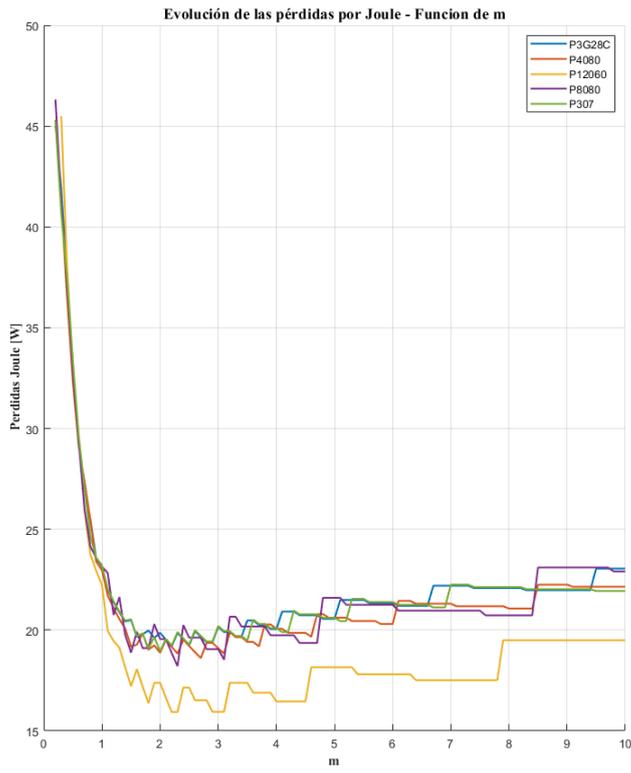


Figura 5.49: $K = 1$ - Comparativa Pérdidas por Joule, Función g_3 (FUENTE: *Elaboración propia*)

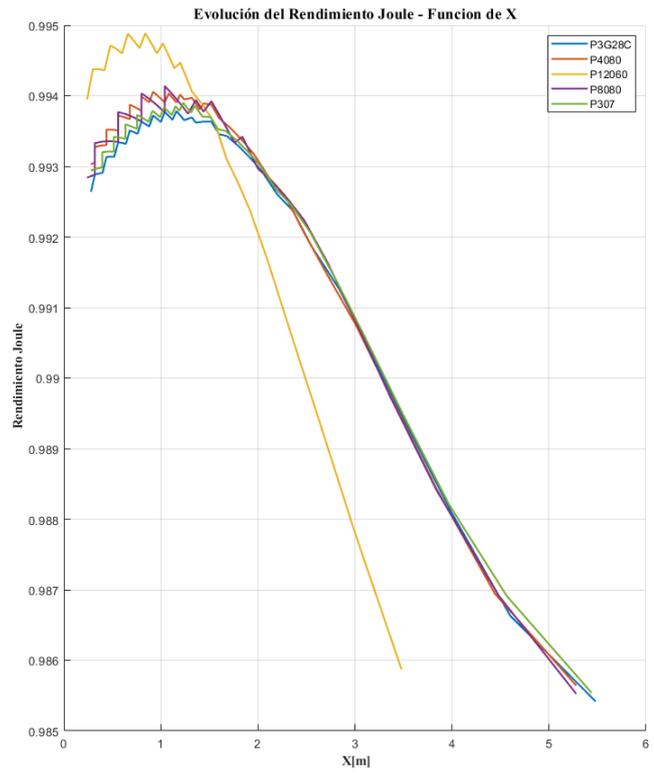
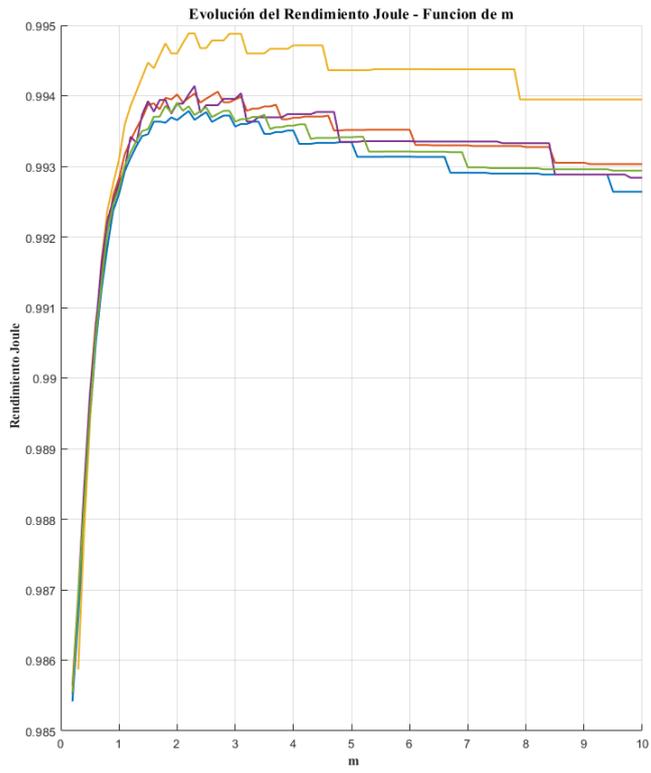


Figura 5.50: $K = 1$ - Comparativa Rendimiento Joule, Función g_3 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Comportamiento de los parámetros de funcionamiento en función de K

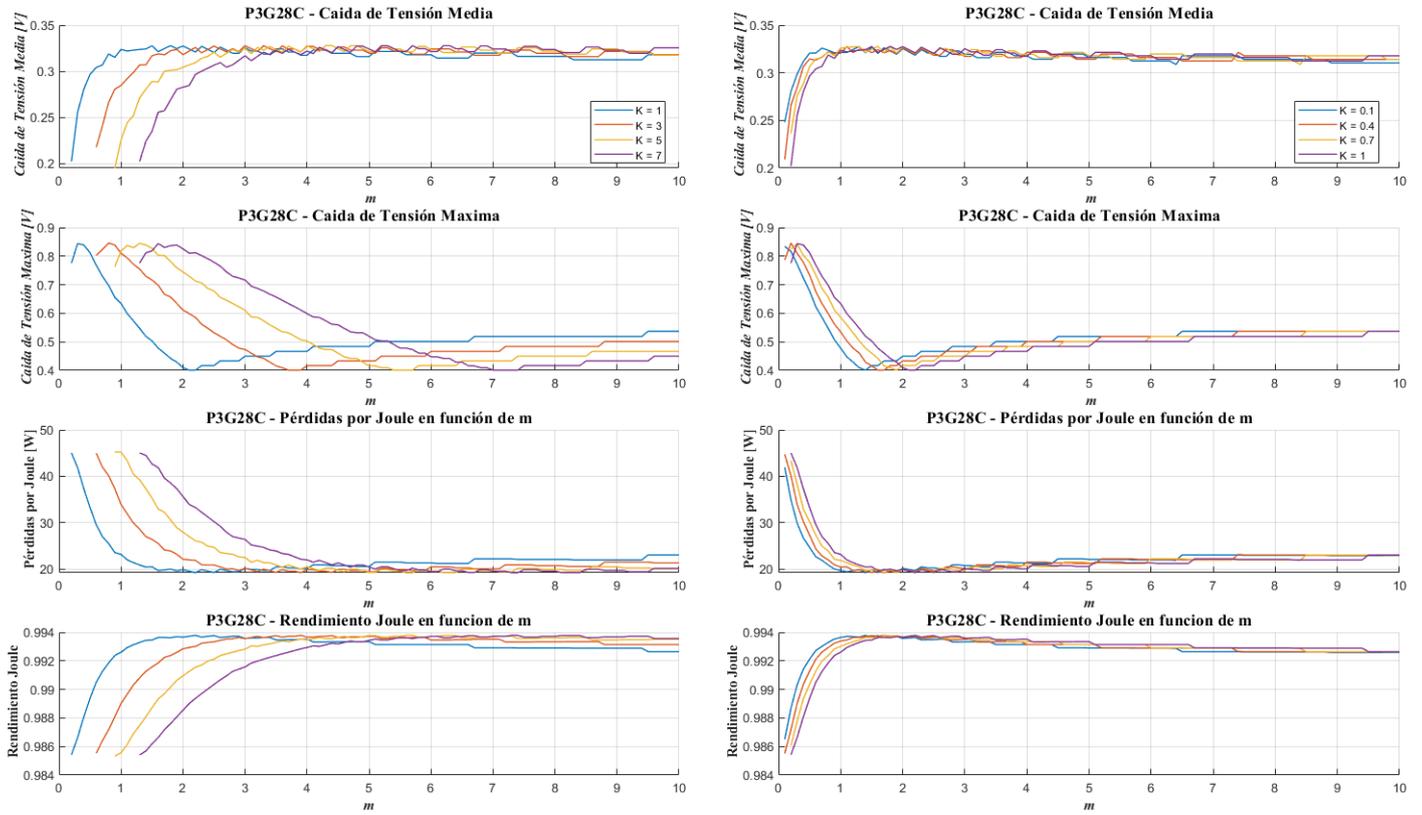


Figura 5.51: P3G28C - Parámetros en función K, Función g_3 (FUENTE: *Elaboración propia*)

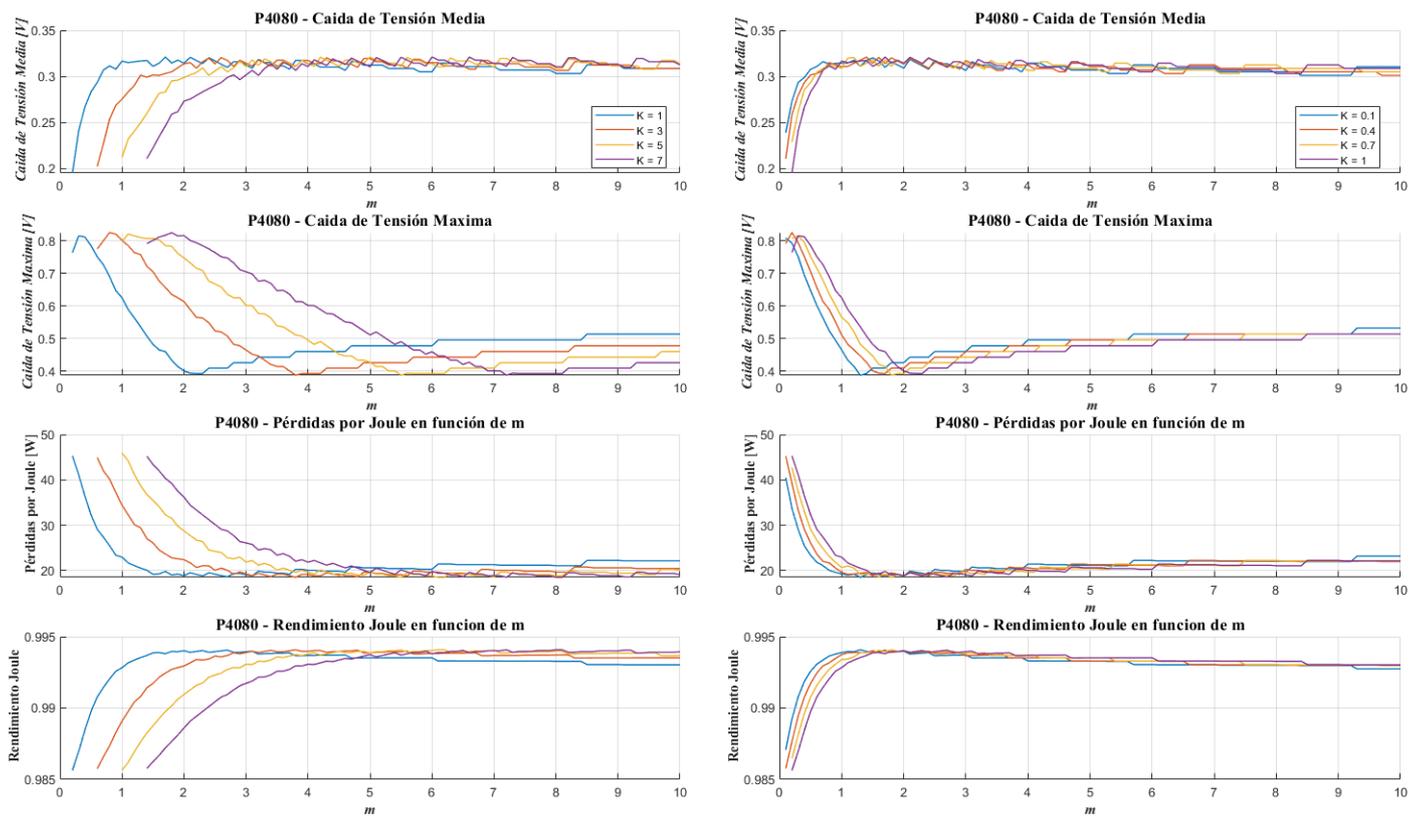


Figura 5.52: P4080 - Parámetros en función K, Función g_3 (FUENTE: Elaboración propia)

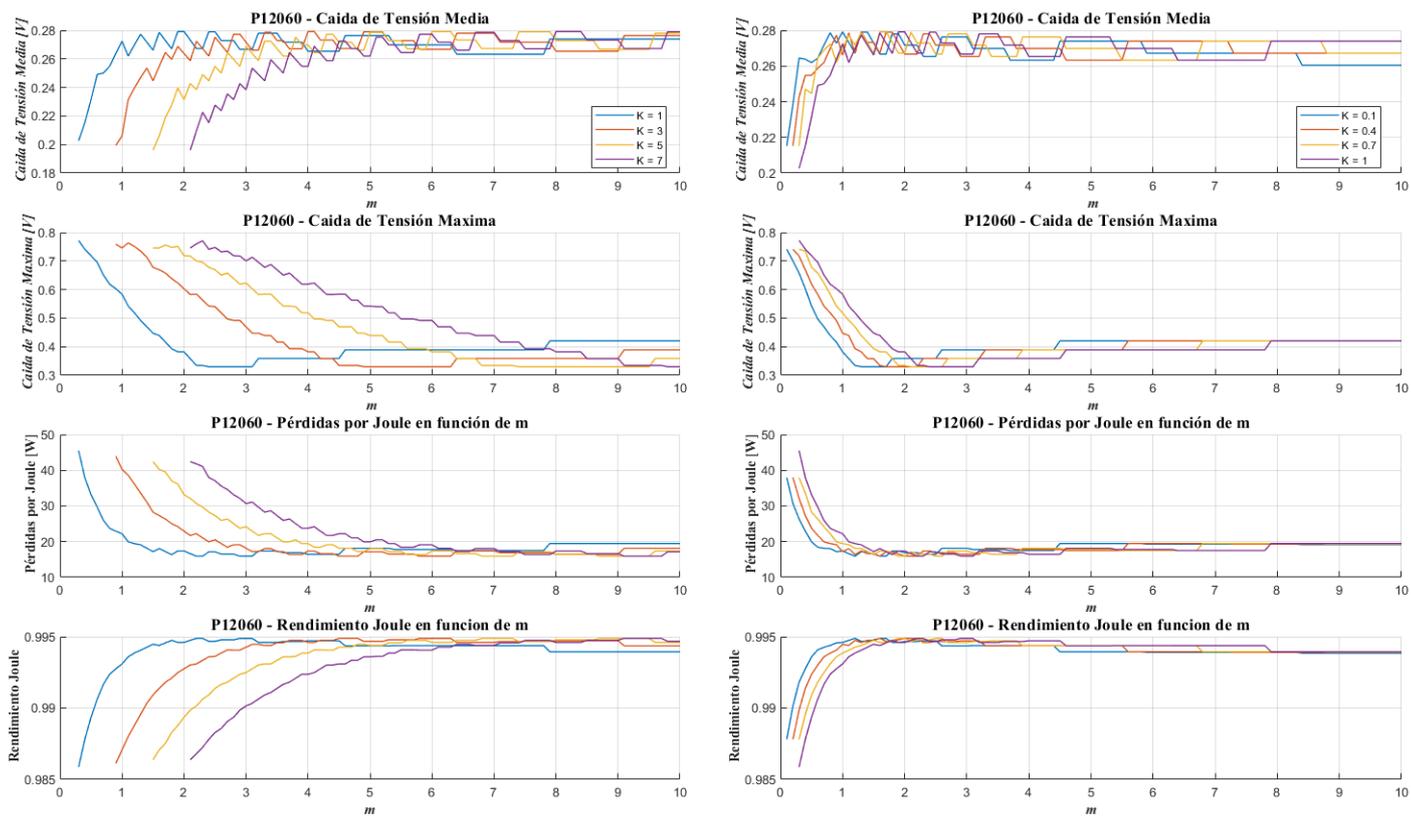


Figura 5.53: P12060 - Parámetros en función K, Función g_3 (FUENTE: Elaboración propia)

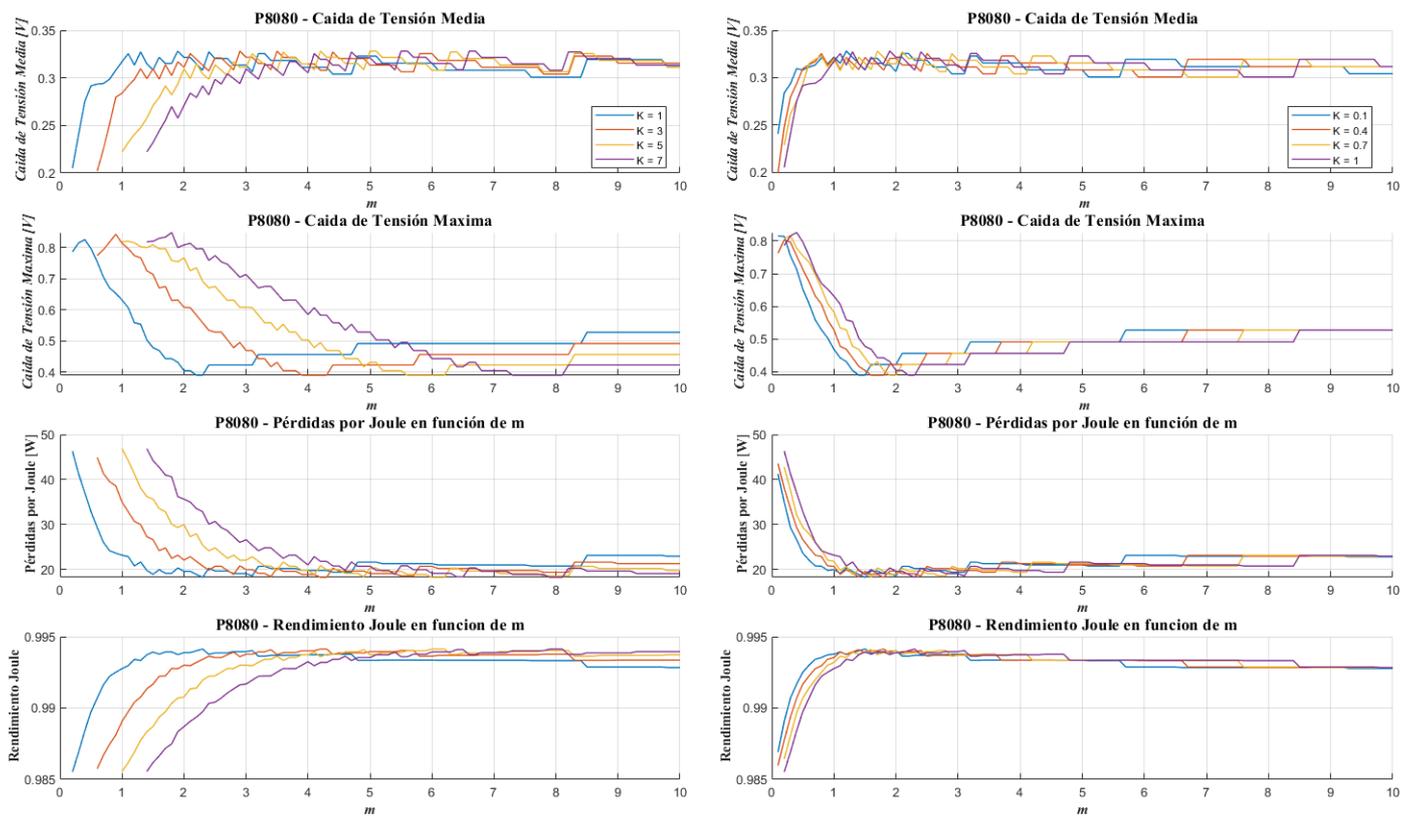


Figura 5.54: P8080 - Parámetros en función K, Función g_3 (FUENTE: Elaboración propia)

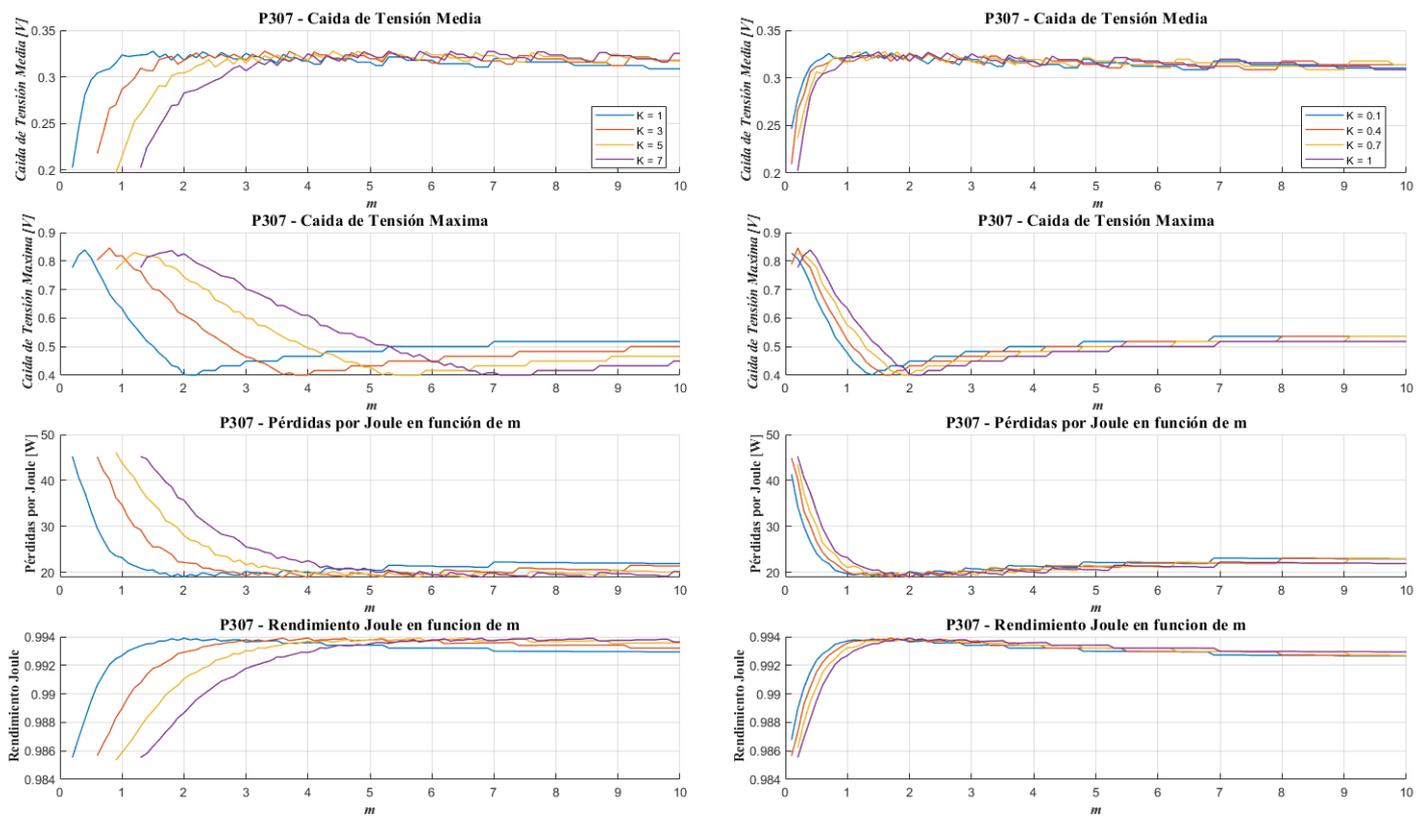


Figura 5.55: P307 - Parámetros en función K, Función g_3 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Optimización de la función

