



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

SIMULACIÓN DE CARRERA DE VELOCIDAD DE MOTOS EN CIRCUITO INTERNACIONAL

Alumno/a: de la Cruz Expósito, Armando

Tutor/a: Prof. D. José Enrique Mata Bago
Dpto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2020



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica

Don Jose Enrique Mata Bago, tutor del Proyecto Fin de Máster titulado: Simulación de carrera de velocidad de motos en circuito internacional, que presenta Armando de la Cruz Expósito, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Noviembre de 2020

El alumno:

El tutor:

Armando de la Cruz Expósito

Jose Enrique Mata Bago

Agradecimientos

A todos y cada uno de los miembros del equipo de MotoStudent de las ediciones 17/18 y 19/20. No solo por enseñarme y apoyarme a realizar este proyecto, sino también todo lo que me habéis aportado en mi vida personal. Con especial cariño quiero mencionar a Pepe, Gonzalo, Jorge, Carlitos y Carlitos, os debo muchísimo.

Por otra parte, agradecerle a mi tutor, José Enrique, la paciencia y dedicación para el proyecto MotoStudent y para mi trabajo en especial, ya que un tema de investigación de este tipo nunca es fácil.

Por último, a mi familia y amigos por estar ahí en los momentos en los que me ha hecho falta un empujón y sufrir este trabajo casi tanto como yo.

SUMARIO

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. MOTIVACIÓN	2
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.3. RESUMEN DEL DOCUMENTO.....	6
2. ANTECEDENTES	10
2.1 INTRODUCCIÓN.....	10
2.2 COMPORTAMIENTO DINÁMICO Y DISEÑO DE CHASIS	10
2.2.1 <i>Neumáticos y adherencia</i>	10
2.2.2 <i>Aerodinámica</i>	14
2.2.3 <i>Frenada y frenada aerodinámica</i>	15
2.3 SIMULACIONES EN EL EQUIPO EPS-JAÉN UJATEAM	16
2.4 OTROS ESTUDIOS RELACIONADOS	18
3. MODELO TEÓRICO	24
3.1. MODELADO DE CIRCUITO DE VELOCIDAD	24
3.1.1 <i>Rectas y curvas</i>	24
3.1.2 <i>Alturas</i>	28
3.1.3 <i>Peraltes</i>	28
3.2 MODELO DE RECTAS	31
3.2.1 <i>Cálculo de frenada</i>	32
3.2.2 <i>Cálculo de aceleración</i>	34
3.3 MODELO DE CURVAS	37
3.3.1 <i>Cálculo de curva con frenada</i>	38
3.3.2 <i>Cálculo de curva a velocidad constante</i>	40
3.3.3 <i>Cálculo de curva con aceleración</i>	41
3.4 MODELO DE BATERÍAS	43
3.4.1 <i>Introducción</i>	43
3.4.2 <i>Resistencia interna de baterías</i>	44
3.4.3 <i>Curvas características</i>	44
3.4.4 <i>Capacidad consumida</i>	47
3.4.5 <i>Esquema resumen de capacidad consumida</i>	48
3.4.6 <i>Calor generado</i>	49
3.4.7 <i>Calor específico</i>	49
3.4.8 <i>Necesidad de refrigeración</i>	53
3.4.9 <i>Calor refrigerado en baterías</i>	59
3.4.10 <i>Calor almacenado e incremento de temperatura</i>	61
3.4.11 <i>Esquema resumen de pasos para incremento de temperatura en baterías</i>	63
3.5 MODELO DEL CONTROLADOR	65
3.5.1 <i>Introducción</i>	65
3.5.2 <i>Calor generado</i>	67
3.5.2.1 <i>Pérdidas por conducción</i>	67
3.5.2.2 <i>Pérdidas por conmutación</i>	69
3.5.2.3 <i>Datos del transistor de potencia</i>	70
3.5.3 <i>Calor refrigerado</i>	77
3.5.4 <i>Calor almacenado e incremento de temperatura</i>	82
3.5.5 <i>Esquema resumen del cálculo del incremento de temperatura en el controlador</i>	83
3.6 MODELO DEL MOTOR ELÉCTRICO.....	85
3.6.1 <i>Motor ENGIRO de MotoStudent 19/20</i>	85

3.6.2	<i>Mapa motor usado</i>	90
3.6.3	<i>Mapas isorendimientos</i>	92
3.6.4	<i>Calor generado</i>	95
3.6.5	<i>Calor refrigerado</i>	96
3.6.6	<i>Calor almacenado e incremento de temperatura</i>	101
3.6.7	<i>Esquema resumen del cálculo del incremento de temperatura en el motor</i>	103
3.8	CÁLCULO DE INTENSIDAD DEMANDADA	105
3.9	ESQUEMA DE INTERACCIÓN ENTRE LOS DIFERENTES MODELOS.....	107
4	VALIDACIÓN DEL MODELO TEÓRICO	110
4.1	INTRODUCCIÓN.....	110
4.2	VALIDACIÓN DE MODELO DE BATERÍAS.....	110
4.3	VALIDACIÓN DE MODELO DE CONTROLADOR.....	110
4.4	VALIDACIÓN DEL MOTOR	112
4.5	VALIDACIÓN DE CIRCUITO	113
4.5.1	<i>Pruebas circuito de Motorland 2018</i>	113
4.5.2	<i>Pruebas circuito de Jarama 2020</i>	117
5	RESULTADOS	122
5.1	PRUEBA DE ACELERACIÓN	122
5.2	PRUEBA DE VELOCIDAD MÁXIMA	126
5.3	PRUEBA DE VUELTA RÁPIDA (CLASIFICACIÓN).....	129
5.4	CARRERA.....	136
6	CONCLUSIONES	146
7	BIBLIOGRAFÍA	148
8	ANEXOS	150
8.1	OTROS ENSAYOS DEL CONTROLADOR.....	150
8.2	<i>RESULTADOS JARAMA PARA 21 kW</i>	151
8.3	<i>ESTUDIO DE CALOR GENERADO</i>	155
8.3.1	<i>Estudio basado en una geometría cilíndrica</i>	155
8.3.2	<i>Estudio basado en la geometría real con ANSYS</i>	162
8.3.3	<i>Comparación entre los dos estudios de refrigeración</i>	164
8.4	TABLAS Y DATASHEET	168

Capítulo I: INTRODUCCIÓN



1. Introducción

1.1. Motivación

Este trabajo se encuentra dentro de la competición de MotoStudent. Esta consiste en una competición bianual, en la cual, estudiantes de ingeniería de todo el mundo diseñan desde cero una motocicleta de competición. Durante un fin de semana completo, se realizarán una serie de pruebas, estáticas y dinámicas, para determinar cuál de todas ellas es la mejor. Se dividen en dos categorías: Petrol y Electric. Ambas tienen el mismo número y tipo de pruebas. Este estudio realizado en el equipo EPSJaen UJATEAM, participa en la categoría Electric. Las pruebas en las que se divide la competición se muestran a continuación:

Estáticas:

- Fuerza vertical progresiva sobre el asiento: 250 kg
- Fuerza horizontal progresiva en rueda delantera: 300 kg
- Prueba de frenado. Se comprobará el buen funcionamiento de los frenos debiendo de superar unos valores de:
 - Eje delantero: 0,30 kN
 - Eje trasero: 0,25 kN
- STATIC SCRUTINEERING. Se trata de diferentes pruebas relacionadas con los sistemas de seguridad eléctricos, como son:
 - Prueba del dispositivo de vigilancia de aislamiento
 - Prueba de medición de aislamiento
 - Prueba del circuito de desconexión
 - Prueba de lluvia

Dinámicas:

- Prueba de frenado. Evaluación de la distancia de frenado necesario para detener el prototipo por completo desde 80 km/h
- Prueba de aceleración máxima. Se medirá la aceleración máxima desde parado hasta recorrer 150 m

- Prueba de velocidad máxima. Obtener la velocidad máxima en un punto determinado del circuito. Esta se sitúa en la recta de atrás del circuito.
- Test de regularidad. Se tomarán 3 vueltas consecutivas y se analizará un sector en concreto (Sector 2), analizando la diferencia de tiempos entre una vuelta y las siguientes.
- Prueba de vuelta rápida. Durante 20 minutos los equipos tendrán entrenamientos cronometrados. En este tiempo deberán de establecer la vuelta más rápida posible al circuito de velocidad, estableciendo con ello la parrilla de salida.
- Carrera. Se desarrollará una carrera de 6 vueltas al circuito de velocidad recorriendo 30,5 km.

En las pruebas estáticas se evalúa la seguridad del prototipo. En el caso de que se superen los requisitos mínimos impuestos por la organización del evento, el equipo podrá competir en las diferentes pruebas dinámicas y luchar por los diferentes premios. En caso contrario, el equipo no podrá competir ya que se considerará que el prototipo no es seguro como para entrar en pista y soportar las distintas pruebas dinámicas.