Aplicando el algoritmo obtenemos los siguiente valores:

	Valor	Validas		Mínima Masa		Maximo Rendimiento		Máxima Potencia	
		<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%
K_{P3G28C}	8.5	52	72.28	19	73.08	4	100.00	3	75.00
K_{P4080}	5.0	68	91.90	13	66.67	2	66.67	1	50
K_{P12060}	6.7	43	60.00	16	57.14	7	100	6	75
K_{P8080}	7.7	53	70.66	10	62.50	4	66.66	3	60
K_{P307}	4.7	71	95.95	17	100	2	66.66	1	50

Tabla 5.14: Valores óptimos del parámetro K para la función g_3 (*FUENTE: Elaboración propia*)

5.5.6. función g_4

La función g_4 tiene la siguiente forma:

$$\alpha X^2 - Y^2 = K \quad (5.20)$$

La familia de soluciones que proporciona esta función tiene la siguiente forma:

$$X_4(X, Y) = \frac{L_t - 3\sqrt{\alpha L_t^2 - K(1-9\alpha)}}{1-9\alpha} \quad (5.21)$$

$$Y_4(X, Y) = \frac{\sqrt{\alpha L_t^2 - K(1-9\alpha)} - 3\alpha L_t}{1-9\alpha} \quad (5.22)$$

Comparación entre paneles para $K = 1$

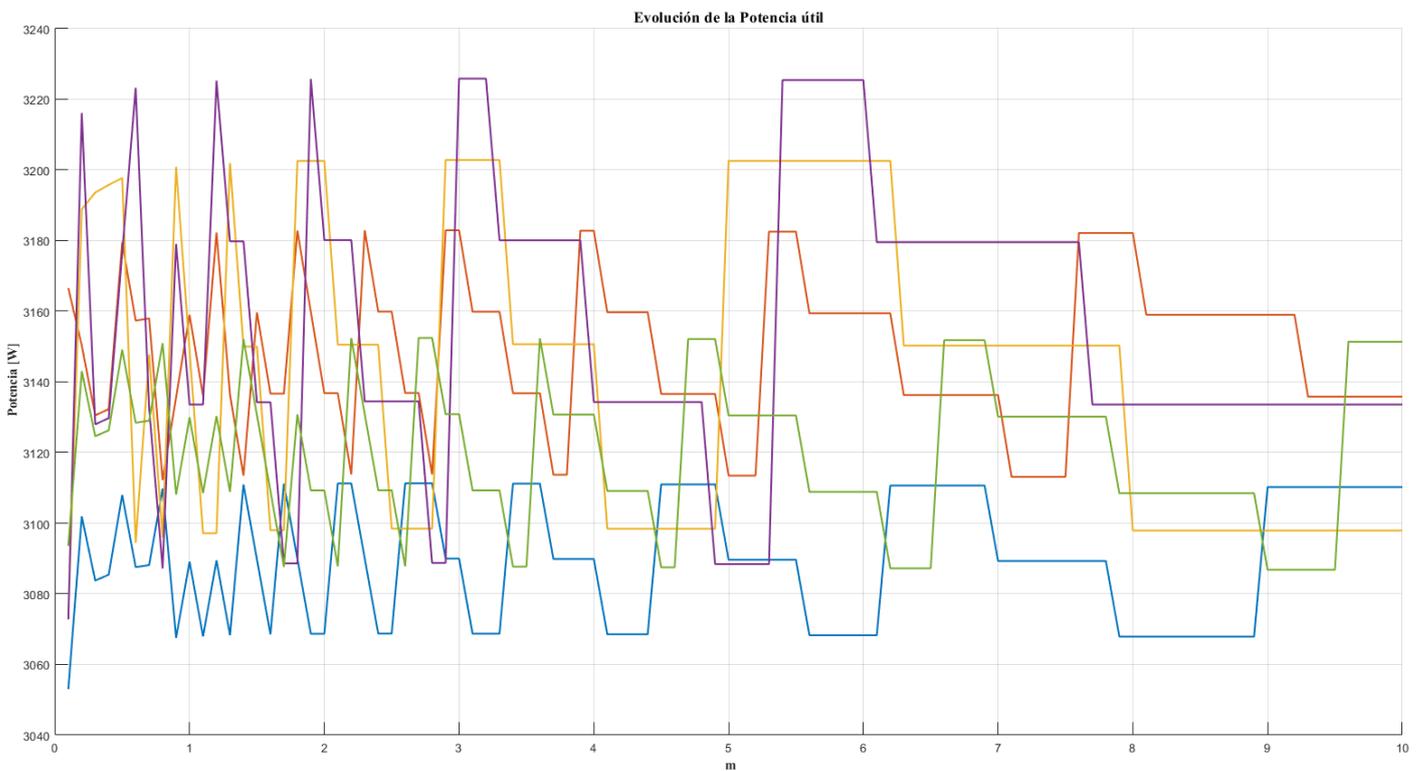


Figura 5.56: $K = 1$ - Comparativa Potencia, Función g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

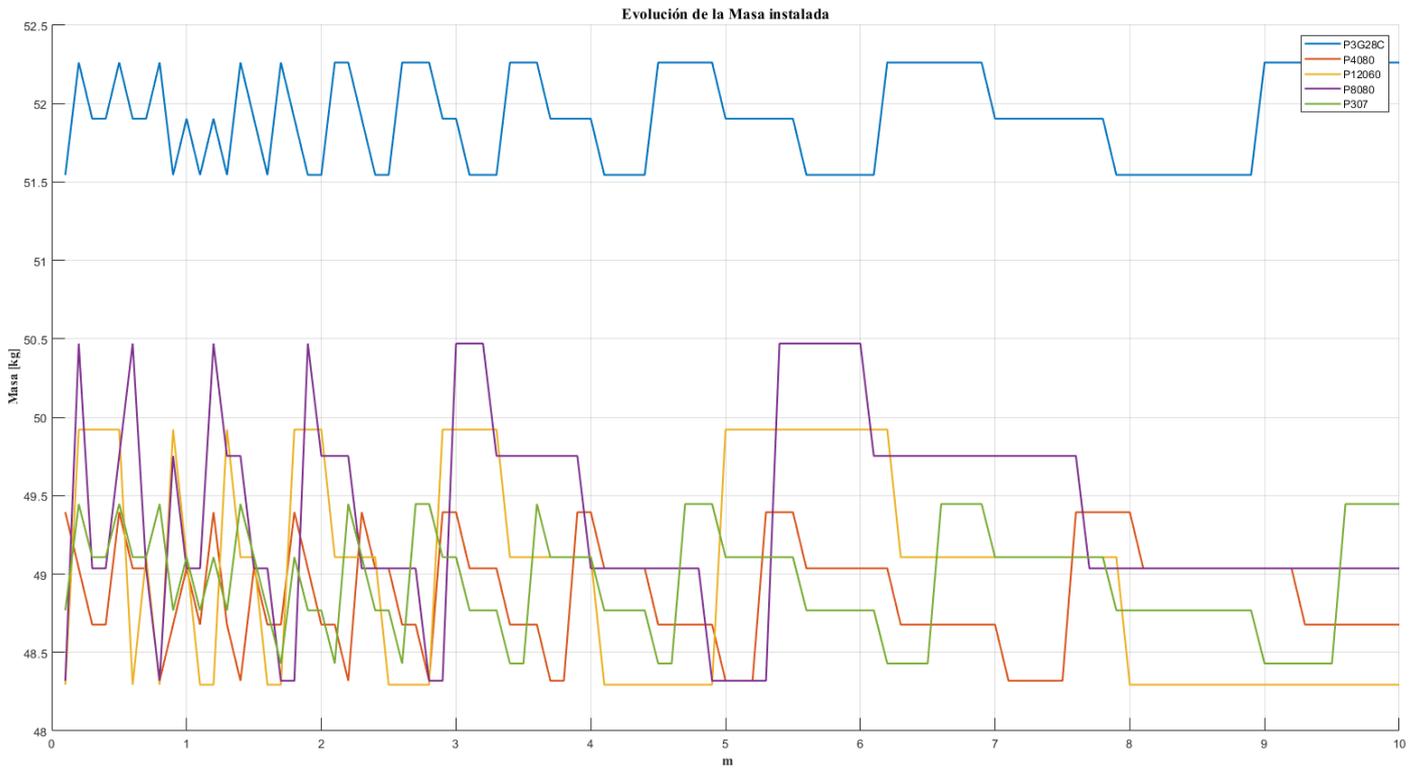


Figura 5.57: $K = 1$ - Comparativa Masa, Función g_4 (FUENTE: *Elaboración propia*)

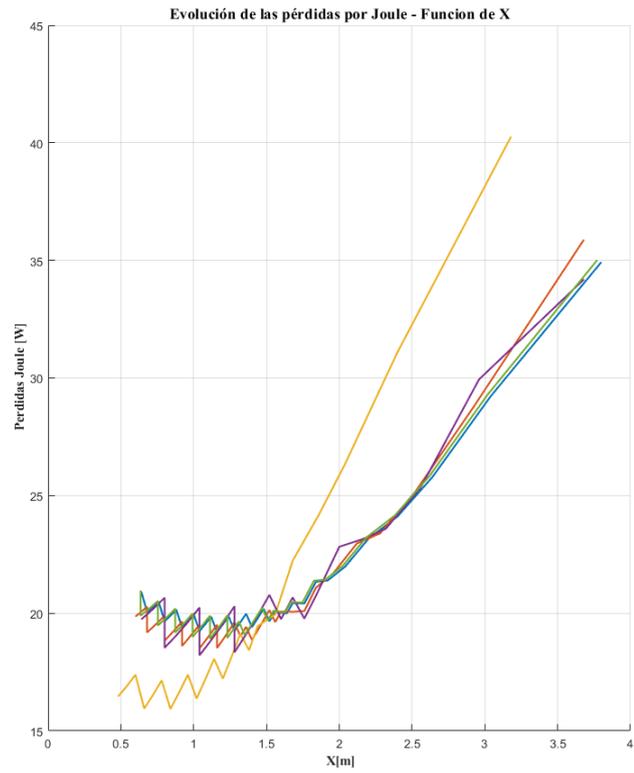
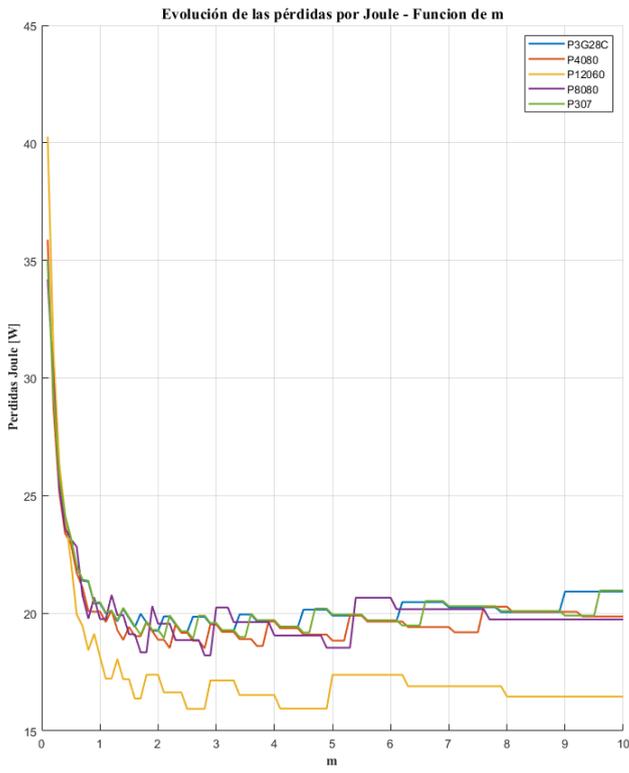


Figura 5.58: $K = 1$ - Comparativa Pérdidas por Joule, Función g_4 (FUENTE: *Elaboración propia*)

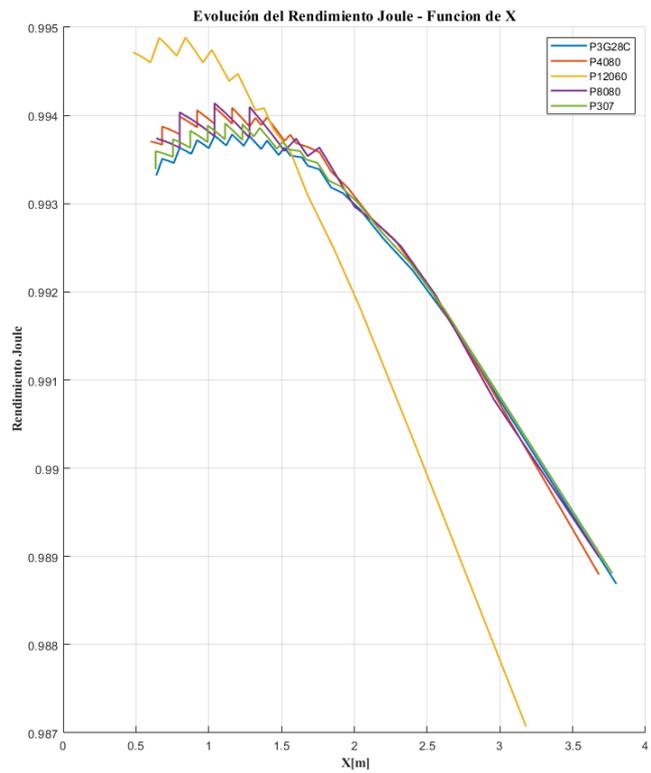
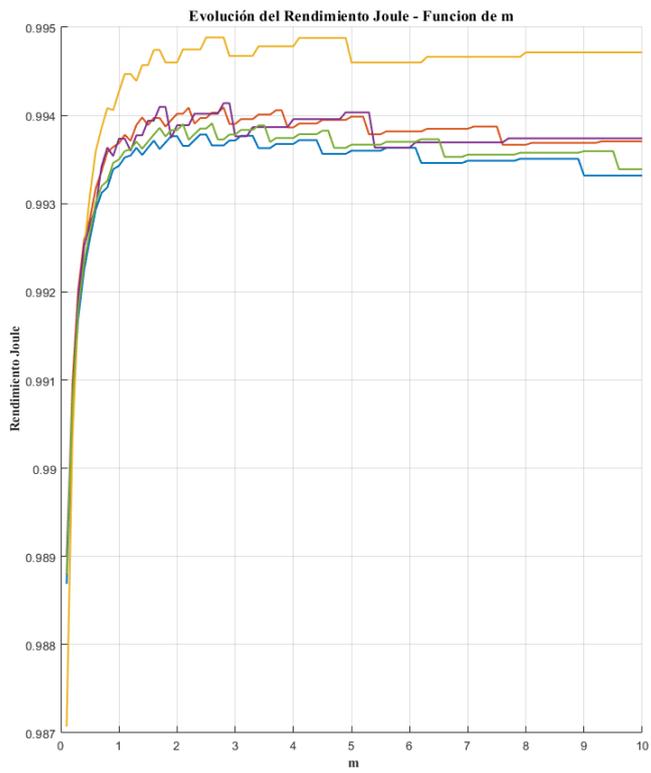


Figura 5.59: $K = 1$ - Comparativa Rendimiento Joule, Función g_4 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Comportamiento de los parámetros de funcionamiento en función de K

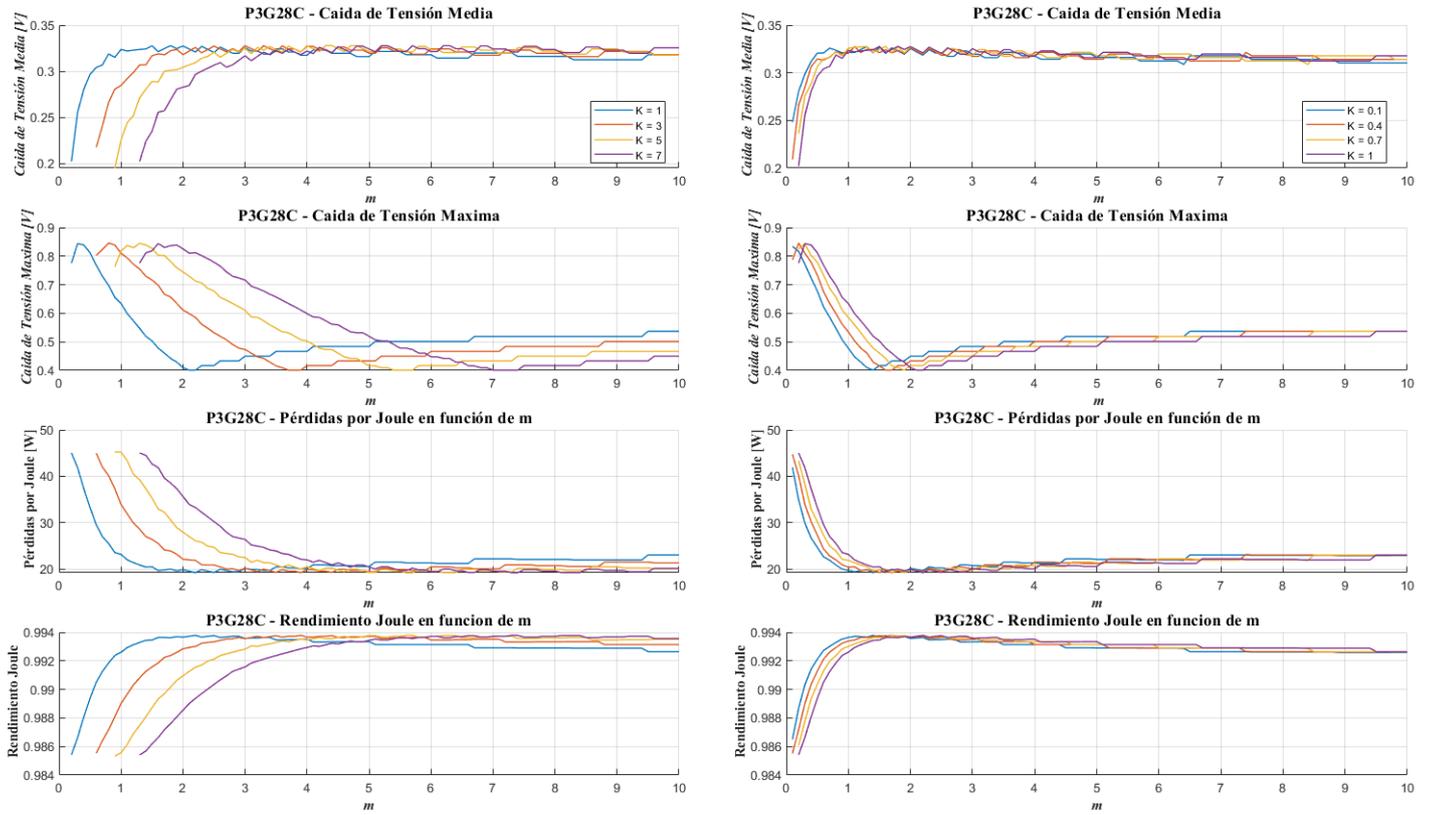


Figura 5.60: P3G28C - Parámetros en función K, Función g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

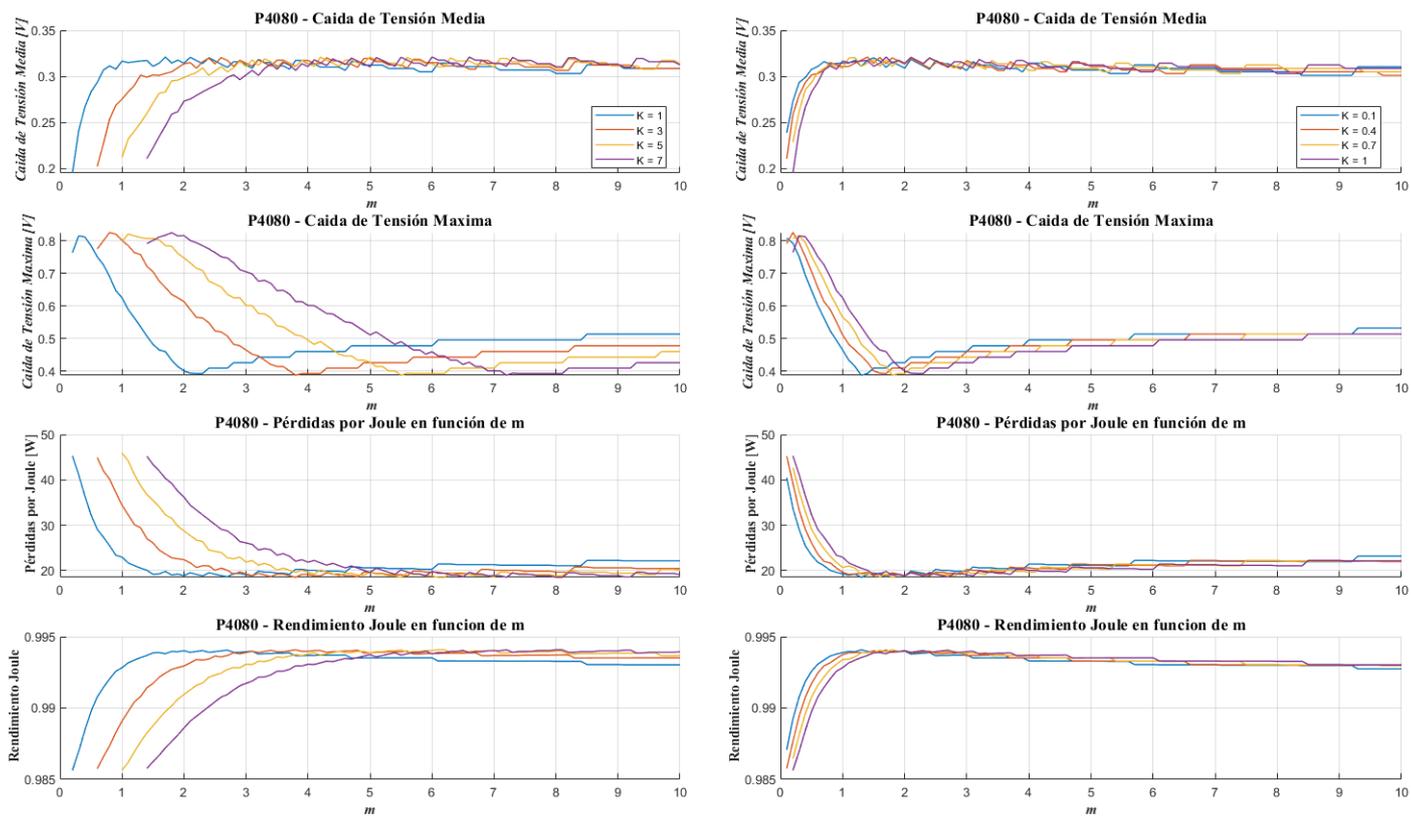


Figura 5.61: P4080 - Parámetros en función K, Función g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