Una vez superadas las pruebas estáticas, llegamos a las pruebas dinámicas. En estas se prueba la efectividad del prototipo diseñado en las pruebas mencionadas anteriormente. Con esto, se quiere evaluar qué motocicleta frena mejor, acelera mejor, llega a mayor velocidad punta, da una vuelta más rápida al circuito y puede completar más rápida una carrera de 6 vueltas. Obviamente, cada uno de estos apartados serán evaluados con diferente puntuación según define la Organización en su reglamento, siendo la más importante la carrera final.

Resulta evidente que, para conseguir tener la mejor motocicleta en todos estos aspectos, habrá que tener un buen diseño de chasis dónde incorporar todos los elementos y que soporte los esfuerzos que la competición exige, pero, también, hay que optimizar todos los parámetros para conseguir el mejor comportamiento posible. Se pueden poner ejemplos de estos parámetros como son la presión de los neumáticos, dureza de las suspensiones, relación de transmisión, mapas de motor... y un largo etcétera. La cuestión entonces es ¿Cómo se pueden hallar esos puntos óptimos y conseguir el mejor comportamiento posible? La respuesta sería: realizar pruebas en circuito probando diferentes configuraciones y comprobar

cuales se adaptan mejor. El problema, que no se disponen de medios para realizar pruebas infinitas en circuito hasta hallar esos óptimos.

Una explicación práctica de esto es la de tener un prototipo diseñado para una carrera de 6 vueltas más vuelta de formación y vuelta de honor. Por lo tanto, cuando se vaya a un circuito no se pueden realizar más de 6 vueltas seguidas sin tener que recargar. El tiempo de recarga es de aproximadamente 2 horas y media y las sesiones libres de media hora. Así pues, más de seis vueltas no se podrán testear en circuito. Otra opción será reducir la potencia incrementando la autonomía, pero entonces no probaríamos en las condiciones reales de carrera, haciendo que los resultados no sean del todo concluyentes.

¿Qué solución se puede aportar para ir al circuito y realizar solo las pruebas imprescindibles? Realizar simulaciones numéricas con las que encontrar los valores óptimos sin ir a un circuito. Con ello se consigue ahorrar tiempo en pista e ir con las ideas claras de cómo afecta los diferentes parámetros entre sí, siendo necesarias solo pruebas de comprobación in situ.

De la gran cantidad de parámetros que se pueden estudiar, se realizará un estudio sobre cómo afectan las diferentes relaciones de transmisión a los tiempos por vuelta, consumo de baterías y calentamiento de los componentes del tren motriz, además de la potencia máxima que podría entregar el motor de manera que el consumo de baterías no llegue a 0. Todas estas estimaciones generarán una gran cantidad de datos muy útiles a la hora de tomar decisiones en el circuito, dependiendo de las condiciones climáticas, piñones y coronas disponibles en el circuito o estado del tren motriz.

Definiremos como tren motriz al conjunto de componentes en un vehículo que transforman energía y lo convierten en desplazamiento sobre el terreno. En el caso de una motocicleta eléctrica constará de los siguientes componentes: acumulador de energía, controlador, motor y transmisión. Cada uno de ellos tiene su propia función para conseguir el movimiento de la motocicleta, las cuales describiremos a continuación:

- **Acumulador de energía:** es un dispositivo capaz de almacenar la energía que más tarde se usará para transformarla en movimiento. La energía se almacenará con el uso de baterías, las cuales, mediante una reacción química, producen la electricidad

que alimentará el motor. El tipo de corriente que genera estas baterías será de tipo continua

- Controlador o Inversor: dispositivo encargado de la transformación de corriente continua proveniente de las baterías en corriente alterna trifásica que alimenta el motor. La corriente y frecuencia de salida hacia el motor irá cambiando en función de las revoluciones y del par asignado a dichas revoluciones. Esta relación entre par y revoluciones se realizará con un mapa motor
- Motor: dispositivo encargado de transformar la energía eléctrica en energía mecánica que proporcionará el movimiento al prototipo. Se alimentará de corriente alterna trifásica
- Transmisión: conjunto de elementos que tienen como misión hacer llegar el giro del motor a las ruedas del vehículo. Estará formada por una serie de piñones y coronas unidas por una cadena

Estudiar cada uno de estos componentes proporcionará un conocimiento sobre cómo se comportan ante ciertas variaciones y encontrar su punto óptimo de trabajo. Tras esto, se podrá estudiar cómo interactúan entre ellos y conseguir un óptimo global, que consistirá en hacer el mejor tiempo, gastando la mínima batería y controlando la temperatura de todos los componentes de dicho tren motriz.

Por último, todos estos datos que se extraen pueden ser también de gran utilidad a la hora de realizar el diseño del prototipo, ya sea para estudiar la necesidad de refrigeración de alguno de los componentes como puede ser la relación peso – acumulación de energía óptima.

1.2. Objetivos

Para lograr el objetivo de desarrollar una herramienta de simulación de motocicleta en circuito de velocidad utilizando el método de tiempos finitos y poder hallar así la relación de transmisión óptima según el tipo de prueba a desarrollar en la competición de MotoStudent, se han determinado esta serie de objetivos parciales:

- Discretización de la pista de velocidad en tramos según sean rectas o curvas, analizando su longitud, radio de curva, alturas y peraltes (si los hubiese o fuesen conocidos)
- Crear un modelo que simule el comportamiento del prototipo en una recta, realizando tanto la aceleración como frenada que realizaría el piloto

- Crear un modelo que simule el comportamiento del prototipo en una curva, realizando los cálculos de velocidad de paso por dicha curva, inclinación del prototipo y aceleración a final de curva
- Crear un modelo del comportamiento de las baterías, incluyendo cálculos de consumo, tensiones, intensidad, pérdidas por efecto Joule, calentamiento y evacuación del calor refrigerado
- Crear un modelo del comportamiento del controlador, incluyendo cálculos de pérdidas por efecto Joule, calentamiento y evacuación del calor refrigerado
- Crear un modelo del comportamiento del motor, incluyendo cálculos de par, velocidad, consumo, intensidad, pérdidas por efecto Joule, calentamiento y evacuación del calor refrigerado
- Estudiar las relaciones entre los diferentes modelos y cómo interactúan entre ellos
- Realizar diferentes ensayos al motor para obtener datos de rendimientos
- Estudiar los manuales y Datasheets de los diferentes componentes del tren motriz
- Validación de los modelos teóricos con pruebas en circuito

1.3. Resumen del documento

El primer capítulo de este es esta introducción donde se ha descrito en qué consiste la competición de MotoStudent y cuál es la motivación para realizar este estudio. Además, se han fijado una serie de objetivos para alcanzar el estudio de una simulación de carrera.

En el segundo capítulo se ha realizado una búsqueda de información para conocer el estado del arte de las simulaciones, bibliografía relacionada con diseño y comportamiento dinámico de una motocicleta y conocimientos conocidos dentro del equipo EPS JAEN UJATEAM.

En el tercer capítulo se han desarrollado los diferentes estudios teóricos. Se comenzó por el estudio de los circuitos para obtener los datos de partida de las simulaciones. También, cómo se comporta una motocicleta en un determinado circuito dadas sus condiciones, diferenciando el comportamiento entre una recta y una curva. Para finalizar, se ha realizado un estudio del tren motriz, en los que se incluyen el estudio de las baterías, el controlador y el motor.

En el cuarto capítulo se han validado las bases teóricas obtenidas en el capítulo tres, realizando ensayos en el banco de ensayos y circuito, dando por satisfactorio la relación entre teoría y práctica.

En el quinto capítulo se han desarrollado las estimaciones de las pruebas en el circuito de Motorland para la edición 19/20. Estas pruebas simuladas son: prueba de aceleración, prueba de velocidad máxima, prueba de vuelta rápida (clasificación) y carrera. En ellas se han obtenido las relaciones de transmisión óptimas, las velocidades máximas, el consumo de batería y calentamiento del tren motriz.

En el sexto capítulo se muestran las conclusiones más reseñables de este estudio. Influencia del factor humano, relación entre relación de transmisión y aumento de temperatura del tren motriz... además de una tabla resumen de las relaciones óptimas para el circuito de Motorland.

En el séptimo capítulo se menciona la bibliografía utilizada, tanto el uso de libros académicos como el de papers relacionados con nuestro tema.

En el octavo capítulo se han incluido una serie de informaciones adicionales de consulta relacionados con el tema los cuales no son principales para entender cómo se ha realizado este trabajo.

Capítulo II:

ANTECEDENTES



2. Antecedentes

2.1 Introducción

En este apartado se expondrán los diferentes datos desde lo que se parte el estudio, empezando por explicaciones de libros de dinámica de vehículos, manuales de los componentes, datasheet, etc. También se mostrarán algunos datos que vienen impuestos por diseño del prototipo y que no son competencia de este estudio modificar.