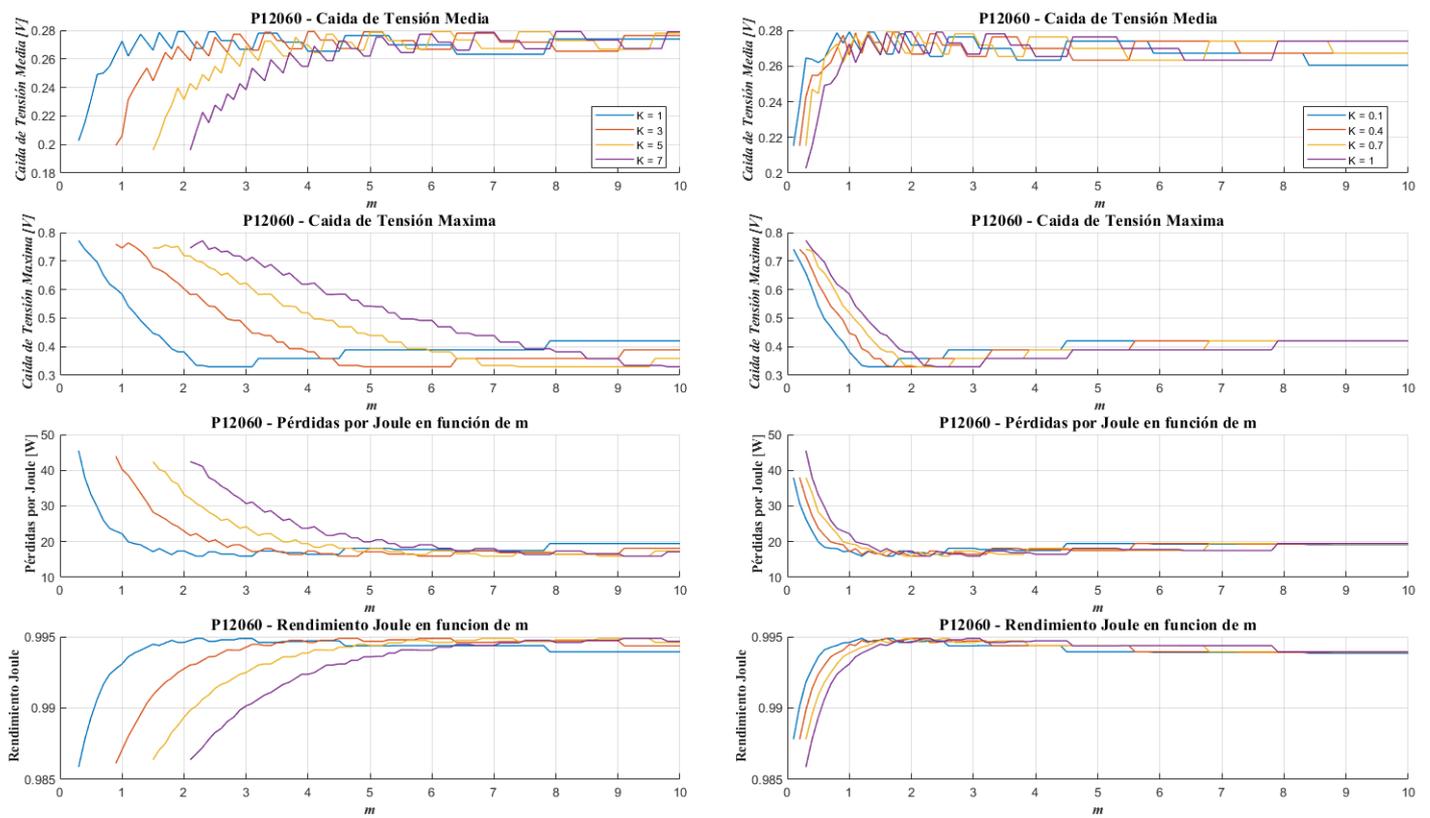


Figura 5.62: P12060 - Parámetros en función K, Función g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

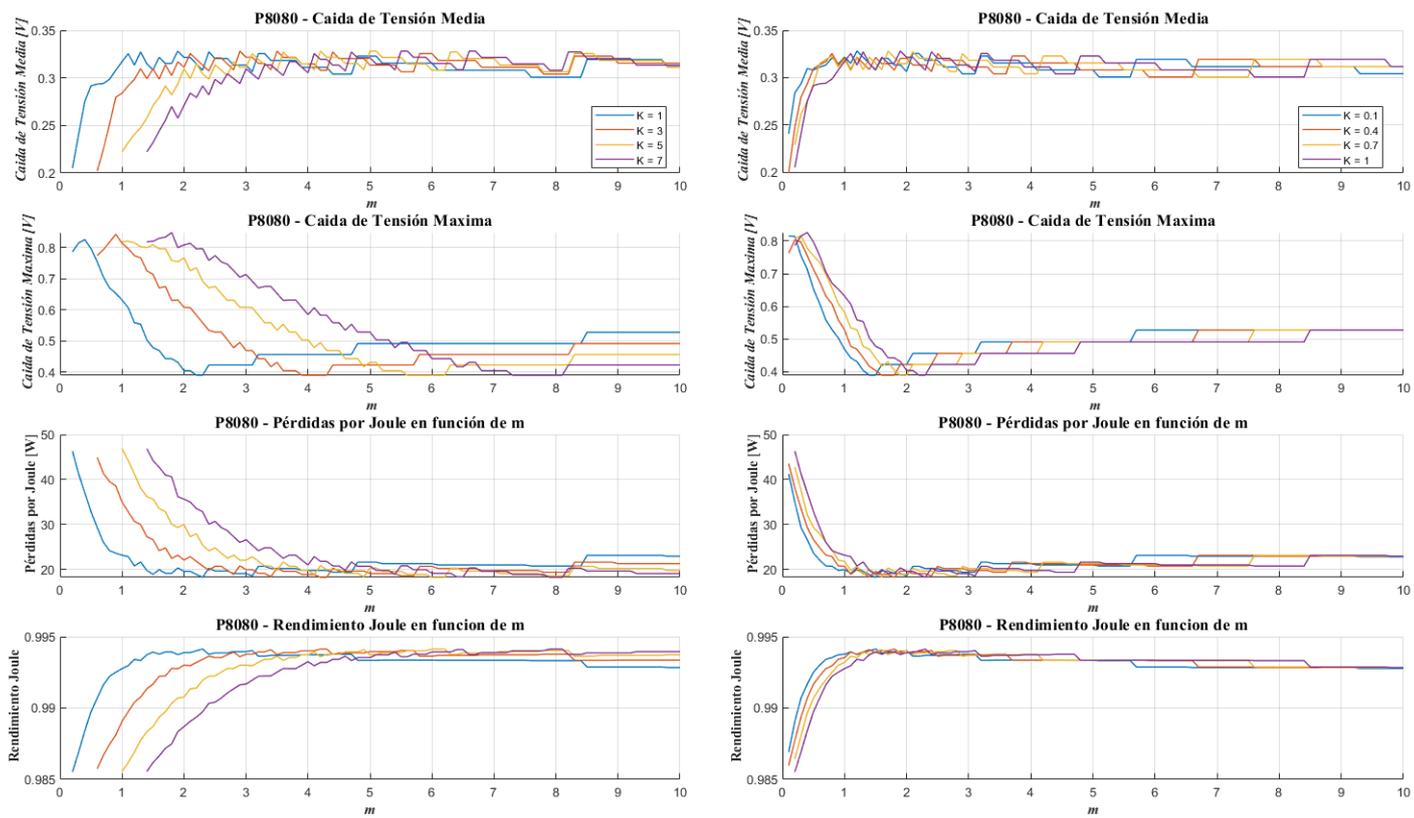


Figura 5.63: P8080 - Parámetros en función K , Función g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

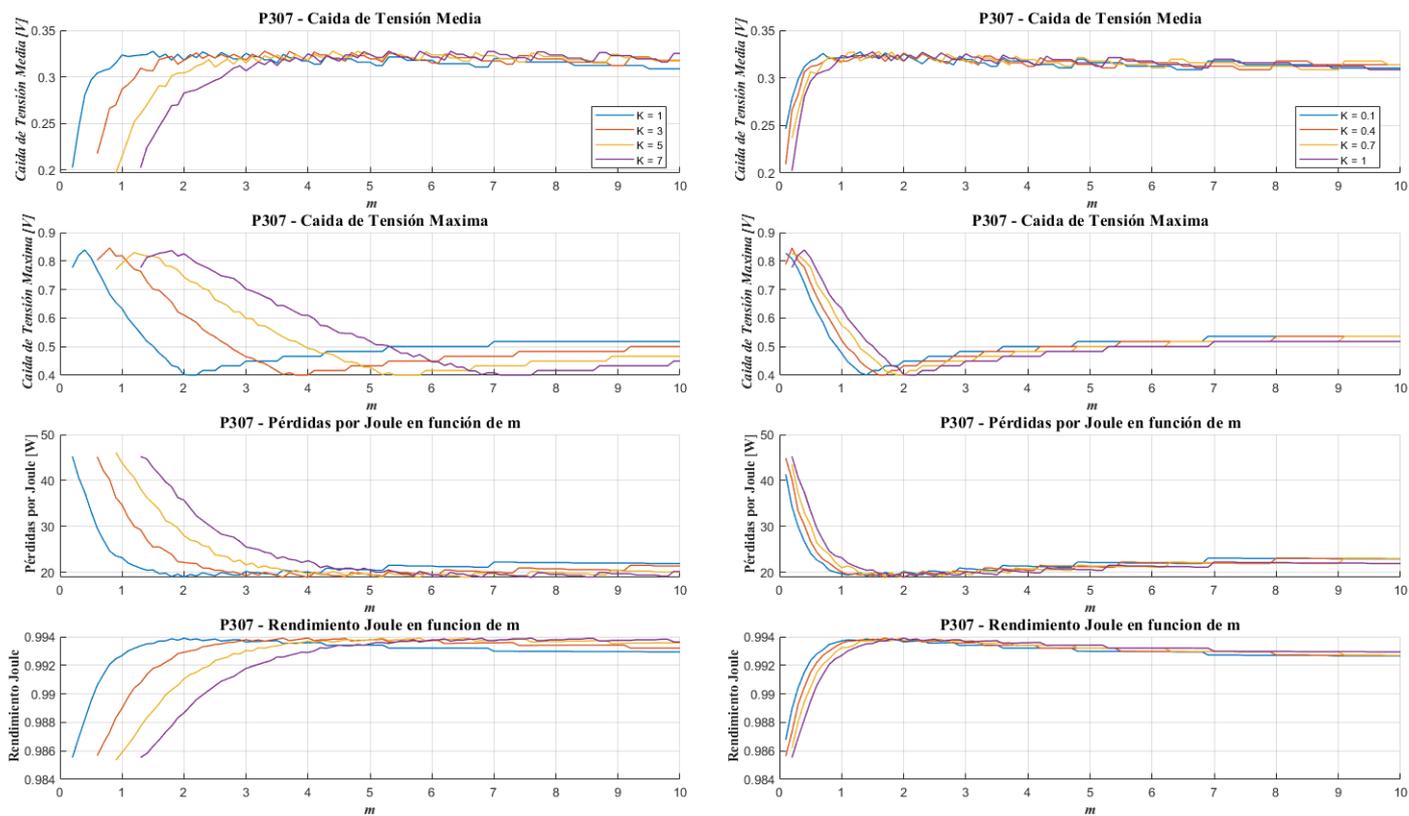


Figura 5.64: P307 - Parámetros en función K, Función g_4 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Optimización de la función

Aplicando el algoritmo obtenemos los siguiente valores:

	Valor	Validas		Mínima Masa		Maximo Rendimiento		Máxima Potencia	
		N	%	N	%	N	%	N	%
K_{P3G28C}	9.5	73	76.04	26	70.27	7	100	7	87.5
K_{P4080}	8.3	74	77.08	15	68.20	4	66.66	3	75
K_{P12060}	5.7	63	66.32	26	66.66	14	100	10	66.66
K_{P8080}	8.1	74	77.08	16	66.66	8	72.73	5	62.50
K_{P307}	9.2	74	77.08	14	70.00	4	66.66	3	75

Tabla 5.15: Valores óptimos del parámetro K para la función g_4 (*FUENTE: Elaboración propia*)

5.5.7. Comparativa Funciones g_3 y g_4

Comparación entre funciones para $K = 1$

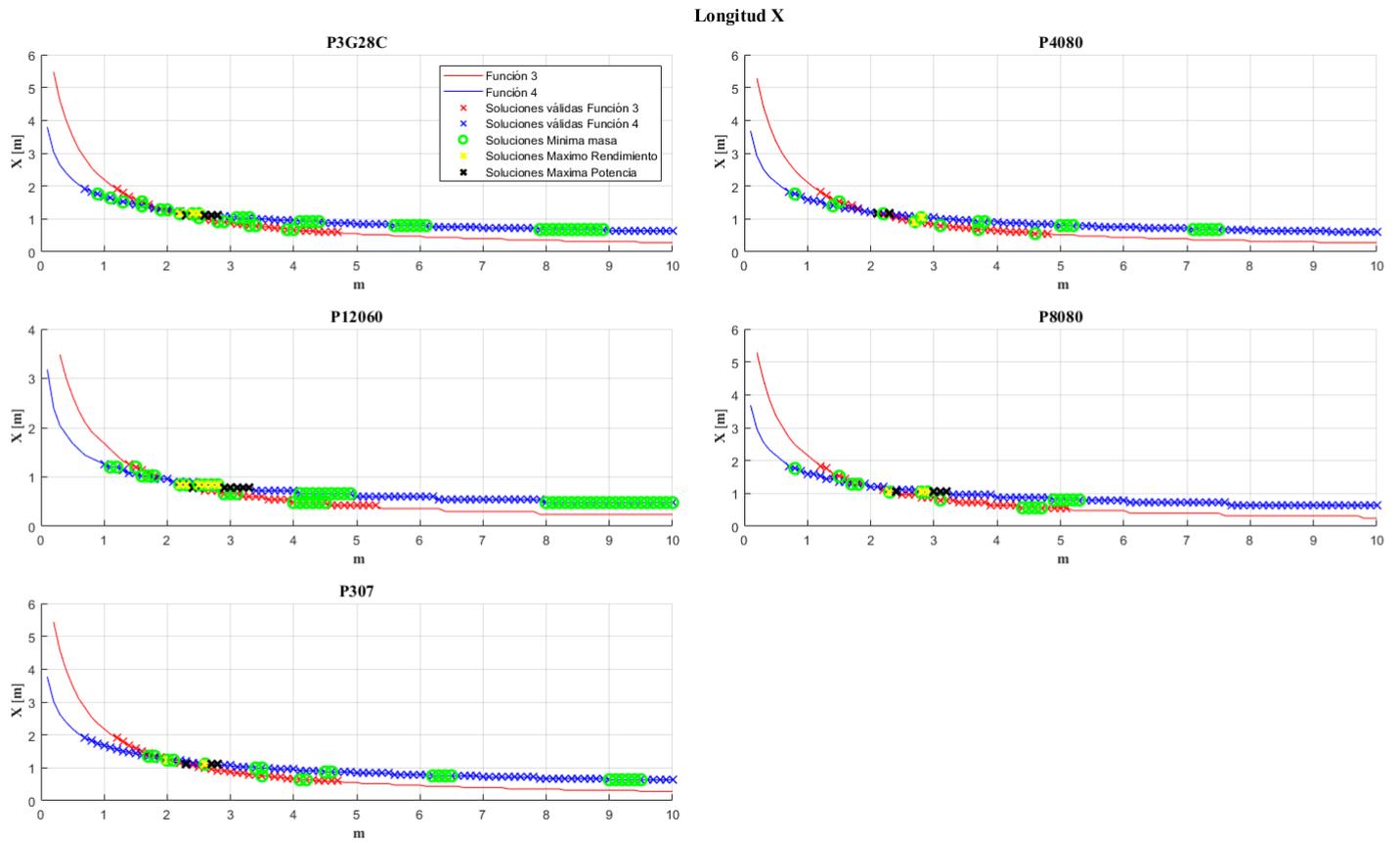


Figura 5.65: $K = 1$ - Distribución de X , g_3 y g_4 (FUENTE: *Elaboración propia*)

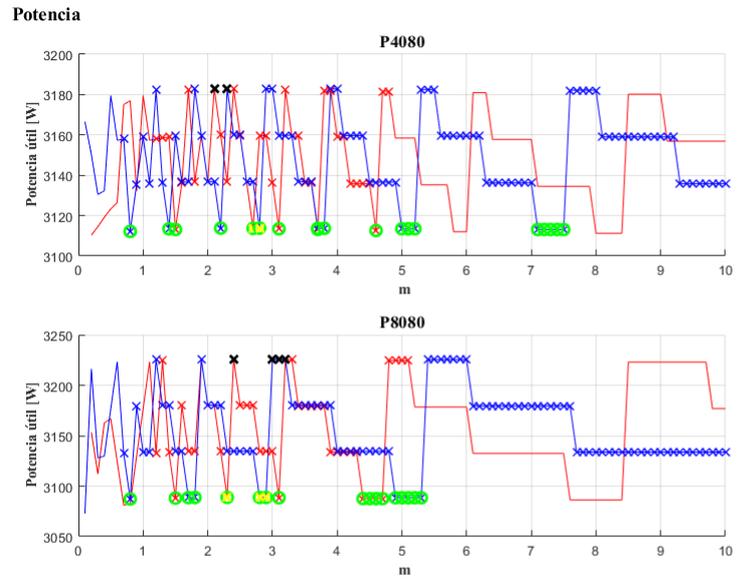
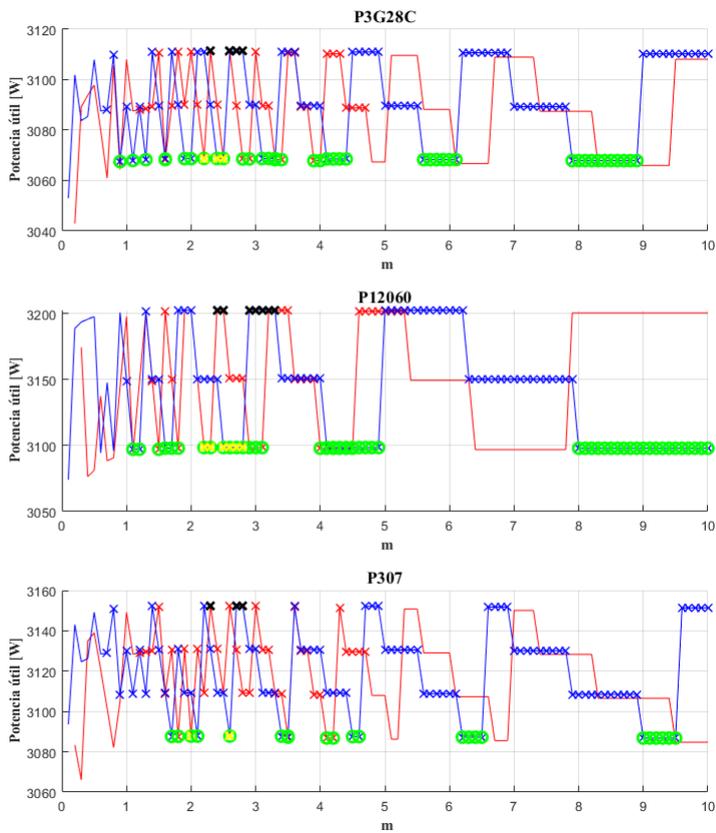


Figura 5.66: $K = 1$ - Potencia, g_3 y g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

Pérdidas por Joule en función de m

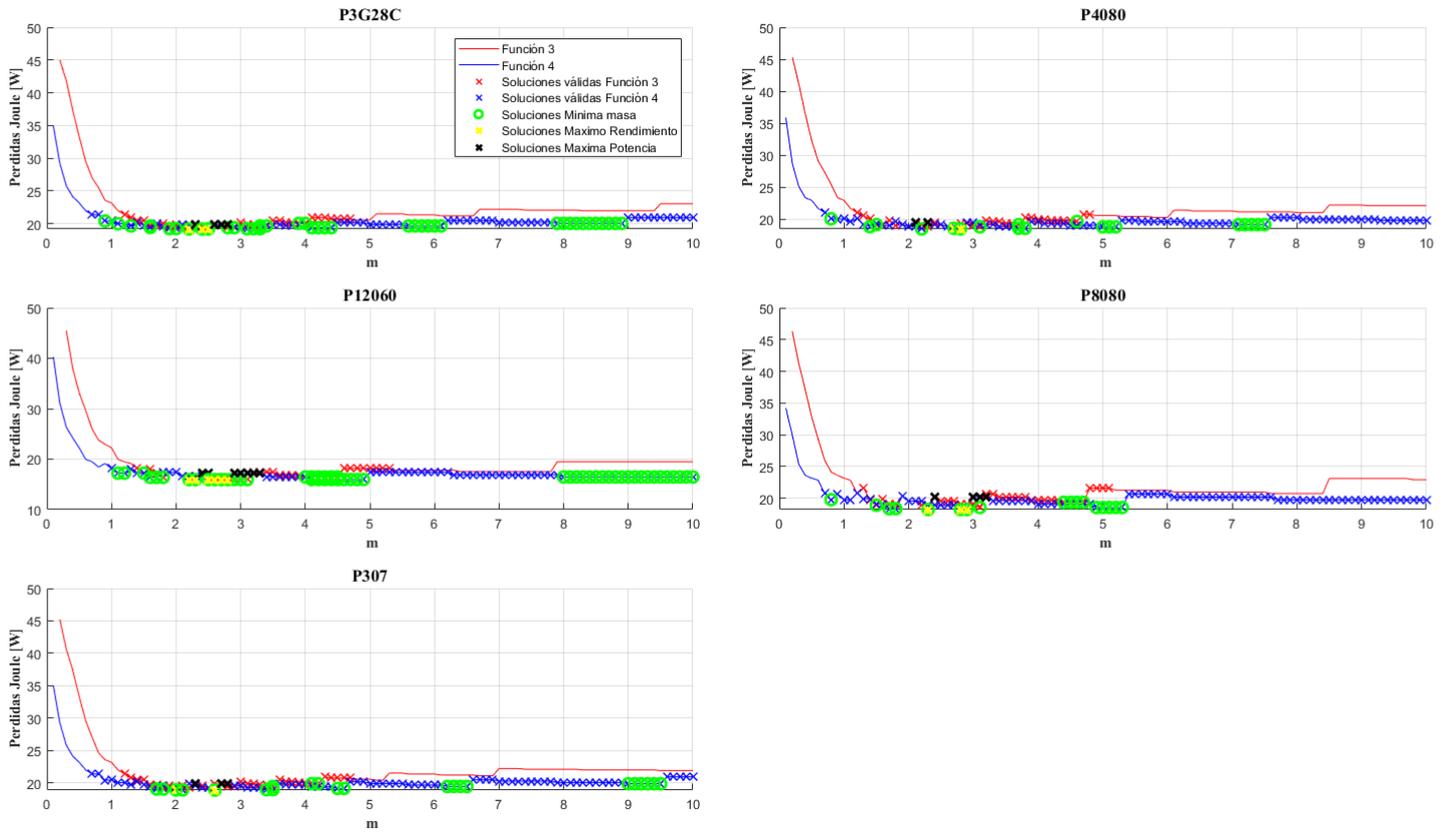


Figura 5.67: $K = 1$ - Pérdidas Joule en función de m , g_3 y g_4 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Pérdidas por Joule en función de X

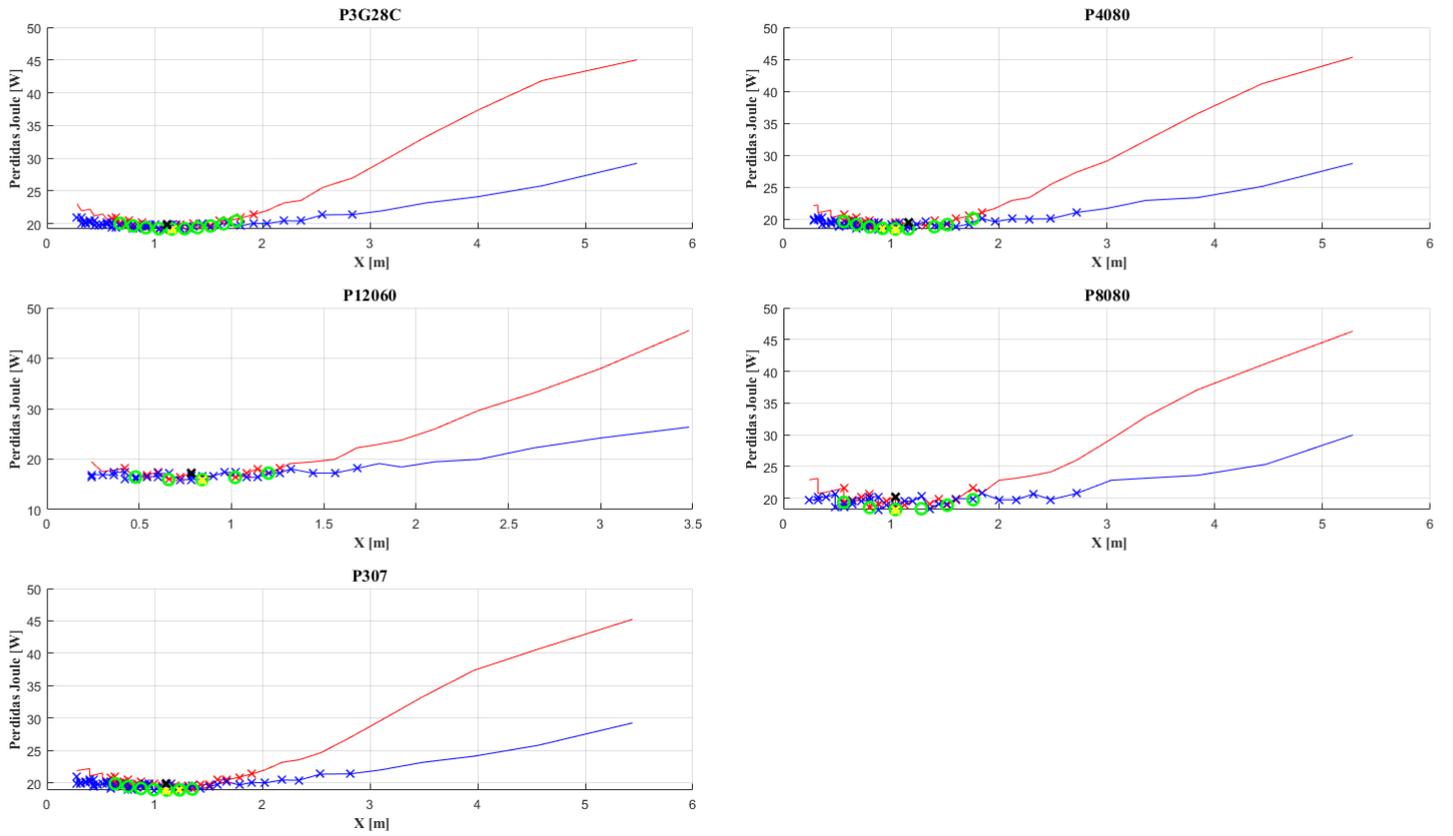


Figura 5.68: $K = 1$ - Pérdidas Joule en función de X, g_3 y g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

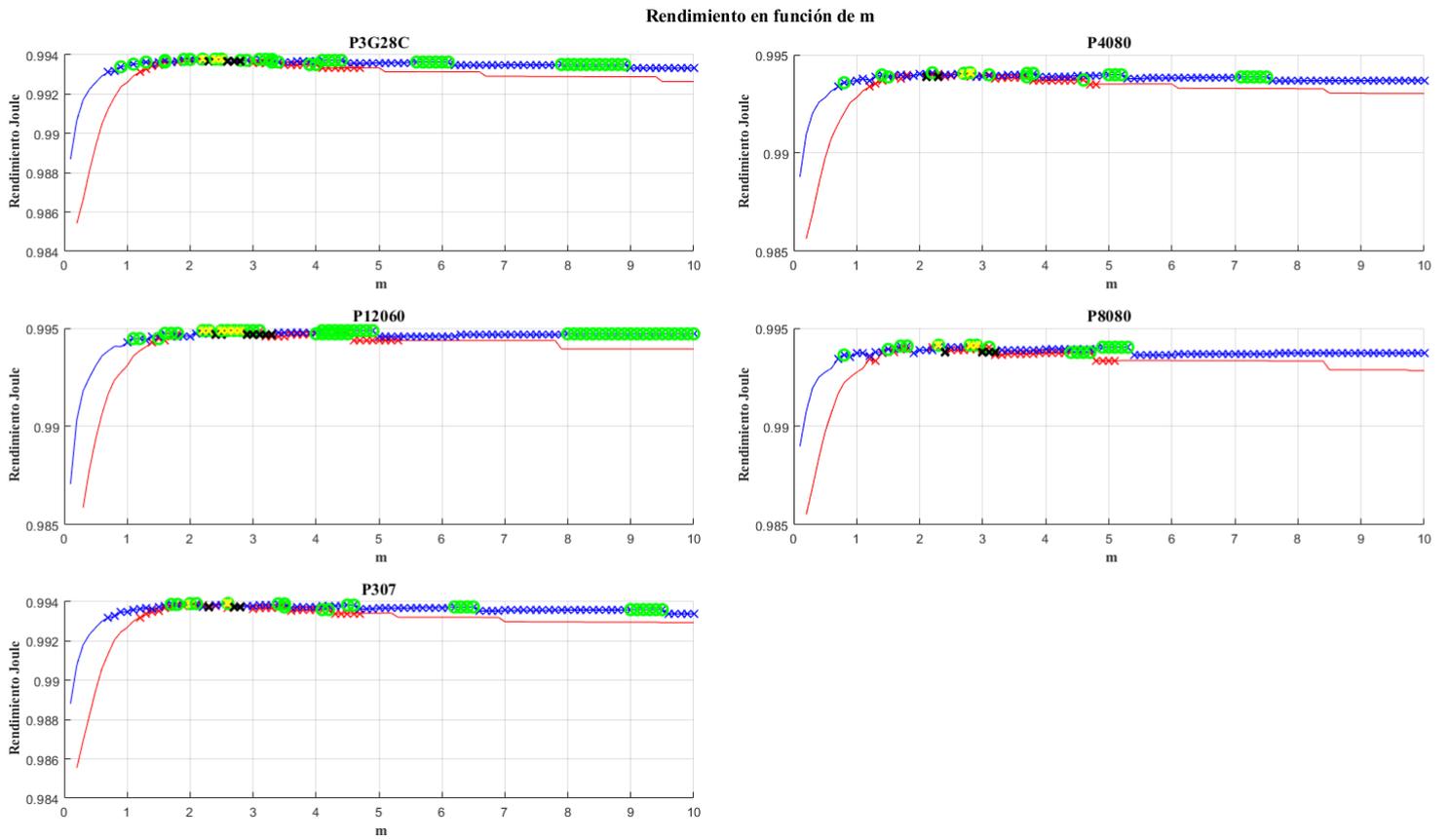


Figura 5.69: $K = 1$ - Rendimiento en función de m , g_3 y g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

Rendimiento en función de X

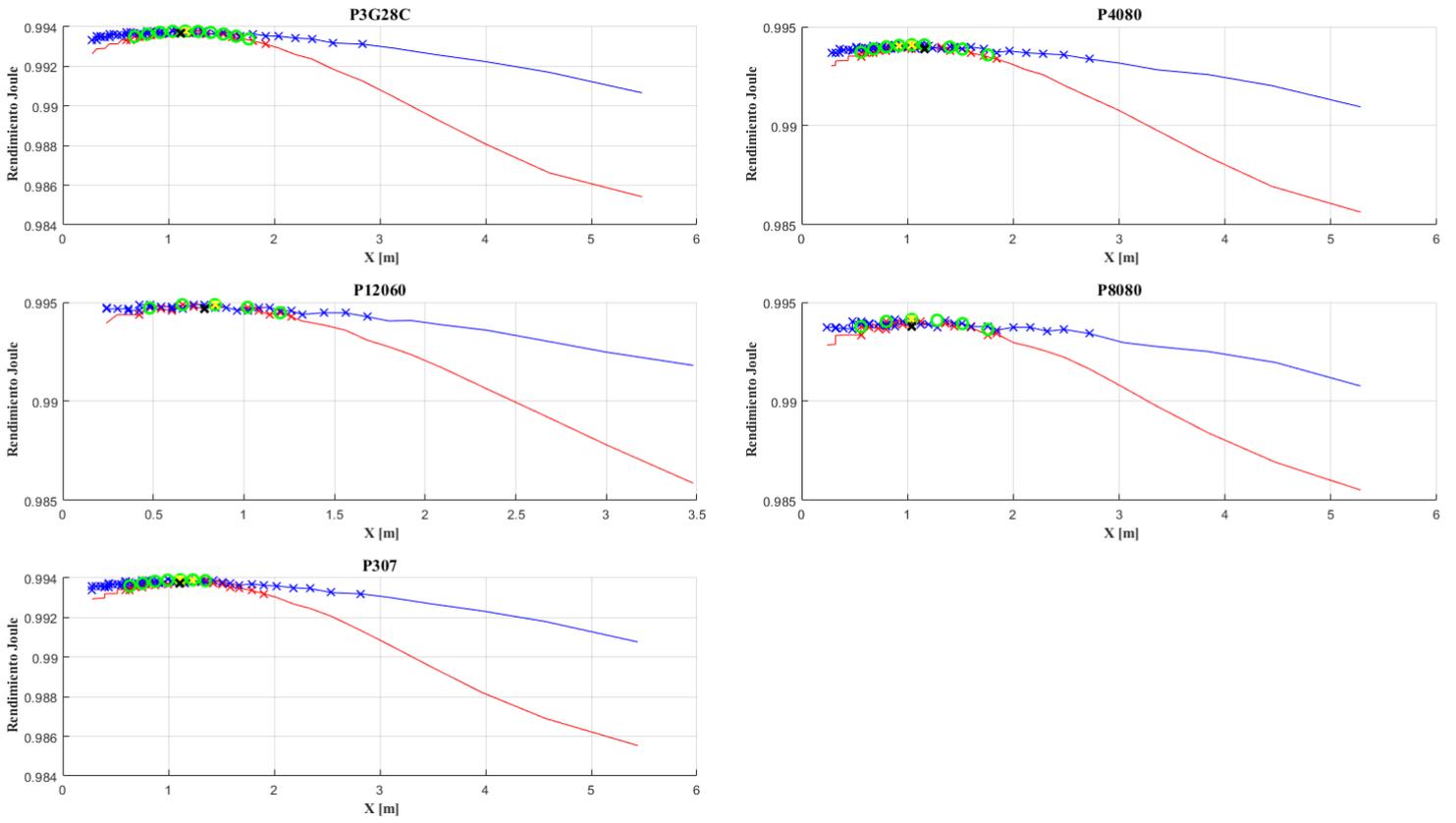


Figura 5.70: $K = 1$ - Rendimiento en función de m , g_3 y g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

Número de soluciones en función de K

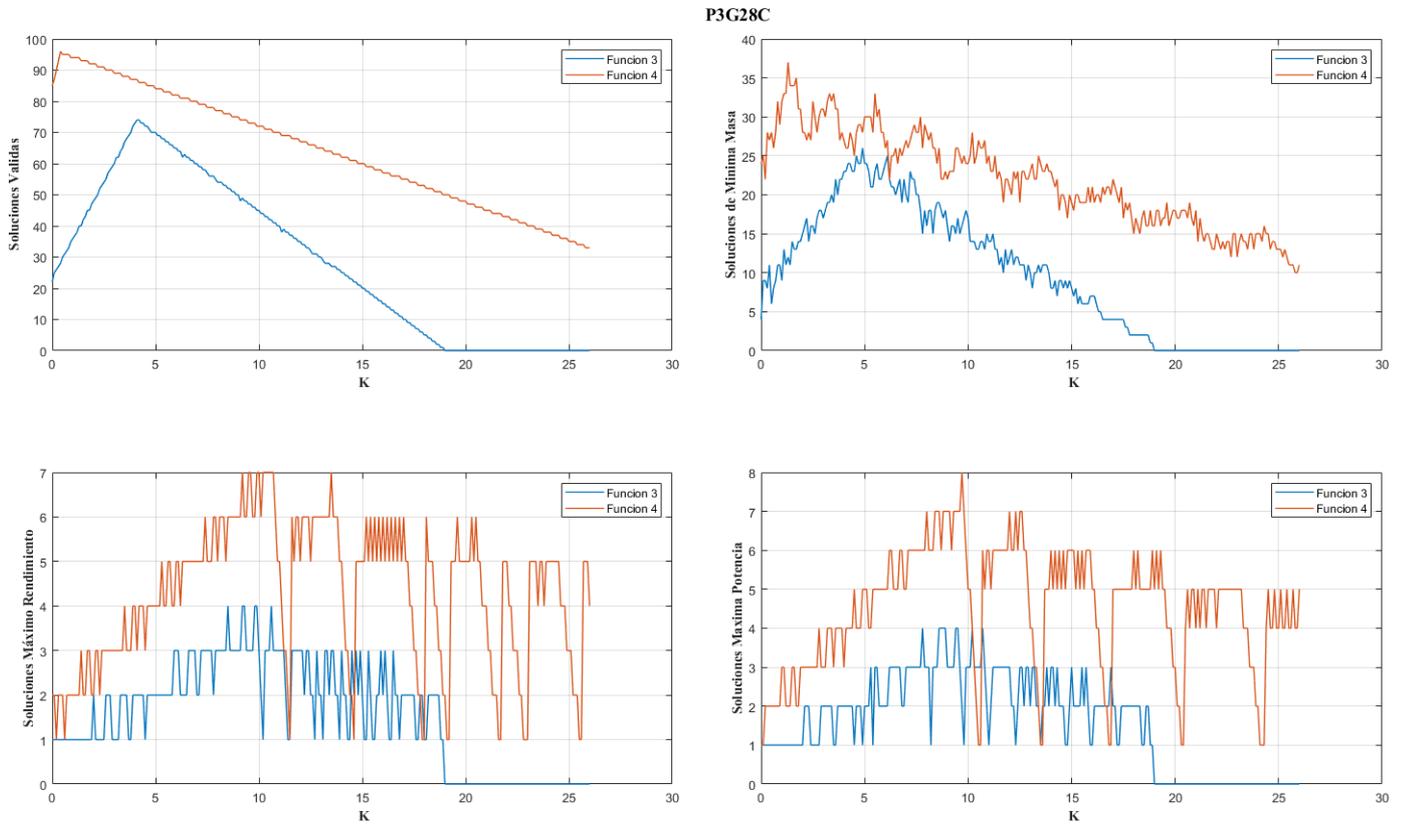
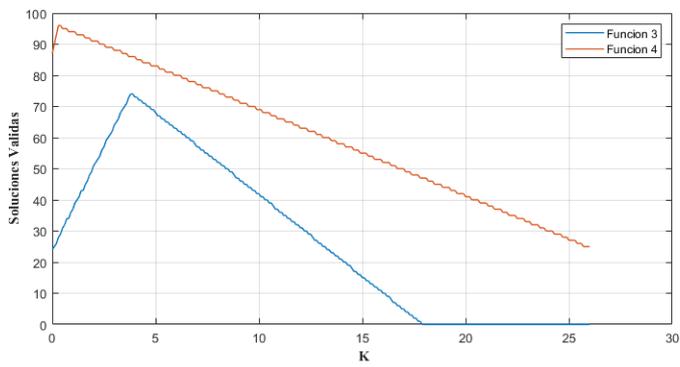


Figura 5.71: P3G28C - Número de soluciones g_3 y g_4 (FUENTE: Elaboración propia)



P4080

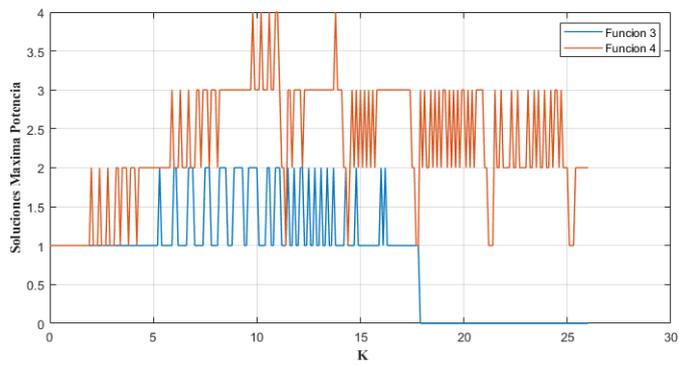
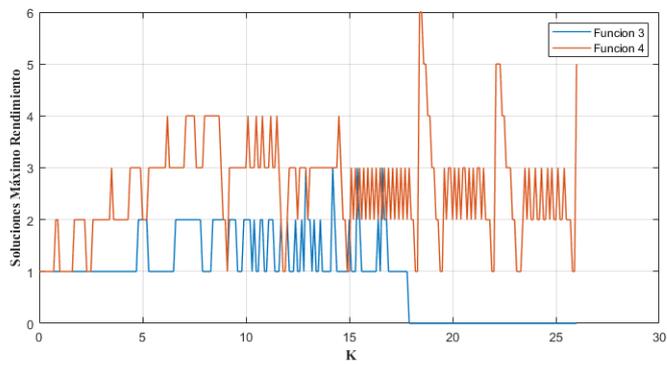
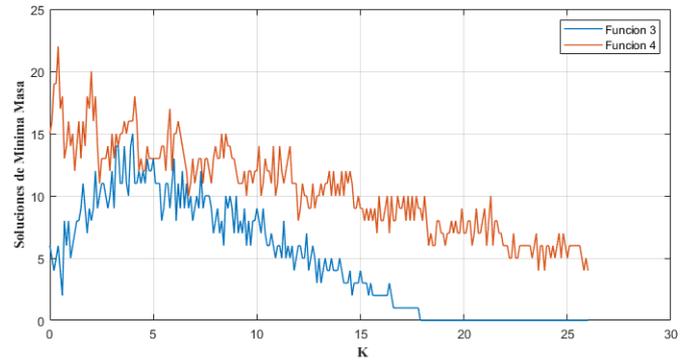
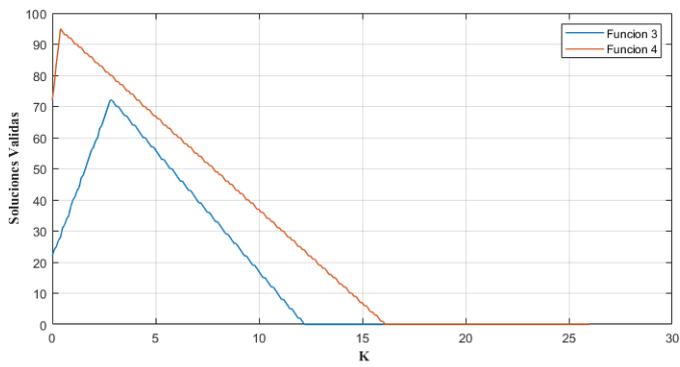


Figura 5.72: P4080 - Número de soluciones g_3 y g_4 (FUENTE: *Elaboración propia*)



P12060

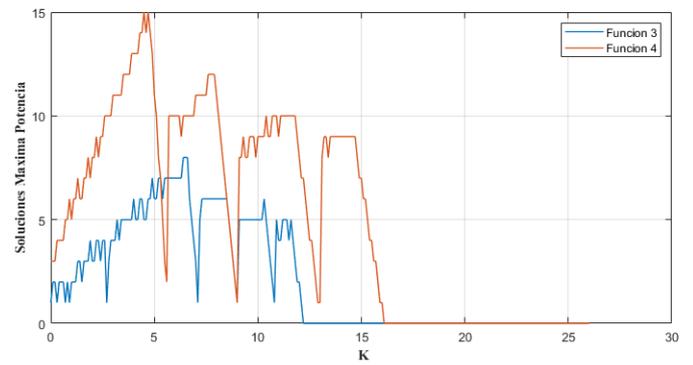
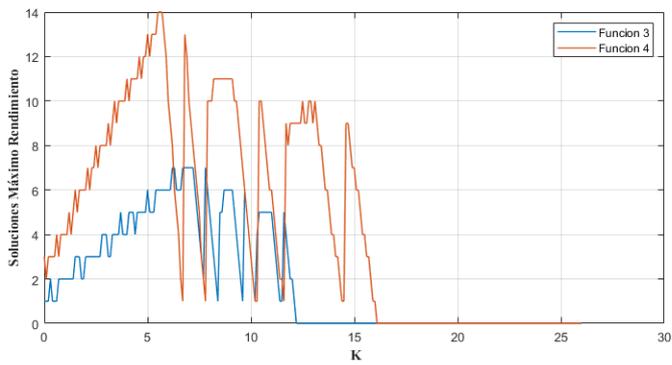
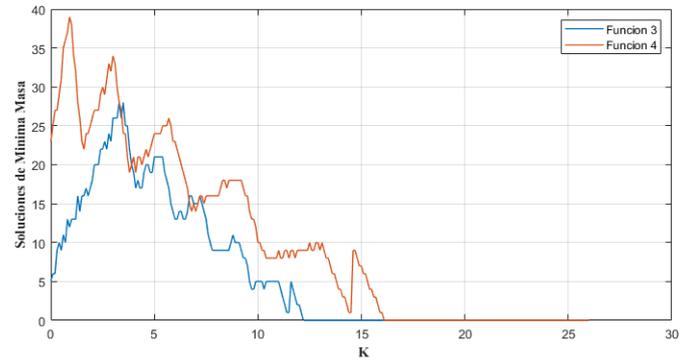


Figura 5.73: P12060 - Número de soluciones g_3 y g_4 (FUENTE: *Elaboración propia*)

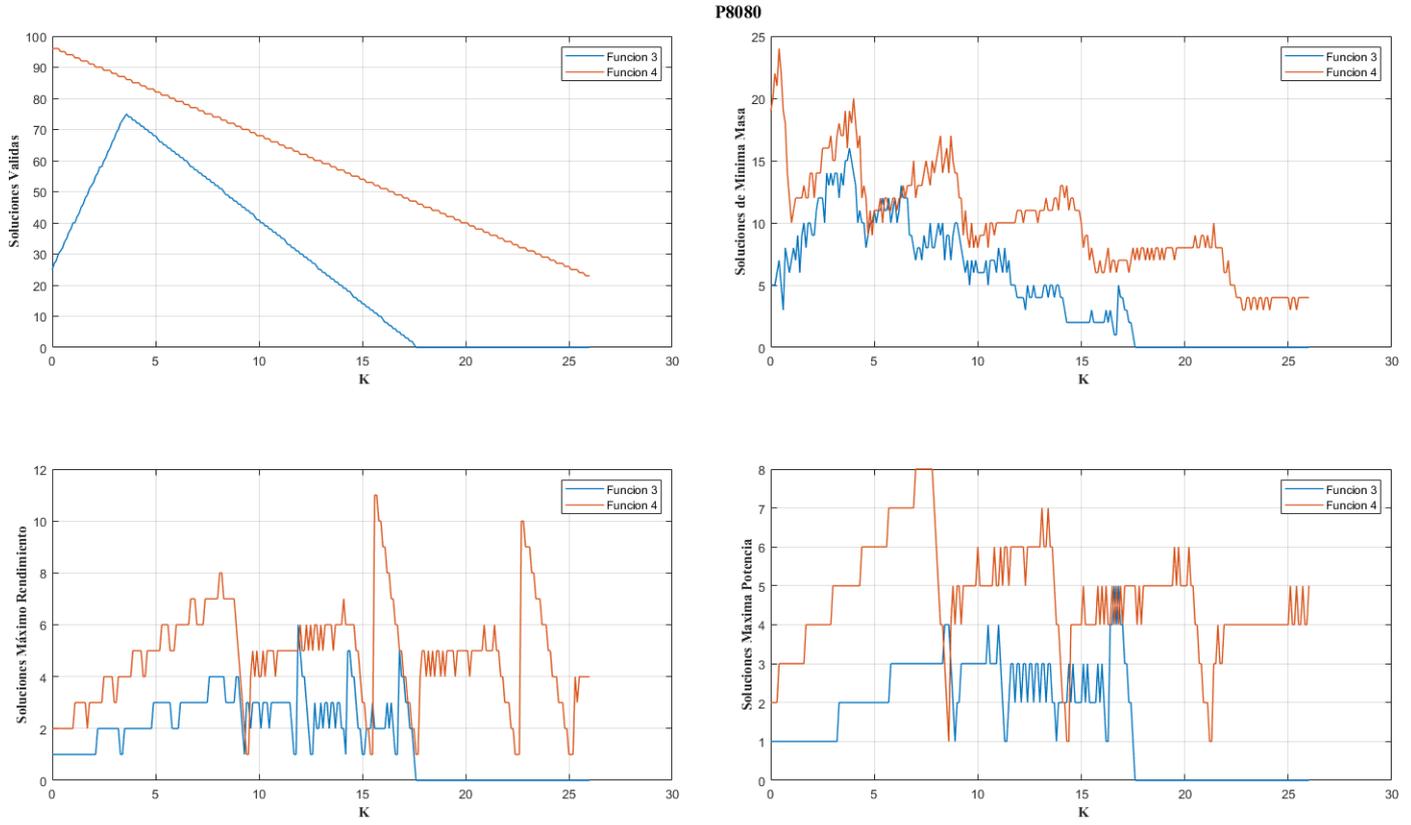
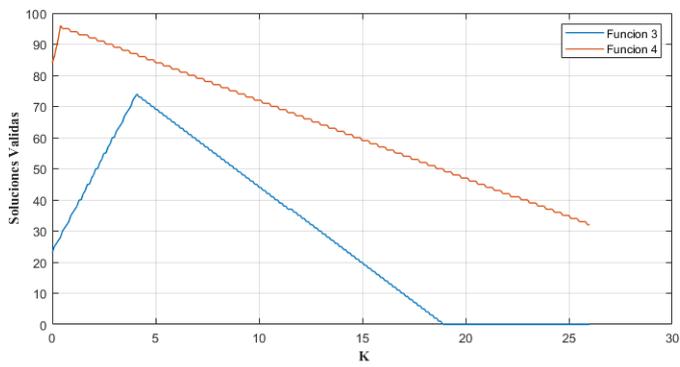