2.2 Comportamiento dinámico y diseño de chasis

El libro “*Comportamiento dinámico y diseño de chasis*”(Foale, 1984) muestra las claves del comportamiento dinámico de una motocicleta y soluciones al diseño que se han ido realizando a lo largo de la historia. Da unas herramientas genéricas que pueden servir para estudiar cualquier motocicleta con algunas ideas básicas de adherencia, suspensiones, chasis... las cuales son muy útiles cuando se habla del estudio dinámico en un circuito como es este estudio.

No todo lo que aparece en ese libro es de interés para este caso, por lo que se realizará un resumen de los aspectos que condicionan el comportamiento dinámico y cómo afectan al estudio de los tiempos por vuelta en circuito.

2.2.1 Neumáticos y adherencia

El neumático es el elemento que mantiene en contacto la motocicleta y el asfalto. Esta unión permite que la fuerza de empuje del motor se transmita al suelo provocando el movimiento del mismo. En la situación contraria tenemos los frenos, los cuales reducen la velocidad de las ruedas y, por la fricción entre el asfalto y los neumáticos, reducen la velocidad de la moto. En varias ocasiones se menciona que la fuerza máxima que se puede transmitir al suelo es el equivalente a 1G, es decir, una aceleración máxima de 9.81 m/s^2 . Esto se corresponde con una *fuerza límite de adherencia*. El valor de 1G que propone viene de multiplicar la fuerza de la gravedad por el coeficiente de fricción del neumático, que de

manera estándar se suele tomar con valor igual a 1. No siempre es así, debido a factores como el tipo de compuesto del neumático, temperatura o estado de la pista (seco o mojado). Como valores estándares se pueden considerar de 0,8 hasta 1,25.

$$\text{Fuerza de adherencia máxima} = \mu * g$$

El límite de fuerza de adherencia se traduce en que el neumático no puede soportar más de esa fuerza total, por lo que se nos explica que el efecto conjugado de todas las fuerzas que esté soportando no puede superar dicho límite. Con esto podemos decir que, por ejemplo, si consumimos el máximo agarre potencial en vencer la fuerza centrífuga, no podremos acelerar ni frenar, ya que introducimos una fuerza extra que superaría esa fuerza y derraparía o se caería el piloto. La explicación gráfica de este efecto es lo que llama *circulo delimitador de rozamiento máximo*.

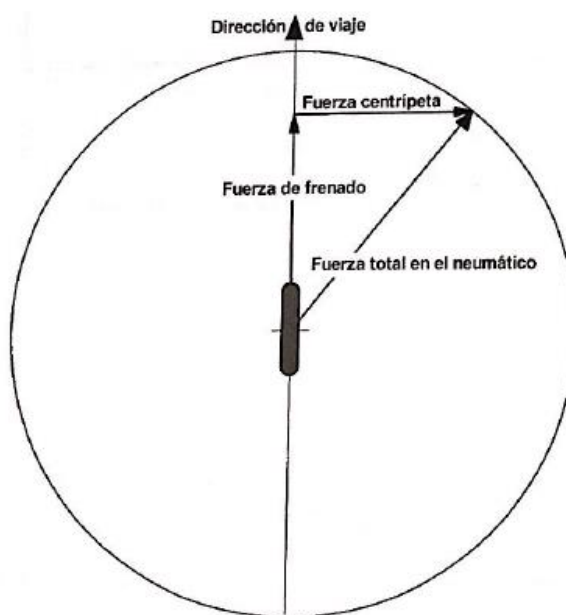


Ilustración 1 - Círculo delimitador de rozamiento máximo del neumático (T. Foale)

La fuerza centrífuga que aparece en las motocicletas se produce al tomar las curvas e intenta expulsarla hacia el exterior de esta. Esto se produce por la primera ley de Newton, que establece que todo cuerpo permanecerá en reposo o moviéndose a velocidad constante en línea recta, a menos que una fuerza externa le haga cambiar. Por tanto, ese cambio de dirección genera esta fuerza que se tendrá que contrarrestar. La manera de tomar una curva

será la de tumbar la moto en la misma dirección de la curva, de manera que el propio peso contrarreste dicha fuerza.