Figura 5.74: P8080 - Número de soluciones g_3 y g_4 (FUENTE: *Elaboración propia*)



P307

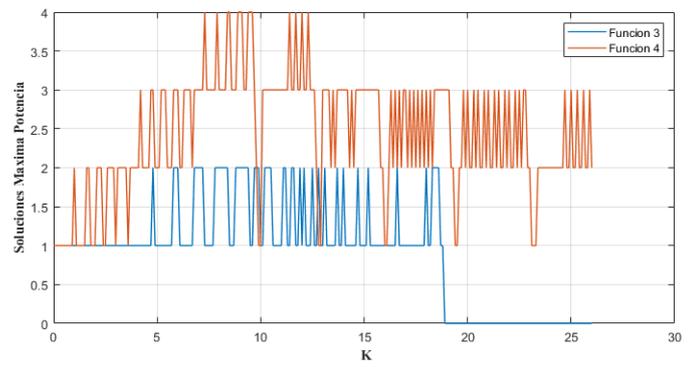
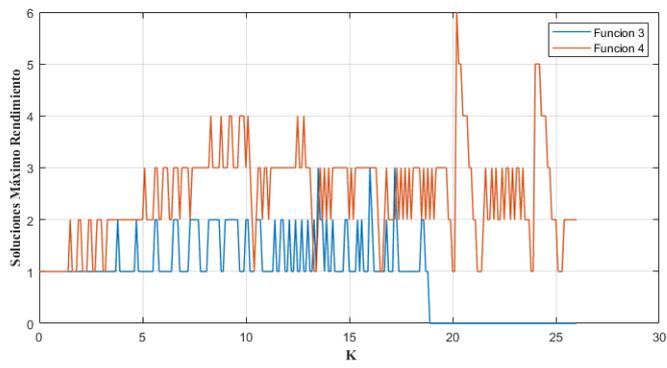
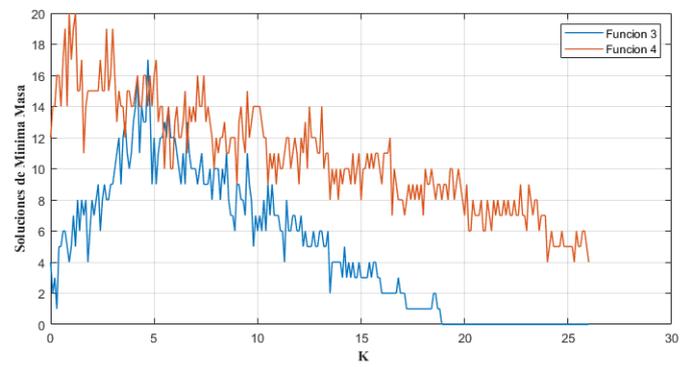


Figura 5.75: P307 - Número de soluciones g_3 y g_4 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Parámetros optimizados en función de K

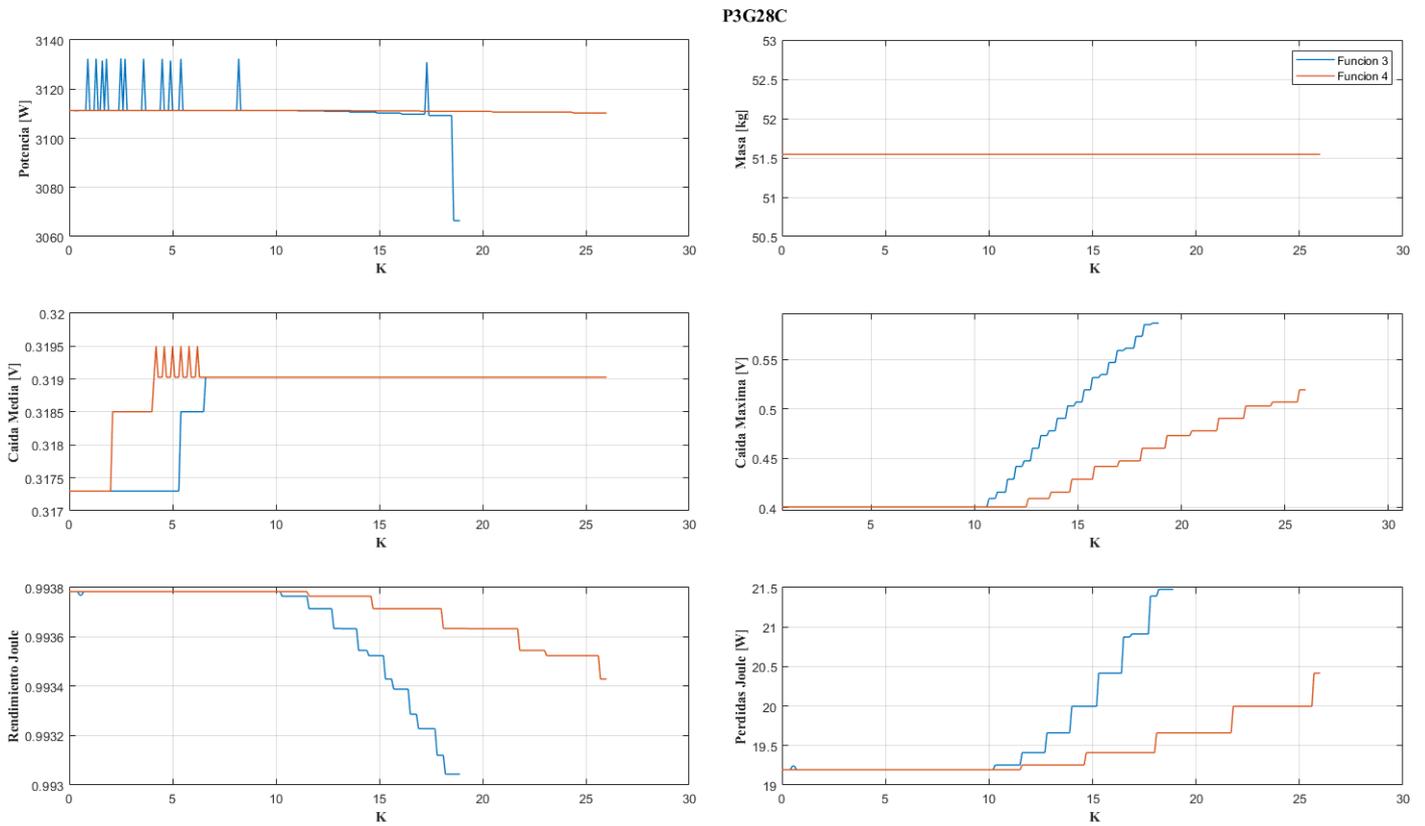


Figura 5.76: P3G28C - Parámetros optimizados g_3 y g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

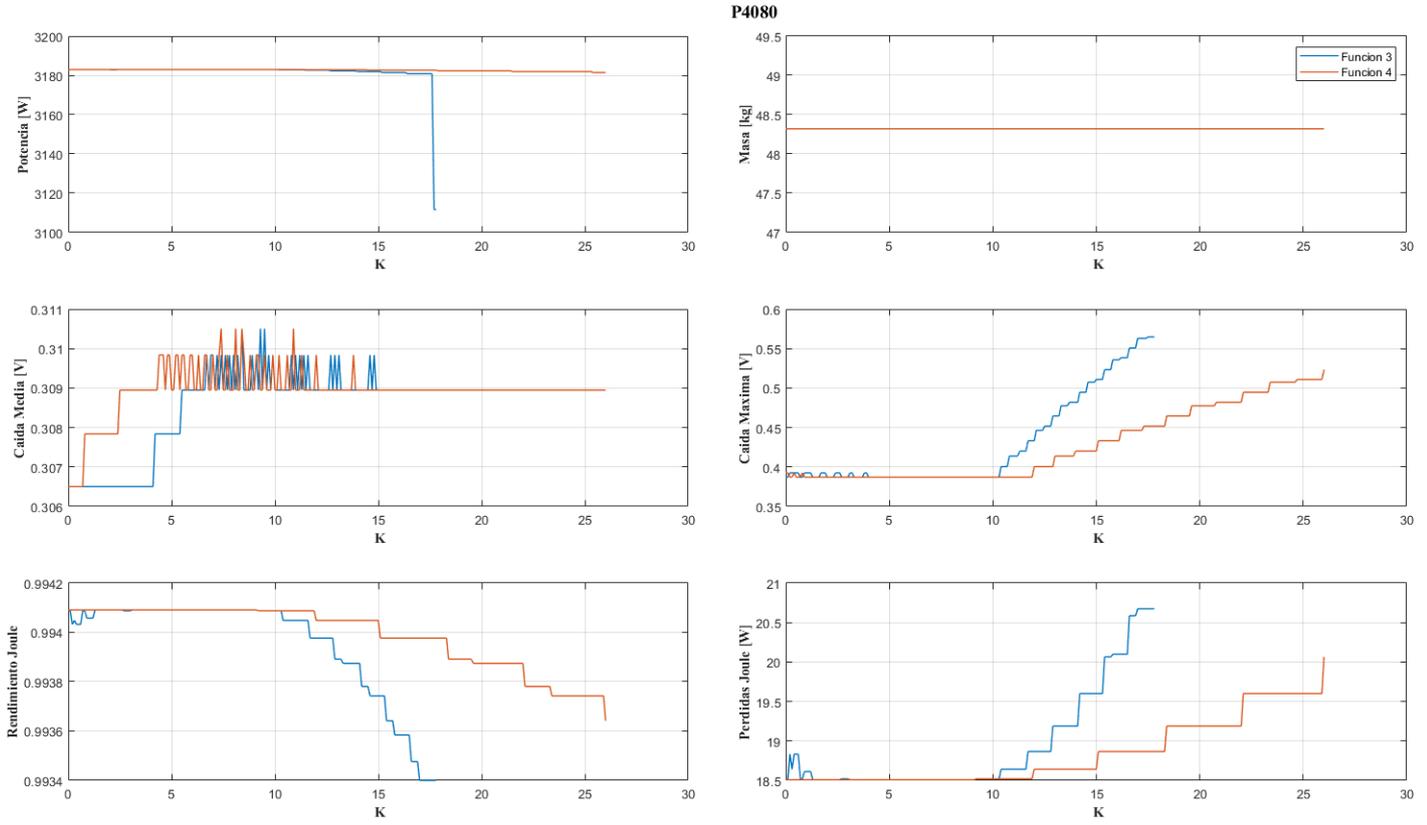


Figura 5.77: P4080 - Parámetros optimizados g_3 y g_4 (FUENTE: *Elaboración propia*)

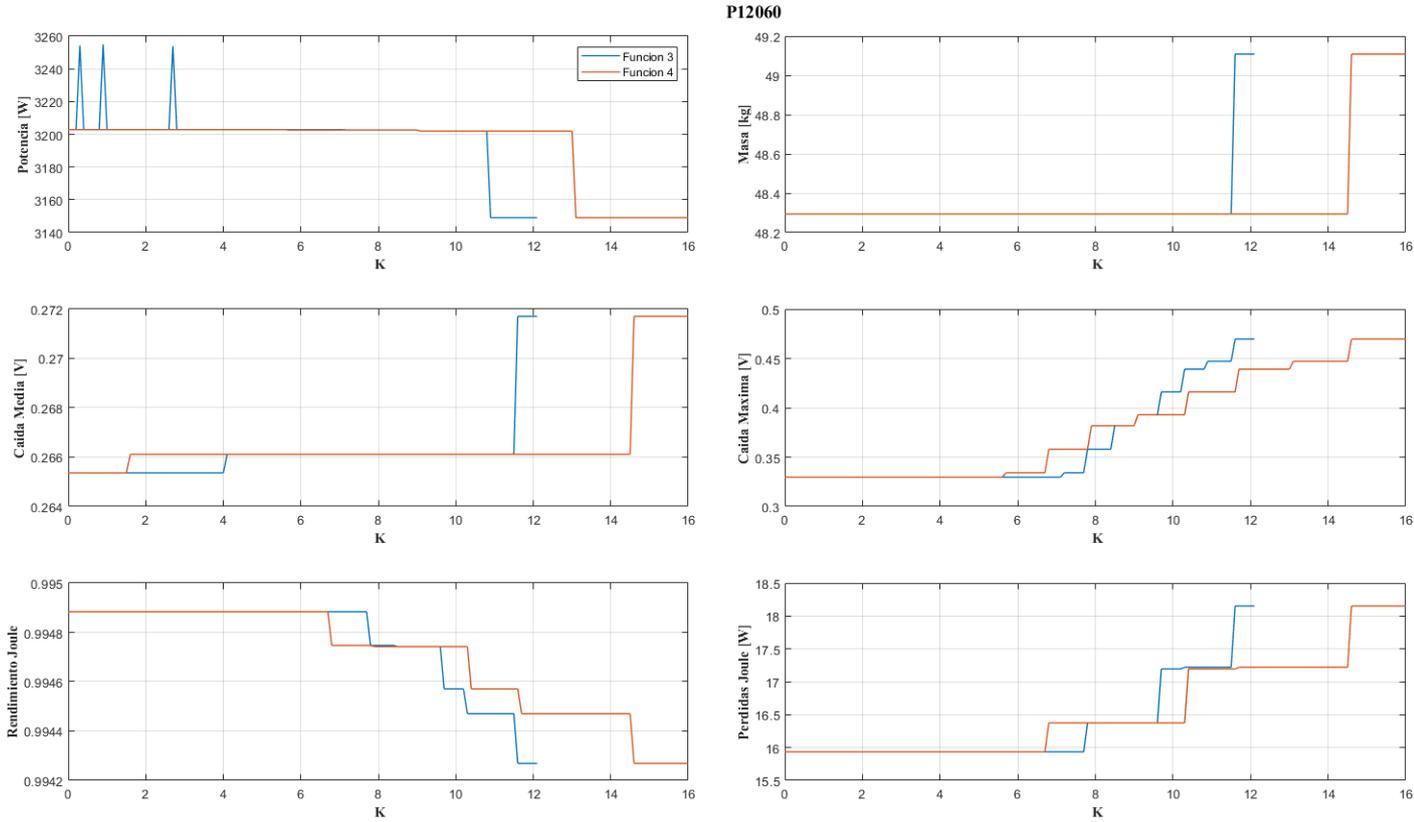


Figura 5.78: P12060 - Parámetros optimizados g_3 y g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

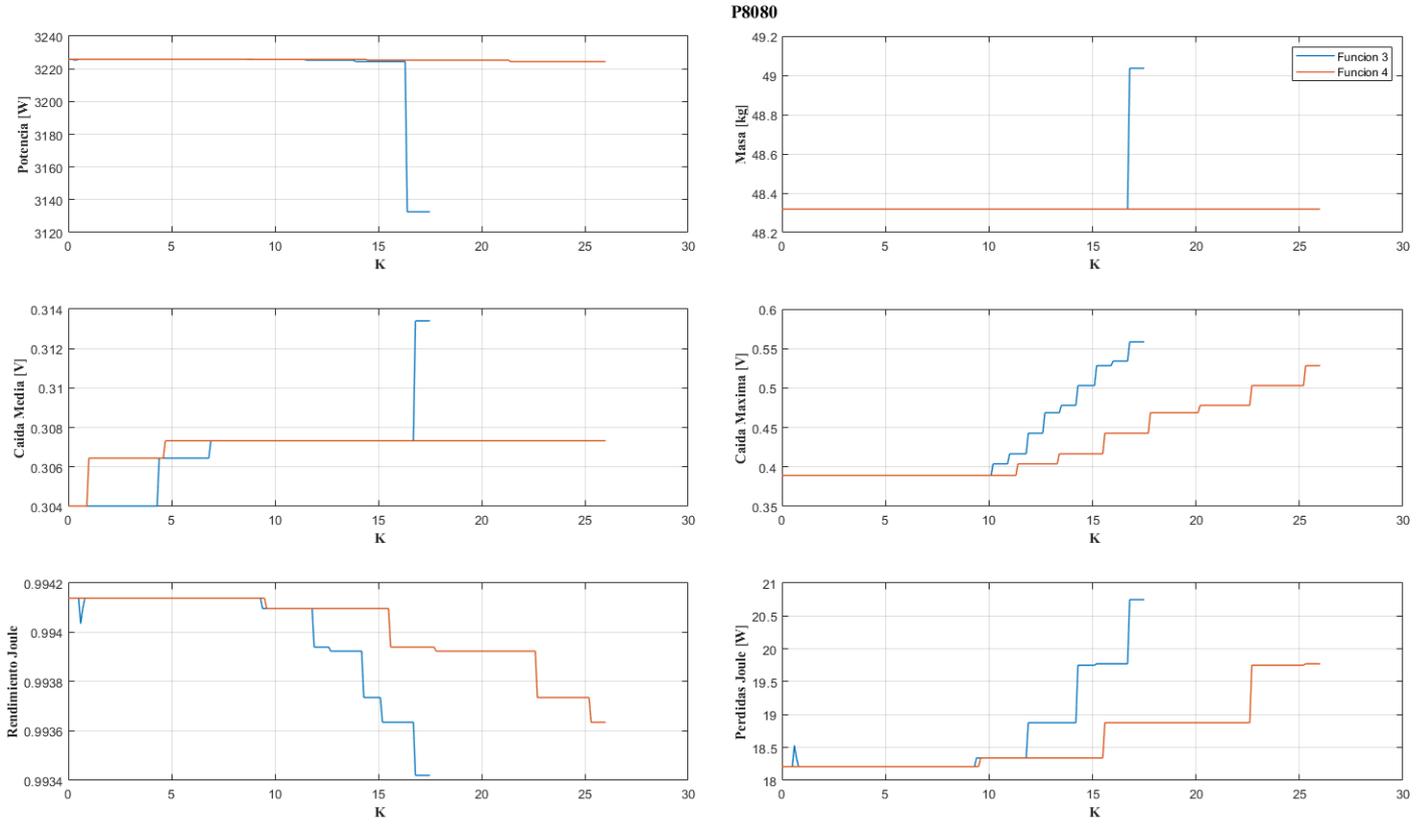


Figura 5.79: P8080 - Parámetros optimizados g_3 y g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

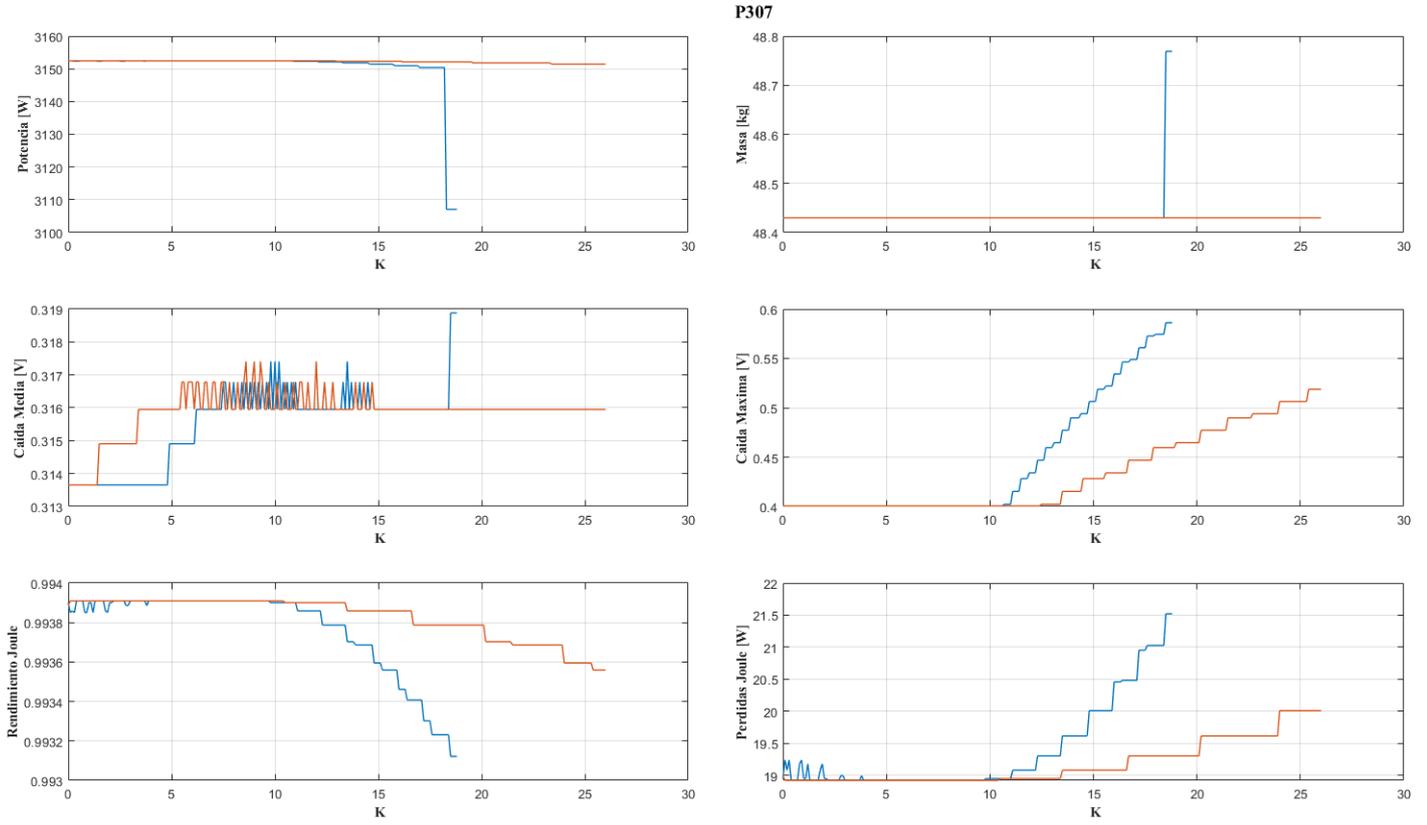


Figura 5.80: P307 - Parámetros optimizados g_3 y g_4 (FUENTE: Elaboración propia)