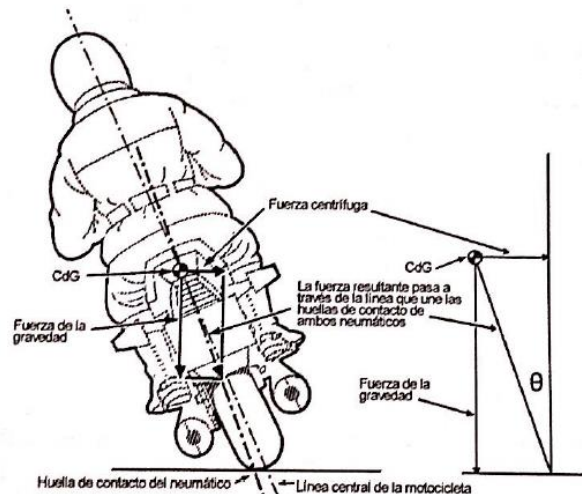


Ilustración 2- Equilibrio en una curva (T. Foale)

Para simplificar los cálculos se toma como origen de las fuerzas en el centro de gravedad. En ella aparece la fuerza centrífuga hacia afuera, provocada por el cambio de dirección. Hacia abajo aparece la fuerza peso, siendo esta la suma del peso de la moto más el peso del piloto. La inclinación que debe de mantener el piloto tiene que ser tal, que la dirección resultante de ambas fuerzas coincida con la línea central de la moto. De esta sencilla manera se puede estimar cuanto se debe de inclinar la moto para tomar una determinada curva a una cierta velocidad. Ahora sería necesario saber calcular dicha fuerza centrífuga.

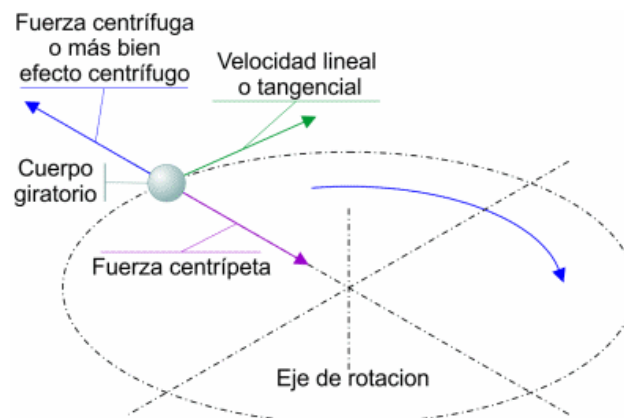


Ilustración 3 - Fuerza centrífuga

Se necesitará para calcularla un punto o eje de rotación, el radio de la curva, la velocidad a la que circula y su masa.

$$F_{centrífuga} = m * a = m * \frac{v^2}{R}$$

Siendo:

- m: la masa del cuerpo (kg)
- a: aceleración (m/s^2)
- v: velocidad lineal (m/s)
- R: radio de la curva o distancia al eje de rotación

Hasta ahora se ha planteado el caso de que, conociendo la masa, la velocidad y el radio de curvatura, podemos calcular la fuerza centrípeta y por tanto la inclinación necesaria para pasar por una determinada curva... ¿Pero si se quiere conocer la velocidad máxima a la que se puede pasar por una determinada curva? Para ello, habrá que utilizar los conceptos desarrollados anteriormente.

- 1) Se supone que todo el agarre disponible se “consume” en vencer la fuerza centrípeta, por lo que:

$$F_{centrífuga} = m * g * \mu$$

- 2) Se igualan con la ecuación de la fuerza centrífuga:

$$m * g * \mu = m * \frac{v^2}{R}$$

$$g = \frac{v^2}{R}$$

$$v = \sqrt{g * R * \mu}$$

Con esta sencilla expresión se puede conocer la velocidad máxima a la que se puede pasar por una determinada curva, siendo un dato fundamental para las simulaciones de vuelta al circuito de velocidad.

2.2.2 Aerodinámica

Cuando una motocicleta se mueve a una cierta velocidad a través del aire, aparece una fuerza de rozamiento que intenta impedir el movimiento. Esta fuerza se debe a una diferencia de presiones entre la parte delantera y trasera de la motocicleta. La diferencia actúa en el área frontal de la moto dando lugar a la resistencia aerodinámica, por lo que, si esta zona es mayor, incurrirá en mayores pérdidas. Debido a la viscosidad del aire produce una fricción en la superficie de contacto con la moto y el piloto. En esa superficie la velocidad del aire es igual a la de la moto y va arrastrando a las capas adyacentes, pero conforme nos vamos alejando, este efecto se va reduciendo hasta ser prácticamente nulo. Esta zona con diferentes velocidades se conoce como *capa límite* y tiene una gran importancia en las propiedades aerodinámicas del vehículo.