5.5.8. Funciones g_5 y g_6

La función g_5 tiene la siguiente forma:

$$\alpha X^2 - \beta Y^2 = K \quad (5.23)$$

Y la familia de soluciones tiene la siguiente forma:

$$X_5(X, Y) = \frac{2L_t - \sqrt{4L_t^2 - 4\left(1 - 9\frac{\alpha}{\beta}\right)\left(L_t^2 + 9\frac{K}{\beta}\right)}}{2\left(1 - 9\frac{\alpha}{\beta}\right)} \quad (5.24)$$

$$Y_5(X, Y) = \sqrt{\frac{\alpha X^2 - K}{\beta}} \quad (5.25)$$

Por otro lado, la función g_6 tiene la siguiente forma:

$$\alpha X^2 - \beta Y = K \quad (5.26)$$

Su correspondiente familia de soluciones es:

$$X_6(X, Y) = \frac{-1 + \sqrt{1 - 12\frac{\alpha}{\beta}\left(-L_T - 3\frac{K}{\beta}\right)}}{6\frac{\alpha}{\beta}} \quad (5.27)$$

$$Y_6(X, Y) = \frac{\alpha X^2 - K}{\beta} \quad (5.28)$$

Resultados para $K = 1$

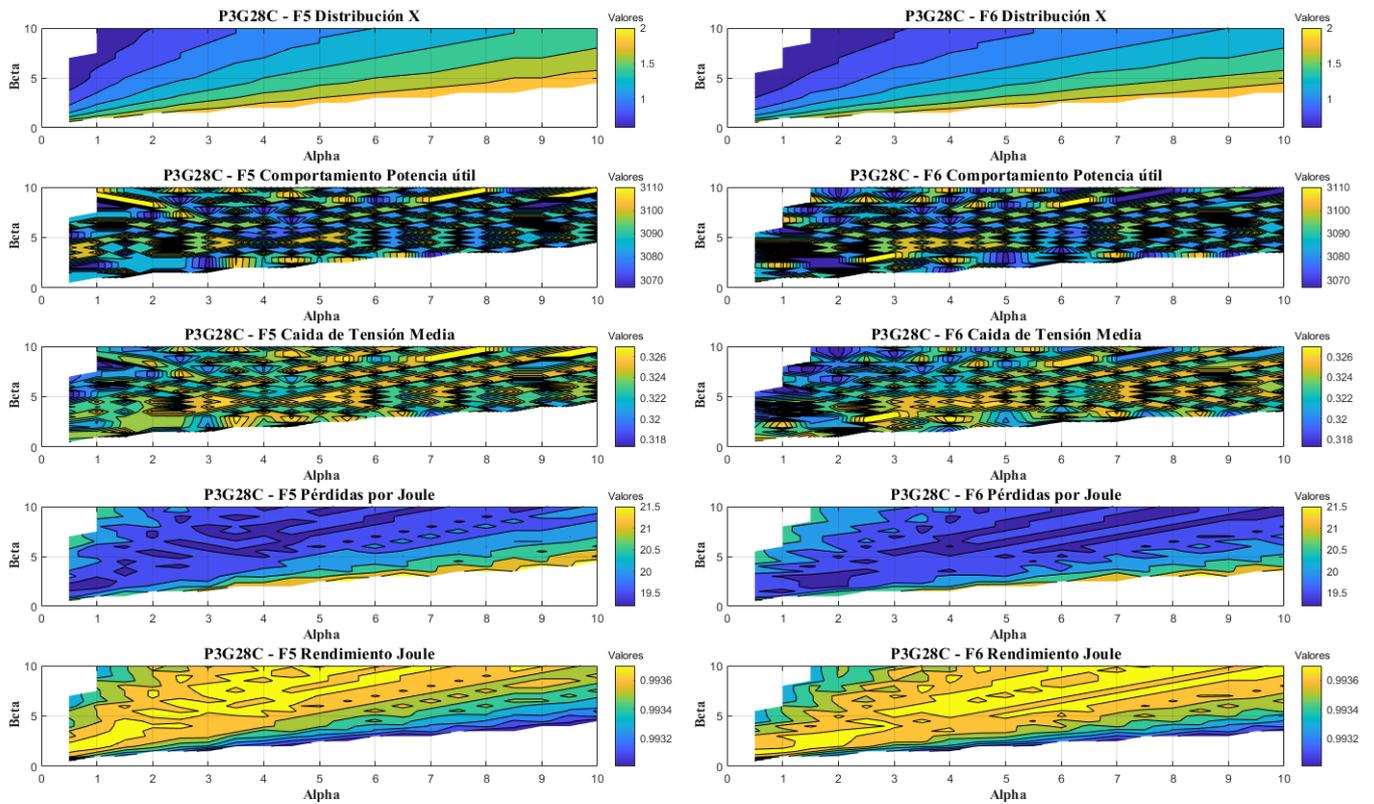


Figura 5.81: P3G28C - Parámetros de Funcionamiento g_5 y g_6 , $K = 1$ (FUENTE: Elaboración propia)

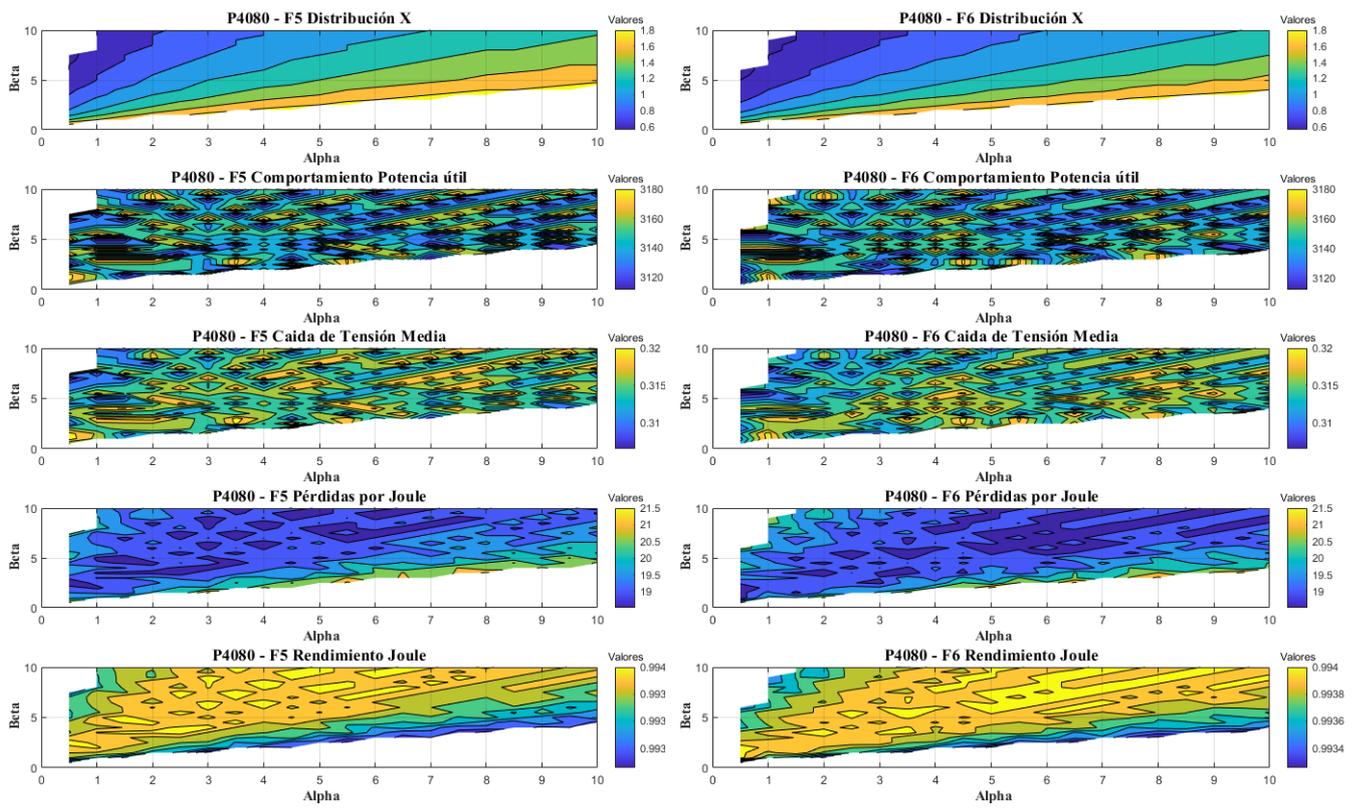


Figura 5.82: P4080 - Parámetros de Funcionamiento g_5 y g_6 , $K = 1$ (FUENTE: *Elaboración propia*)

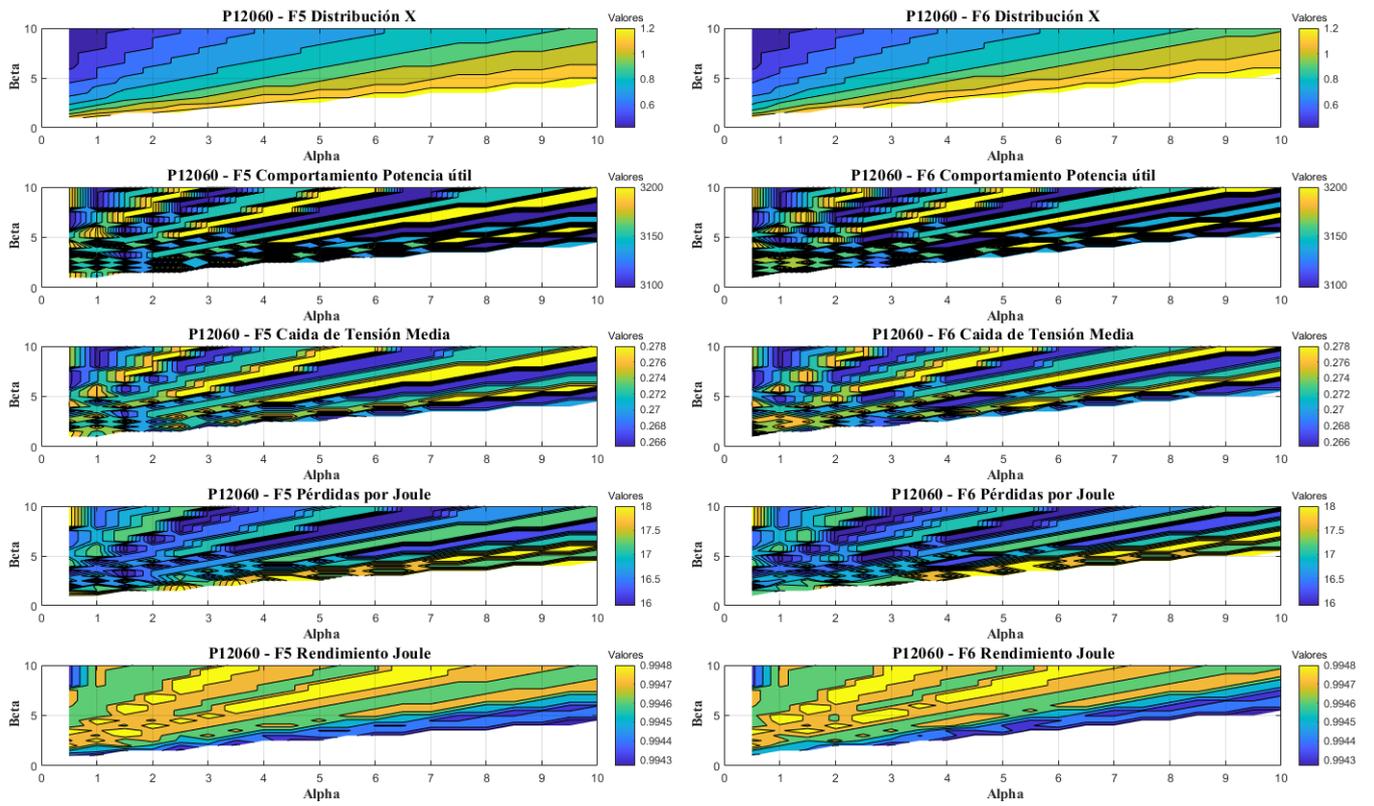


Figura 5.83: P12060 - Parámetros de Funcionamiento g_5 y g_6 , $K = 1$ (FUENTE: *Elaboración propia*)

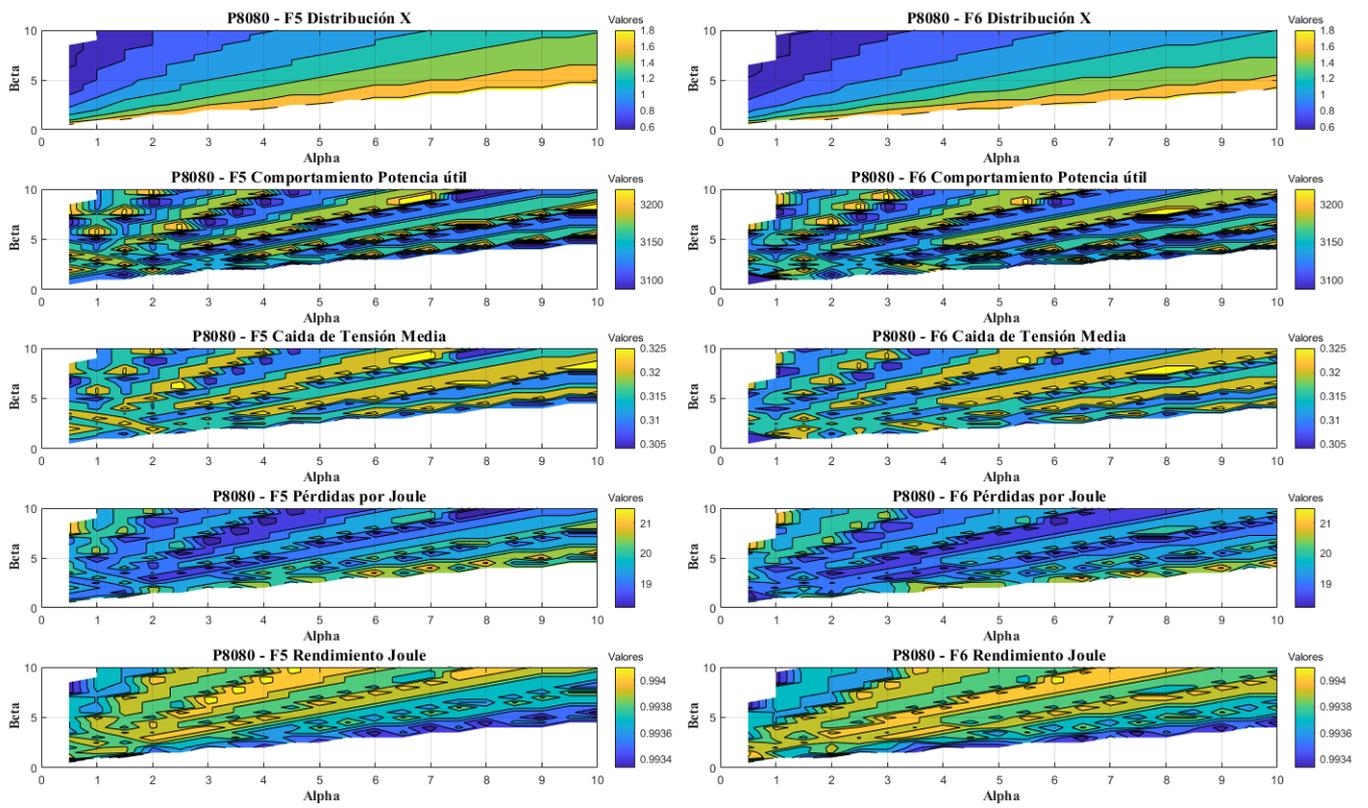


Figura 5.84: P8080 - Parámetros de Funcionamiento g_5 y g_6 , $K = 1$ (FUENTE: *Elaboración propia*)

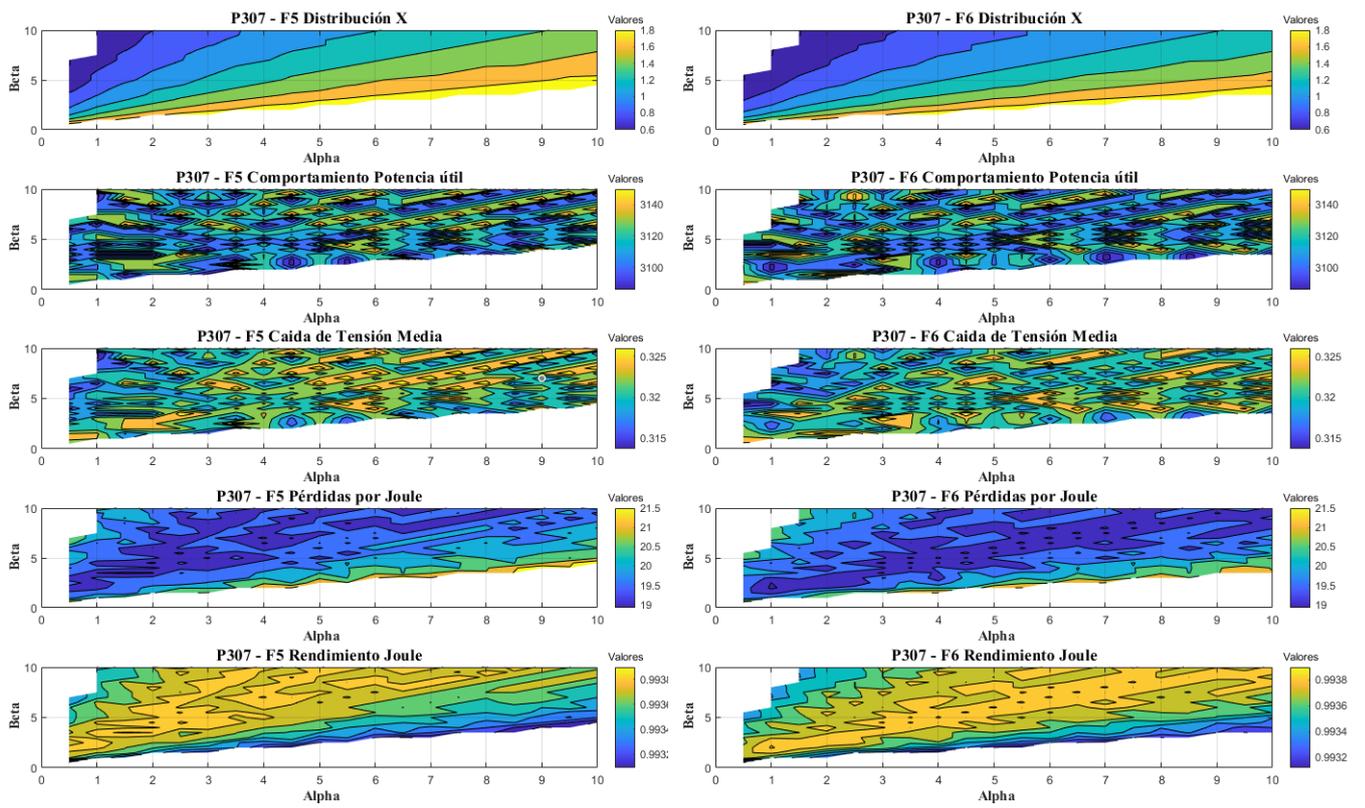


Figura 5.85: P307 - Parámetros de Funcionamiento g_5 y g_6 , $K = 1$ (FUENTE: *Elaboración propia*)

Optimización de la función

Aplicando el algoritmo obtenemos los siguiente valores:

	Valor	Validas		Mínima Masa		Maximo Rendimiento		Máxima Potencia	
		<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%
K_{P3G28C}	0.1	7612	99.67	2546	99.06	249	100.00	225	90.36
K_{P4080}	0.8	7644	99.97	1309	98.57	125	100.00	156	94.34
K_{P12060}	0.1	7650	99.60	2536	99.80	780	99.36	679	100
K_{P8080}	0	7541	99.76	1282	99.07	249	100.00	225	98.70
K_{P307}	0	7620	99.58	1245	95.11	121	100	114	96.61

Tabla 5.16: Valores óptimos del parámetro K para la Funcion g_5 (FUENTE: *Elaboración propia*)

	Valor	Validas		Mínima Masa		Maximo Rendimiento		Máxima Potencia	
		<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%
K_{P3G28C}	0.3	7662	97.30	2525	95.35	342	99.71	326	100.00
K_{P4080}	0.1	7585	97.23	1287	95.33	164	100.00	185	100.00
K_{P12060}	0.0	7048	98.96	2324	97.77	638	100.00	372	100.00
K_{P8080}	0.2	7615	98.01	1309	98.05	326	100.00	304	98.80
K_{P307}	0.0	7572	96.19	1240	93.94	166	100.00	162	100.00

Tabla 5.17: Valores óptimos del parámetro K para la Funcion g_6 (FUENTE: *Elaboración propia*)

Comparación del número de soluciones con respecto a K

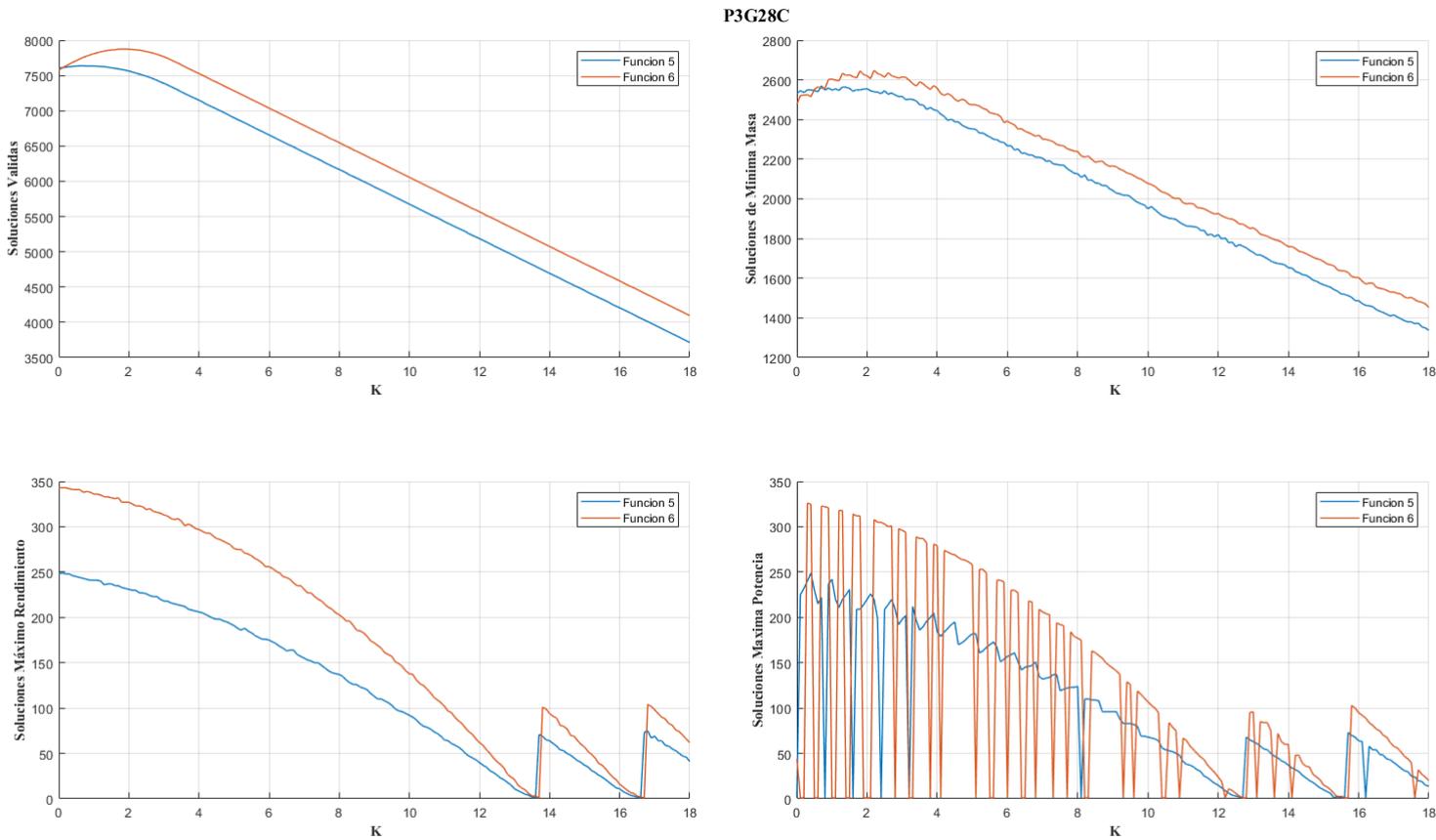


Figura 5.86: P3G28C - Número de soluciones g_5 y g_6 (FUENTE: Elaboración propia)