En cuanto a la manera de calcular ese rozamiento y la resistencia que opone, se usa la siguiente ecuación:

$$P_{aerodinámica} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * C_d A$$

Siendo:

- ρ : densidad del aire en (kg/m^3)
- v : velocidad de la moto (m/s)
- C_d : parámetro adimensional
- A : área frontal (m^2)

El parámetro C_d es un parámetro adimensional utilizado para comparar numéricamente las cualidades aerodinámicas de objetos de distintas formas. Normalmente para comparar diferentes motos, lo más indicado es multiplicar el parámetro C_d por el área frontal A , que será el *área efectiva*. Los valores para motos suelen variar entre 0.15 hasta 0.57 m^2 para piloto tumbado y entre 0'43 y 0'75 m^2 para piloto sentado.

Como conclusión se puede obtener que es necesario realizar un estudio para conocer cuánto es realmente $C_d A$ ya que influye enormemente en las pérdidas aerodinámicas. Estas pérdidas de potencia se incrementan al cubo de la velocidad, por lo que a velocidades altas generará una gran pérdida y, por tanto, una menor velocidad punta.

2.2.3 Frenada y frenada aerodinámica

La definición más básica posible para explicar los frenos es que se trata de un elemento que se encarga de transformar la energía cinética de dicho vehículo en energía térmica (calor). Algunas veces una pequeña parte se puede transformar en sonido y en luz, pero es prácticamente despreciable.

La energía cinética es la energía que tienen los objetos en movimiento y dependen de la masa de dicho objeto y de la velocidad al cuadrado. Para pasar de una velocidad a otra, habrá que eliminar la diferencia de energía cinética de una velocidad (1) a otra velocidad (2). Para realizar esa transformación los frenos la convierten en energía térmica. Esto cuenta con la limitación de $\mu * g$ de la adherencia de los neumáticos, ya que a mayor aceleración derraparía y destrozaría el neumático.

No obstante, no son los únicos que actúan, ya que la propia resistencia aerodinámica libera a los frenos de tener que liberar toda esa energía. Como se mostró anteriormente, esta resistencia incrementa con la velocidad al cubo, por lo que a altas velocidades reducen mucho la carga sobre los frenos. Una gráfica explicativa que da T. Foale es una máquina de carreras ficticia de 200 kg y $0,3 \text{ m}^2$ de $C_d A$, viendo como variando la velocidad varía la resistencia aerodinámica y la capacidad de frenado en unidades de gravedad o fuerza G.

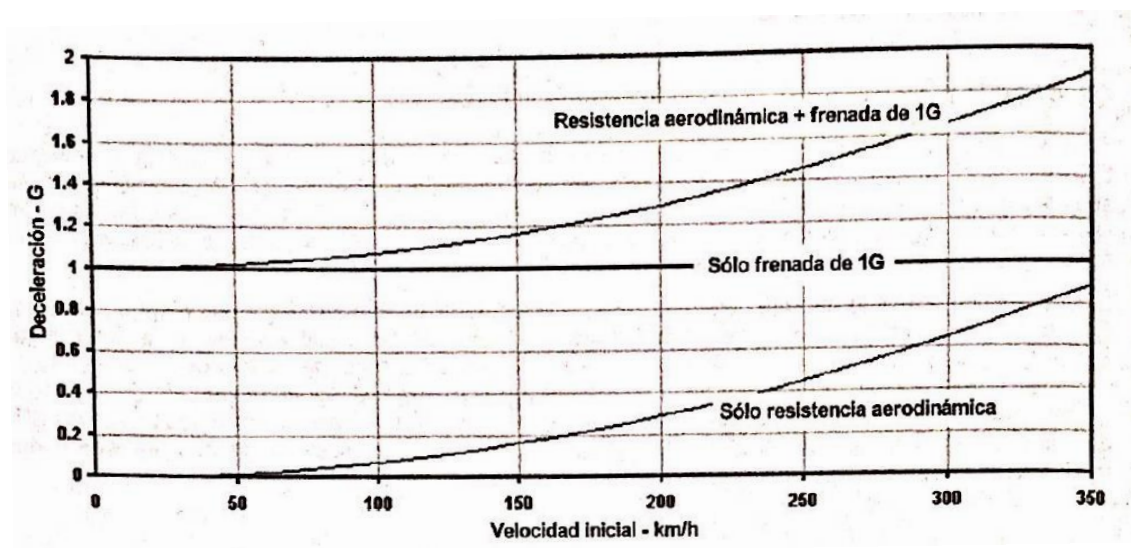


Ilustración 4 - Gráfica comparativa de frenada y frenada aerodinámica

2.3 Simulaciones en el equipo EPS-Jaén UJATEAM

Antes del presente trabajo ya se habían desarrollado otros programas de simulación para encontrar la relación de transmisión óptima dentro del equipo de MotoStudent. Estos abrieron camino al presente trabajo y ayudaron al entendimiento del comportamiento dinámico de una motocicleta en circuito. Los dos principales componentes del equipo que trabajaron en este terreno fueron: M. Alcázar (2015/16) y D. Bonillo (2016/18).