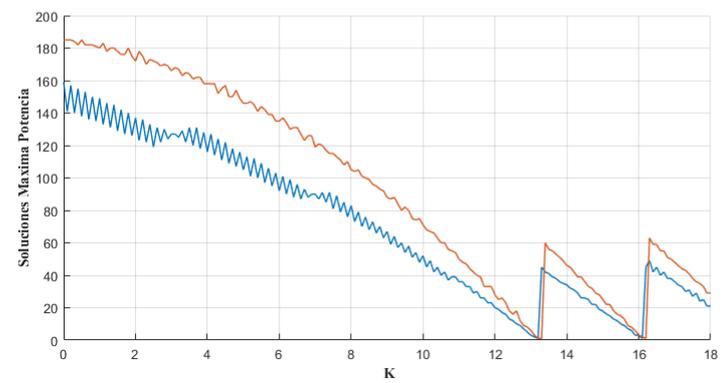
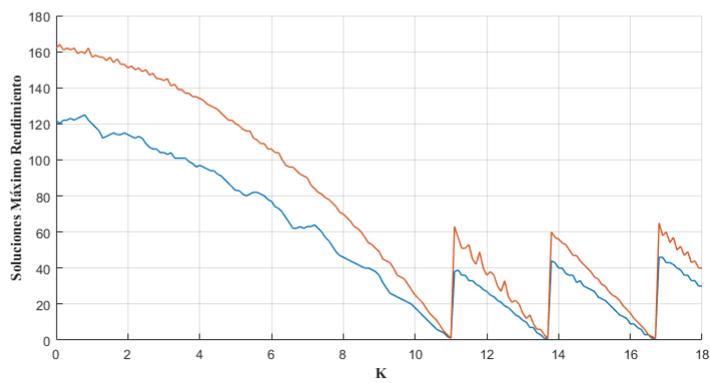
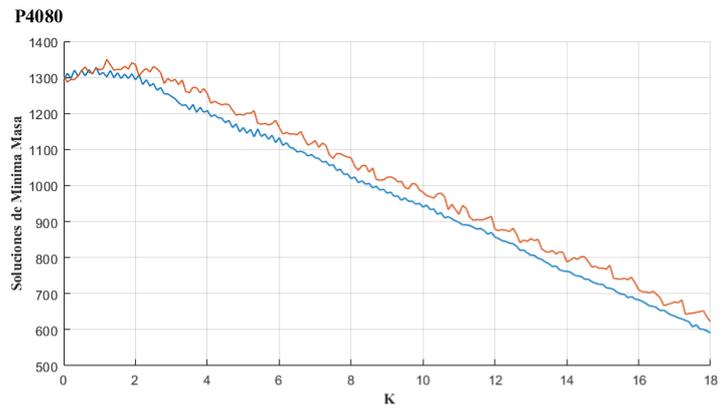
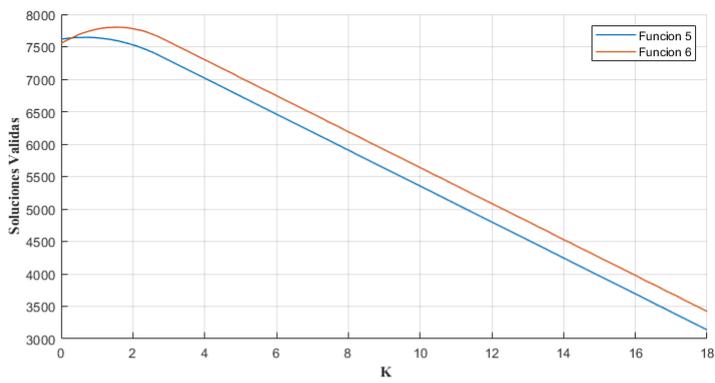


Figura 5.87: P408 - Número de soluciones g_5 y g_6 (FUENTE: Elaboración propia)

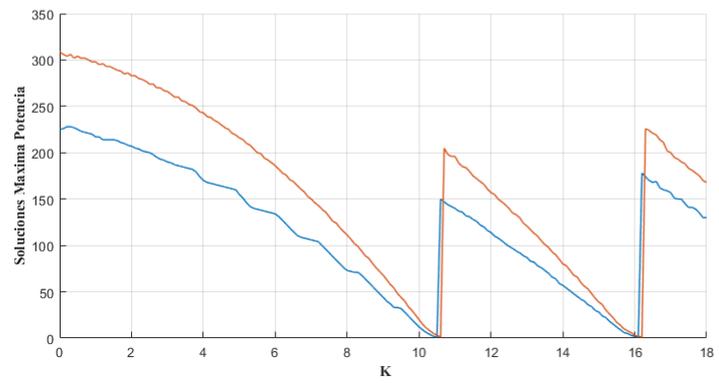
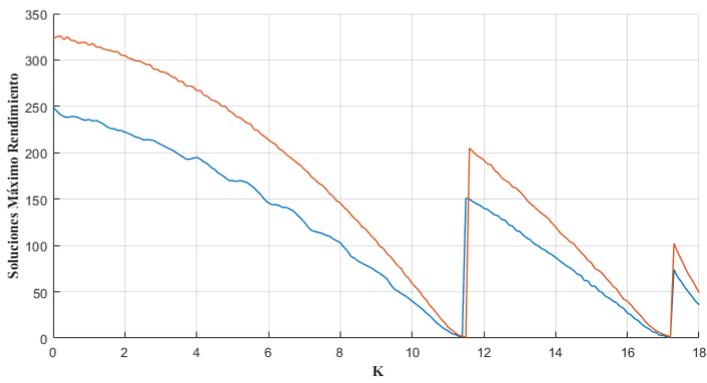
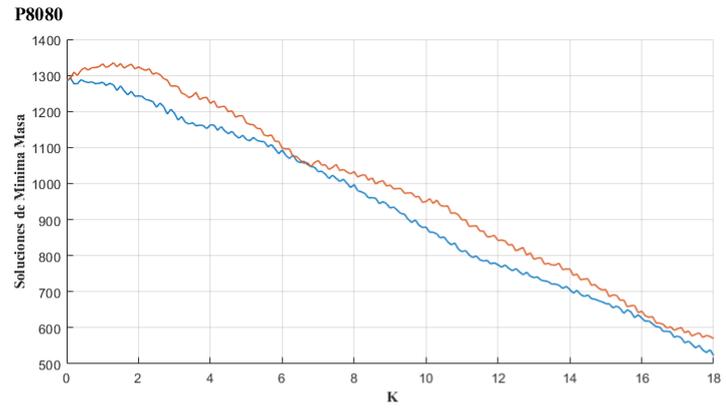
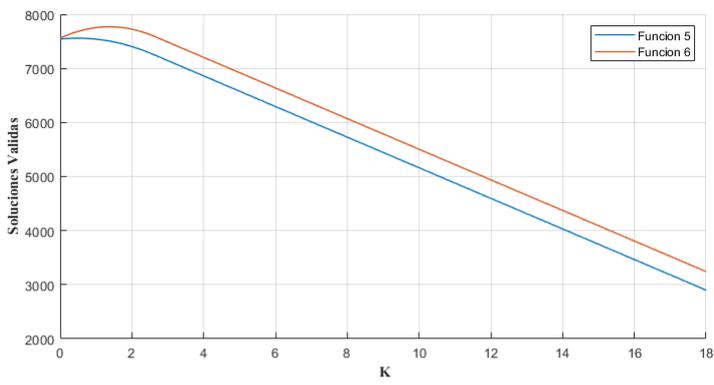


Figura 5.88: P12060 - Número de soluciones g_5 y g_6 (FUENTE: Elaboración propia)

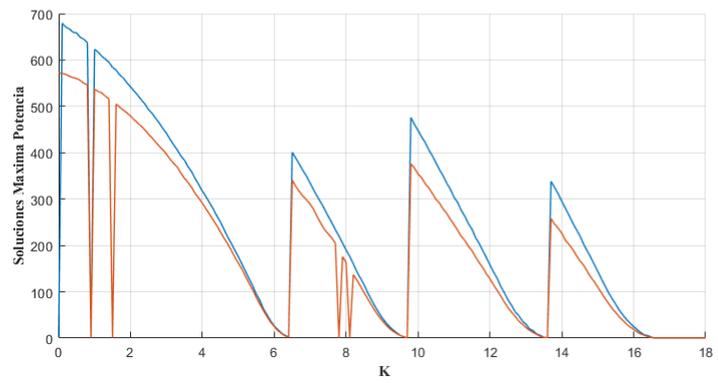
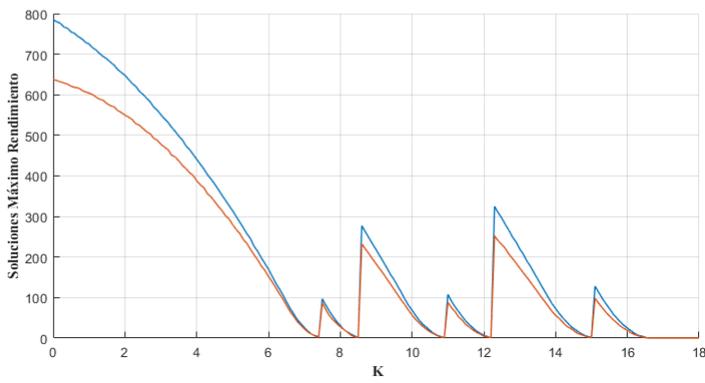
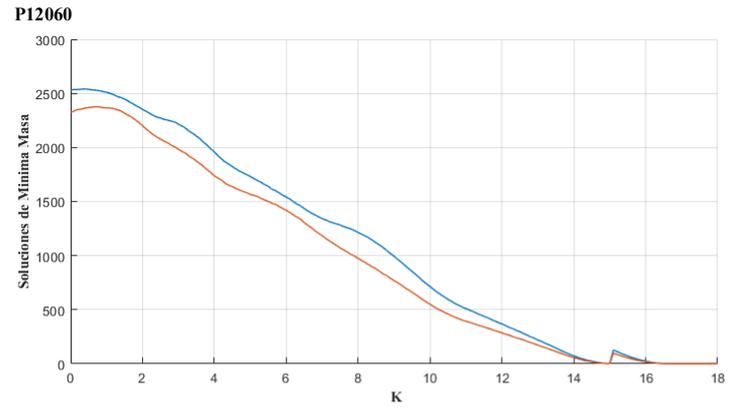
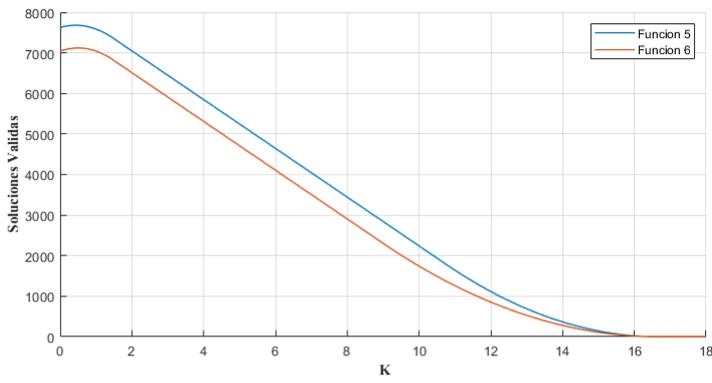


Figura 5.89: P8080 - Número de soluciones g_5 y g_6 (FUENTE: Elaboración propia)

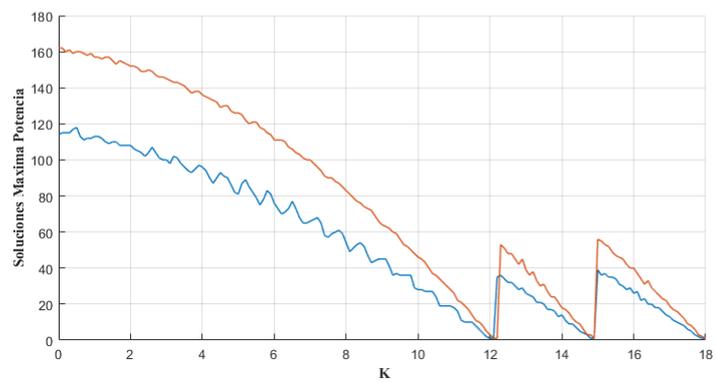
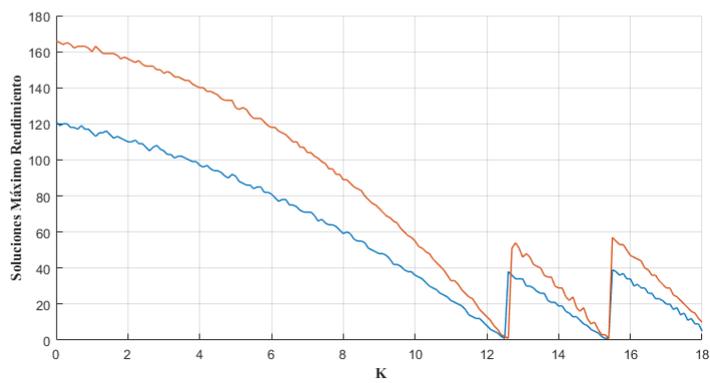
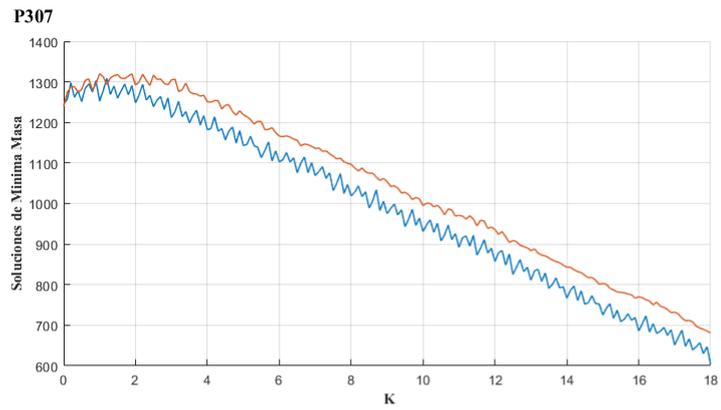
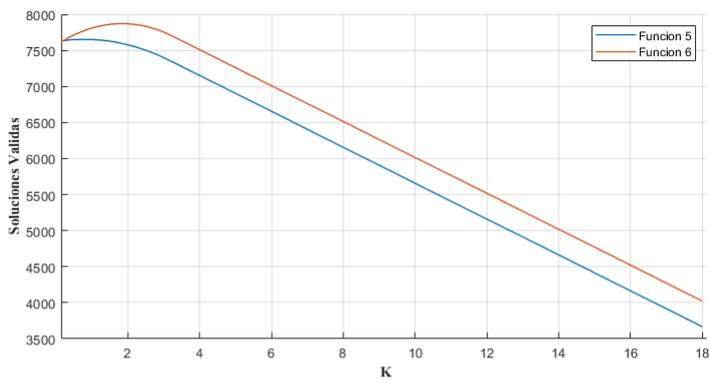


Figura 5.90: P307 - Número de soluciones g_5 y g_6 (FUENTE: Elaboración propia)

Parámetros optimizados en función de K

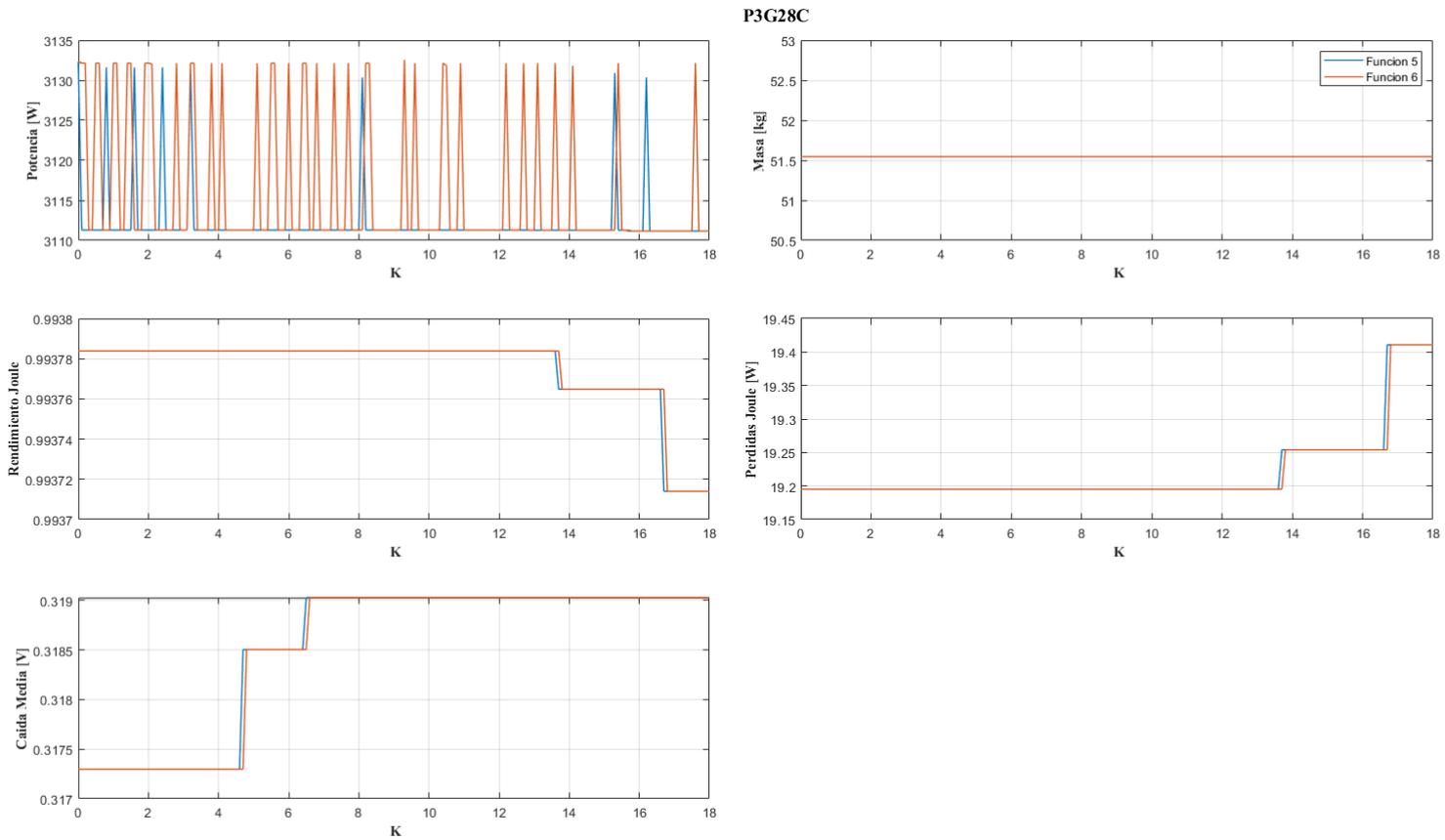
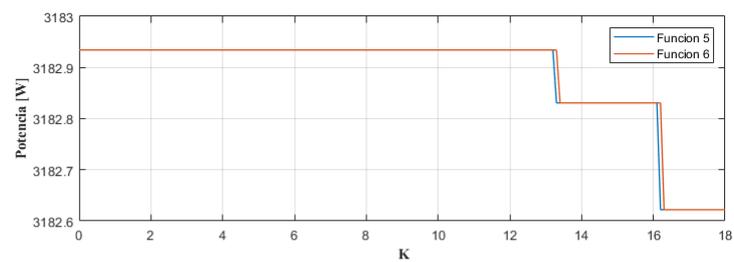


Figura 5.91: P3G28C - Parámetros optimizados g_5 y g_6 (FUENTE: Elaboración propia)



P4080

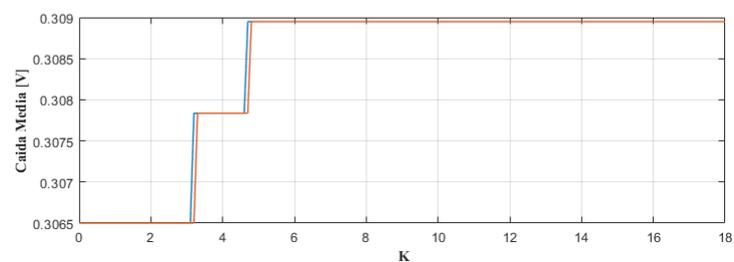
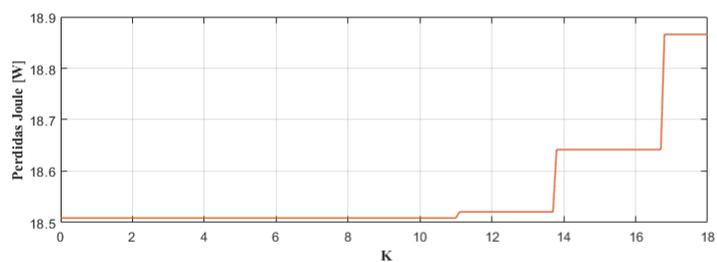
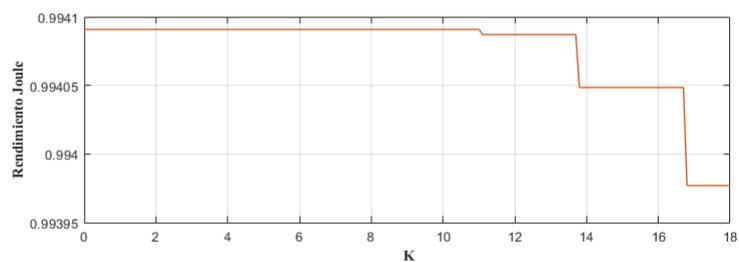
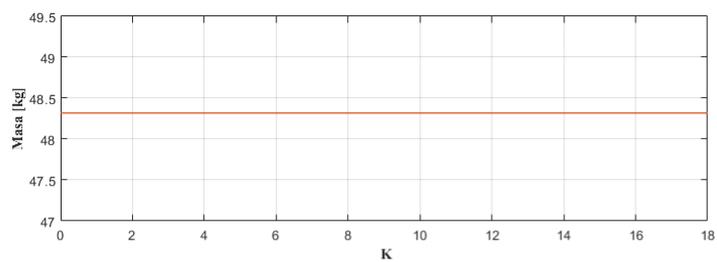


Figura 5.92: P408 - Parámetros optimizados g_5 y g_6 (FUENTE: Elaboración propia)

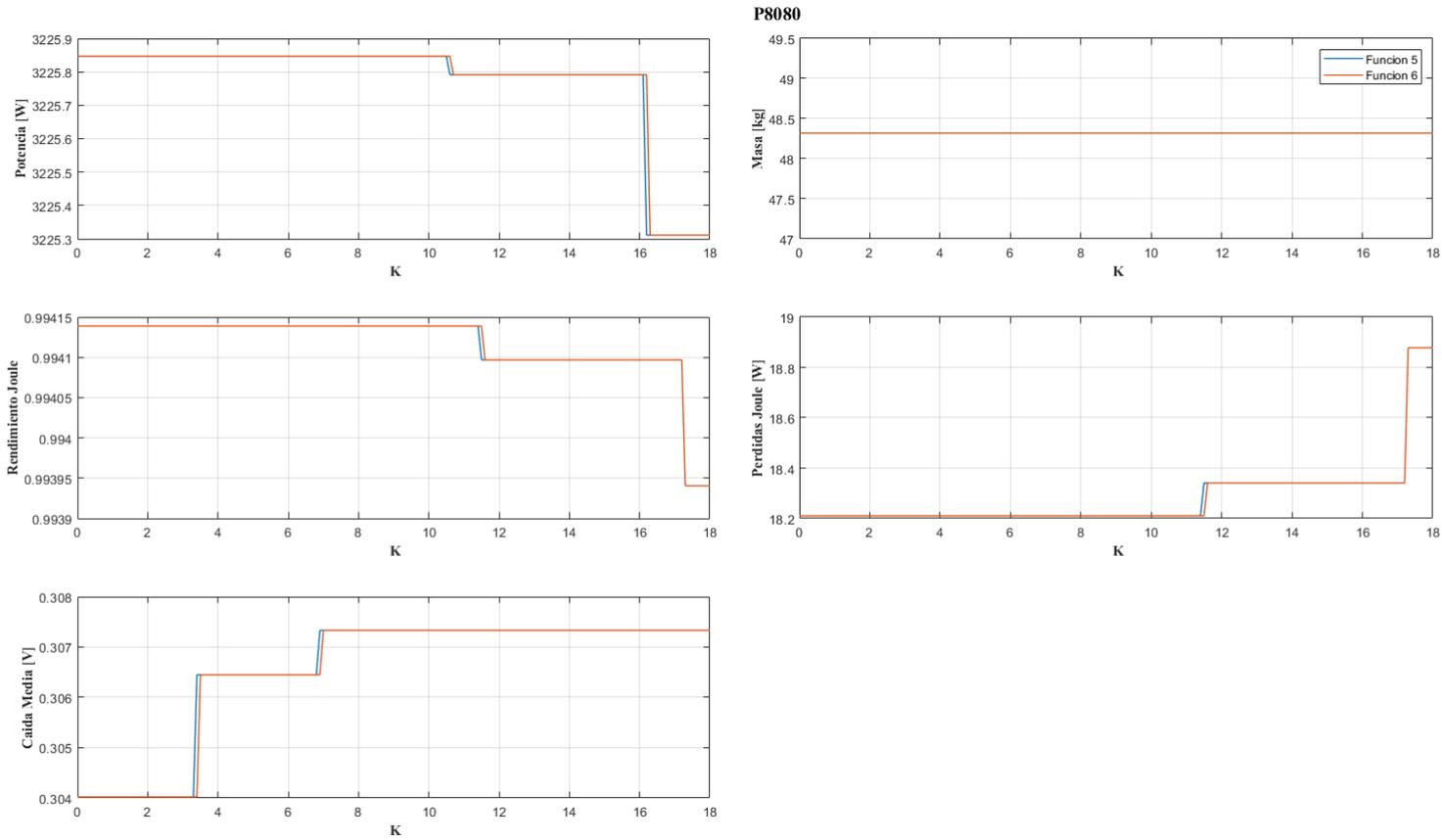
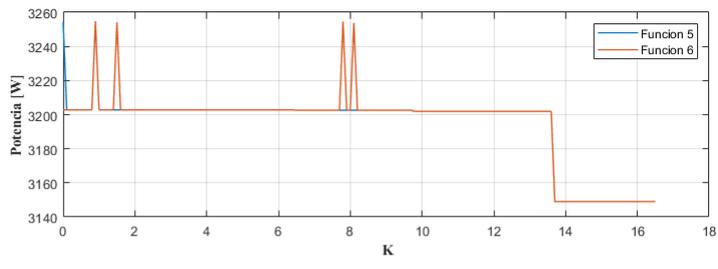


Figura 5.93: P12060 - Parámetros optimizados g_5 y g_6 (FUENTE: Elaboración propia)



P12060

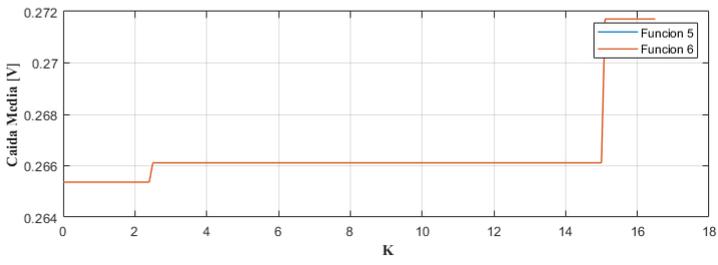
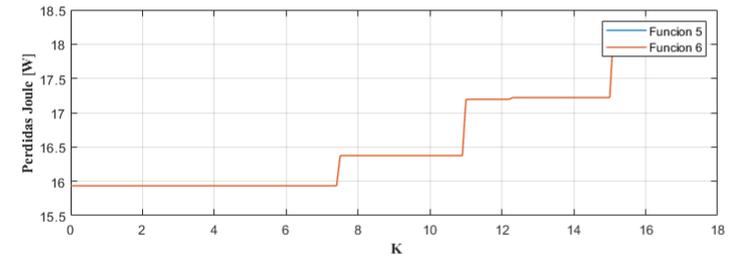
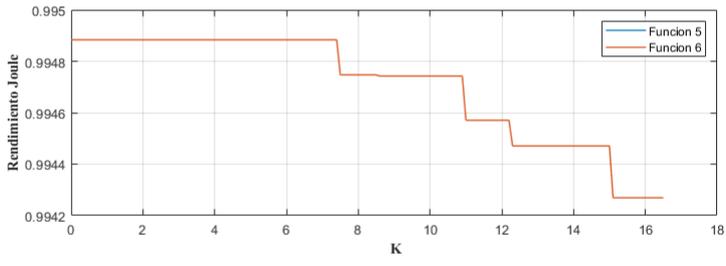
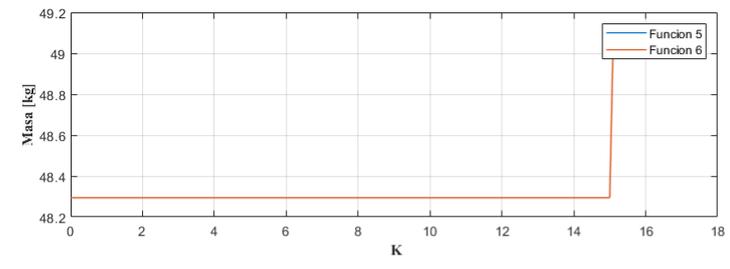


Figura 5.94: P8080 - Parámetros optimizados g_5 y g_6 (FUENTE: Elaboración propia)

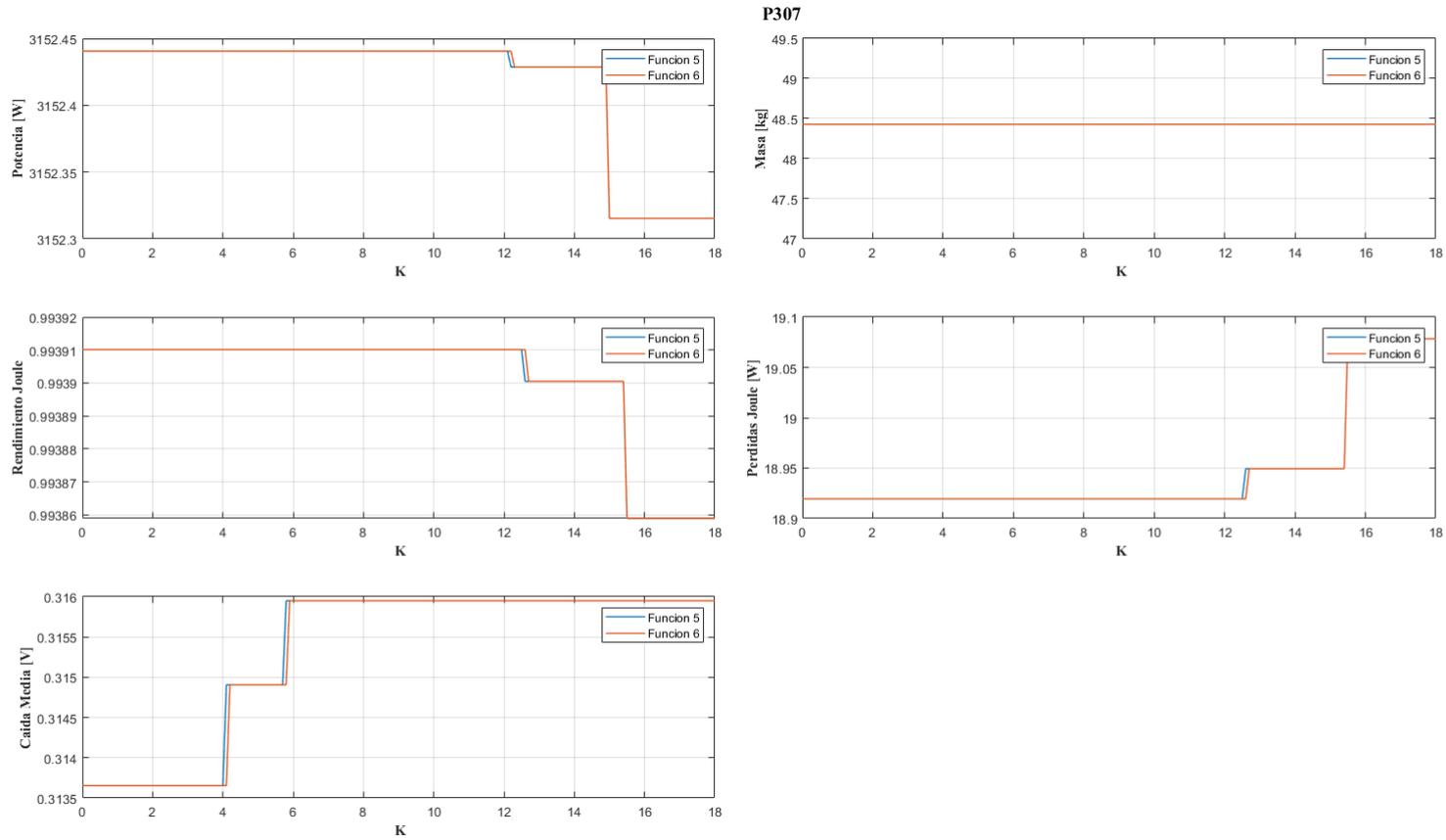


Figura 5.95: P307 - Parámetros optimizados g_5 y g_6 (FUENTE: Elaboración propia)

Capítulo 6

Conclusiones finales

6.1. Conclusiones sobre el marco socioeconómico de la órbita GEO

Del análisis en su conjunto podemos sacar una serie de conclusiones:

- La órbita geoestacionaria es un recurso prácticamente dominado por Estados Unidos. Las condiciones de asignación vigentes durante los principios y el fuerte desarrollo de su programa espacial durante finales del siglo XX le han permitido alcanzar una condición de poder notable.
- Rusia, histórico competidor de Estados Unidos, está viendo como su desarrollo se está viendo frenado. Las fuertes sanciones aplicadas, los problemas económicos y los frentes bélicos abiertos no permiten que el país pueda desarrollarse. Y esto se ve reflejado en cómo están perdiendo terreno para conseguir porcentaje de este limitado recurso.
- China e India se erigen como los países que más desarrollo están viviendo. Especialmente China, que de seguir con esa tendencia, pronto superará a Rusia y podrá colocarse a la cola de Estados Unidos.
- Europa se presenta como el continente con menos crecimiento, Asia y América (Latinoamérica en este caso) la están superando.
- Sin embargo, las telecomunicaciones mundiales siguen fuertemente controladas por Europa. Tanto desde la iniciativa privada como la pública.
- Asia, fruto del auge económico, está comenzando a desarrollar sus propios sistemas independientes de telecomunicaciones. Aunque la dependencia y la actual infraestructura creada hacen que la futura independencia esté lejos para ellos.
- Pese a ser un desarrollo lento, África comienza a desarrollar programas espaciales, no obstante, actualmente carecen de competitividad contra los países más desarrollados.

6.2. Conclusiones del Estudio de Optimización

Del Estudio de optimización se han extraído conclusiones relacionadas con los siguientes aspectos:

- Conclusiones de la comparativa entre funciones
- Respuesta a las preguntas planteadas

6.2.1. Conclusiones g_1 y g_2

Las figuras de la Fig. 3.13 hasta Fig. 3.16 y desde Fig 3.22 hasta Fig. 3.25. respaldan las siguientes tendencias:

- El panel que mayores picos de potencia alcanza para ambas funciones es el P8080.
- El que más masa instala es el P3G28C.
- El que mejor rendimiento y perdidas provee es el P12060.

Comparando desde la Fig. 3.17 a la Fig. 3.21 y de la Fig. 3.26 hasta la Fig. 3.30, se constatan los siguientes hechos:

- La función g_1 provoca una convergencia en los parámetros de funcionamiento a partir de ciertos valores de "m" que varían en cada panel y en cada parámetro. En todos los paneles se cumple que esta convergencia es notablemente inferior para la caída de tensión máxima. El comportamiento es similar para los dos rangos de K estudiados, tanto de $K = 1$ a $K = 7$, como de $K = 0.1$ a $K = 1$.
- Por el contrario, la función g_2 genera un comportamiento de los parámetros de funcionamiento notablemente más disperso. En este caso ningún parámetro se comporta excesivamente diferente al resto en cuanto a divergencia de la solución. En el rango de $K = 0.1$ a $K = 1$, se aprecia un menor nivel de divergencia.
- El nivel de convergencia que presenta la función g_1 la vuelve más apropiada para la aplicación práctica. Ya que a partir de cierto valor de "m", el comportamiento no varía de un K a otro, se puede elegir el K que más convenga para una aplicación determinada.

De la Comparativa entre funciones para $K = 1$ (Fig. 3.31 a Fig. 3.36), se extraen las siguientes conclusiones:

- De acuerdo a Fig. 3.33 a partir de un m cercano a la unidad las Pérdidas por Joule son superiores en los resultados de g_2 .
- Con respecto a X (Fig. 3.34), dichas pérdidas comienzan siendo superiores para g_2 , pero a partir de cierto valor de longitud de X se hacen inferiores. A excepción de P12060, donde el comportamiento, mientras g_2 genera soluciones, es bastante similar.
- Esto se refleja en el rendimiento (Fig. 3.35 y Fig. 3.36) donde la tendencia es la misma.

En cuanto al número de soluciones que ofrece cada función:

- De la Fig. 3.37 a la Fig. 3.41 se observa como la función g_1 ofrece un mayor número de soluciones máximas de cada tipo.

En el último apartado de la comparación se observa como evolucionan los valores óptimos de cada parámetro de funcionamiento con respecto a K :

- De nuevo se comprueba (Fig. 3.42 a la Fig. 3.46), que a excepción de P1260 (Fig. 3.40), g_2 tiene un tamaño superior. Y a su vez es capaz de mantener los valores óptimos alcanzables durante un rango de K superior.
- De acuerdo a la Tabla 3.12 los K óptimos tras aplicar el algoritmo no permitirían llegar a los valores óptimos de los parámetros mediante la función g_1 , mientras que si lo permiten para la función g_2 dado que su tamaño es notablemente superior.

6.2.2. Conclusiones g_3 y g_4

Las figuras de la Fig. 3.47 hasta Fig. 3.50 y desde Fig 3.56 hasta Fig. 3.59 respaldan las siguientes tendencias:

- El panel que mayores picos de potencia alcanza para ambas funciones es el P8080.
- El que más masa instala es el P3G28C.
- El que mejor rendimiento y perdidas provee es el P12060.

Comparando desde la Fig. 3.51 a la Fig. 3.55 y de la Fig. 3.60 hasta la Fig. 3.64, se constatan los siguientes hechos:

- Ambas funciones, g_3 y g_4 , muestran altos niveles de convergencia en sus soluciones para diferentes valores de K . De nuevo, el parámetro Caída de Tensión Máxima es el más divergente de todos.
- Esto demuestra que a partir de cierto valor de m , ambas familias de funciones demuestran un comportamiento bastante similar.

De la Comparativa entre funciones para $K = 1$ (Fig. 3.65 a Fig. 3.69), se extraen las siguientes conclusiones:

- Tanto el rendimiento como las perdidas son inferiores para la función g_4 . En el caso de las Pérdidas Joule respecto a X (Fig. 3.68) dicha diferencia es más notable a medida que la X aumenta.

En cuanto al número de soluciones que ofrece cada función:

- Las figuras de la Fig. 3.70 a la Fig. 3.74 muestran como para todo K , el número de soluciones, de cada tipo, es notablemente superior para g_4
- A su vez, el tamaño de la familia g_4 es mayor a la de g_3 que deja de producir soluciones a partir de un rango de valores de K comprendido entre 15 y 20, dependiendo del panel.

En el último apartado de la comparación se observa como evolucionan los valores óptimos de cada parámetro de funcionamiento con respecto a K :

- De nuevo se comprueba (Fig. 3.75 a la Fig. 3.79), que el tamaño de la familia g_4 es mayor. Esta vez analizando cómo varía el valor óptimo de los distintos parámetros con K .

6.2.3. Conclusiones g_5 y g_6

Con respecto a la comparación de parámetros en $K = 1$ (Fig.3.80 a Fig. 3.84), se extrae:

- Para valor de K igual a la unidad, la función g_6 genera más situaciones de máximo rendimiento.
- Para valor de K igual a la unidad, la función g_5 genera más situaciones de máxima potencia, por lo que se puede deducir que las pérdidas asociadas a la mismas serán, en cierta medida, superiores.

De las Tablas 3.16 y 3.17 se observa:

- El algoritmo de optimización aplicado a estas funciones aproxima a K que conducen a un alto porcentaje de soluciones de cada tipo con respecto a la óptima.
- g_5 obtiene proporciones mayores en cuanto a SV y SMM y g_6 en cuanto a SMR y SMP.

En cuanto a la comparación en la evolución del número de soluciones con respecto a K (Fig. 3.85 a Fig. 3.89):

- El P8080 (Fig. 3.88) es el único de los cuatro paneles en el que la función g_5 genera un mayor número de valores para cada K .
- Para los demás casos, g_6 está por encima.

Con respecto al tamaño de soluciones (Fig. 3.90 a Fig. 3.94):

- Para estas dos funciones, el tamaño de la familia de soluciones es prácticamente igual, independientemente del panel y la función.

6.2.4. Respuestas finales

¿Se puede concluir que la distribución de X e Y afecta a la performance del sistema?

Si, efectivamente, tanto la magnitud de X , como la manera en la que se relacionan X e Y afectan directamente a la performance del sistema.

¿Permiten las funciones estudiadas optimizar la performance del sistema?

Además de afectar notablemente, las funciones de optimización permiten encontrar aquellos valores de X que llevan a que el sistema esté optimizado con respecto a diferentes parámetros:

- Masa
- Rendimiento
- Potencia

¿Qué función ofrece una mejor proporción de soluciones optimizadas en cuanto a potencia, masa, rendimiento y pérdidas?

Teniendo en cuenta el número de soluciones las funciones que proporcionan un mayor número de resultados óptimos son las funciones g_5 y g_6 .

¿En base al tiempo de procesamiento y manejo de datos, es más conveniente emplear uno o dos parámetros de control en el proceso de diseño?

No obstante, el tiempo de procesamiento de estas últimas es exponencialmente superior a las funciones que únicamente emplean un parámetro de control. Por lo que para una aplicación práctica o de estudio sería más conveniente emplear estas 4 primeras. Siendo g_4 la función que mejores resultados proporciona con respecto al número de soluciones.

6.2.5. Diseño Optimizado Final

Se parte de g_4 , que es la función que ofrece un mejor compromiso entre el número de soluciones de cada tipo y el tiempo de procesamiento. Para definir un solución, se debe fijar el parámetro m , de esta manera, se han definido dos soluciones posibles:

- Solución de Máxima eficiencia, optimizando, a la vez, masa y rendimiento.
- Solución de Máxima Potencia.

	P3G28C	P4080	P12060	P8080	P307
m	8.5	9.3	8.7	8.8	9.0
X [m]	1.16	1.04	0.84	1.04	1.1116
Y [m]	1.52	1.44	0.90	1.44	1.5086
masa [kg]	51.5453	48.3193	48.2944	48.3193	48.4298
Potencia [W]	3068.8	3113.8	3098.5	3088.8	3087.8
Pérdidas Joule [W]	19.1953	18.5090	15.9342	18.2106	18.9194
Rendimiento Joule	0.9938	0.9941	0.9949	0.9941	0.9939
Caída Media [V]	0.3209	0.3105	0.2672	0.3080	0.3174
Caída Máxima [V]	0.4010	0.3925	0.3341	0.3893	0.4006

Tabla 6.1: Diseños optimizados para Máxima Eficiencia *FUENTE: Elaboración propia*

	P3G28C	P4080	P12060	P8080	P307
m	9.2	7.7	6.6	9.6	9.4
X [m]	1.12	1.16	0.96	1.04	1.1116
Y [m]	1.56	1.44	0.90	1.52	1.5086
masa [kg]	52.2622	49.3946	49.9218	50.47	49.4469
Potencia [W]	3111.3	3182.9	3202.6	3225.8	3152.4
Pérdidas Joule [W]	19.8537	19.5155	17.3876	20.2440	19.8985
Rendimiento Joule	0.9937	0.9939	0.9946	0.9938	0.9937
Caída Media [V]	0.3270	0.3207	0.2792	0.3273	0.3268
Caída Máxima [V]	0.4171	0.3936	0.3819	0.4221	0.4166

Tabla 6.2: Diseños optimizados para Máxima Potencia *FUENTE: Elaboración propia*

Capítulo 7

Presupuesto

Los gastos asociados a la realización del trabajo se recogen en la siguiente tabla, desglosados en tres tipos de asientos:

		T [h]	C/u [€/h]	C_{total} [€]
Investigación	<i>Documental</i>	40	12	480
	<i>Práctica</i>	80	12	960
Definición del trabajo	<i>Estudiante</i>	220	12	2640
	<i>Tutor</i>	10	30	300
Recursos	<i>Eléctricos</i>	400	0.2	80
	<i>Computacionales</i>	400	1.8	720
TOTAL				5180

Capítulo 8

Bibliografía

- Brown, Charles D. Elements of spacecraft design, American institute of aeronautics and astronautics. Inc., Reston, 2002.
- Caspar, Max. Johannes Kepler. Stuttgart, 1948.
- Curtis, Howard D. Orbital mechanics for engineering students. Butterworth-Heinemann, 2013.
- Gorove, Stephen. The geostationary orbit: Issues of law and policy. American Journal of International Law, 73(3):444–461, 1979.
- Hispasat, Web Oficial. [*Recurso Online*]. URL: <https://www.hispasat.com>.
- Hwang, Ho-Won and Jung, Joon-Sik. A review essay on legal mechanisms for orbital slot allocation. The Korean Journal of Air Space Law and Policy, 29(1):199–236, 2014.
- Finch, Michael J. Limited space: Allocating the geostationary orbit. Nw. J. Int'l L. Bus., 7:788, 1985.
- Lu, Yifan, Shao, Qi, Yang, Fei and Yu, Honghao. A review of the space environment effects on spacecraft in different orbits. IEEE access, 7:93473–93488, 2019.
- Montaña Romeu, Joaquin. Apuntes asignatura Sistemas e Instalaciones de vehiculos aero-espaciales. UPV, 2022.
- N2YO. Base de datos N2YO. [*Recurso Online*]. URL: <https://www.n2yo.com>.
- Patel, Mukund R. Spacecraft power systems. CRC press, 2004.
- Rankin III, Clyde E. Utilization of the geostationary orbit—a need for orbital allocation. Colum. J. Transnat'l L., 13:98, 1974.
- Reglamento de Radiocomunicaciones Volumen.I y apéndice 1S. UIT. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Edición, 1998.
- Sgobba, Tommaso. Safety design for space operations. Butterworth-Heinemann, 2013.