Se comenzará por el trabajo de M. Alcázar. Él consiguió desarrollar un programa en MatLab con el que calcular diferentes relaciones de transmisión para las pruebas de aceleración y velocidad máxima. Para ambos casos seguía la misma metodología, un modelo de tiempos finitos imponiendo valores iniciales de una velocidad, que dependería del tipo de prueba, y una posición recorrida igual a 0.

$$x(t = 0) = 0$$

$$v(t = 0) = 0 \text{ (Prueba aceleración)}$$

$$v(t = 0) = 85 \text{ (Prueba velocidad máxima)}$$

Realizando una diferencia entre la potencia desarrollada por el motor y las potencias de pérdidas, como son las potencias de: inercia, aerodinámica, peso y rodadura, obtenía la aceleración del prototipo.

$$P_{motor} = T_{motor} * \omega_{motor} * \eta$$

$$P_{inercia} = m' * a * v$$

$$P_{aerodinámica} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * C_d A$$

$$P_{peso} = m * g * \sin(\alpha)$$

$$P_{rodadura} = m * g * C_r * v$$

$$a = \frac{T_{motor} * \omega_{motor} * \eta - \left(\frac{1}{2} * \rho * v^3 * C_d A + m * g * \sin(\alpha) + m * g * C_r * v \right)}{m' * v} \leq \mu * g$$

- T_{motor} : Par en el eje del motor (función de la velocidad de giro) (N·m)
- ω_{motor} : Velocidad de giro del motor (rad/s)
- η : Rendimiento de la cadena cinemática (adim.)
- m' : Masa reducida del sistema (incluye inercias de ruedas y motor) (kg)
- a : Aceleración lineal del sistema (m/s^2)
- v : Velocidad lineal del sistema (m/s)
- ρ : Densidad del aire (kg/m^3)
- $C_d A$: Producto del coeficiente de arrastre por el área frontal de la moto (m^2)
- g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)
- α : Pendiente del firme (rad)
- C_r : Coeficiente de rodadura. Equivale a la pendiente que generaría la misma resistencia que la propia resistencia a la rodadura. Según bibliografía, toma valores del orden de 1/70

Durante un intervalo de tiempo dado supone que es constante esa aceleración, calculando la velocidad y posición en el siguiente intervalo como:

$$v_{i+1} = v_i + a_i * t$$

$$x_{i+1} = x_i + v_i * t + \frac{1}{2} * a_i * t^2$$

Con esta resolución de intervalos finitos, conseguía estimar el tiempo que tardaba en recorrer una cantidad de metros, propia de la prueba que estuviese realizando. Se recordará que para la prueba de aceleración máxima se recorren 150 m y desde la última curva hasta el SpeedTrap del circuito de Motorland son 660 m.

Probando diferentes relaciones de transmisión y viendo el tiempo que se conseguían con cada una de ellas, se llegaba a un tiempo mínimo con una relación de transmisión concreta, que sería la solución óptima.

Se pasará al trabajo realizado por D. Bonillo (2016/18). Él consiguió realizar el estudio de una vuelta completa al circuito de Motorland, dividiéndolo en secciones rectas y curvas. Las secciones rectas serían simuladas tal y como realizó M. Alcázar. Sin embargo, las curvas las estudiaría como tramos de velocidad constante, limitadas por el límite de adherencia como se

mencionaba en el apartado 2.2.1 *Neumáticos y adherencia*. Con ello, consiguió estimar una vuelta rápida y su relación de transmisión óptima para este caso.

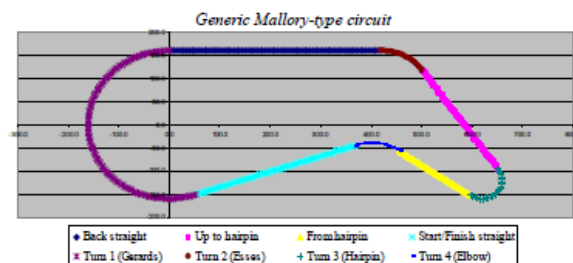
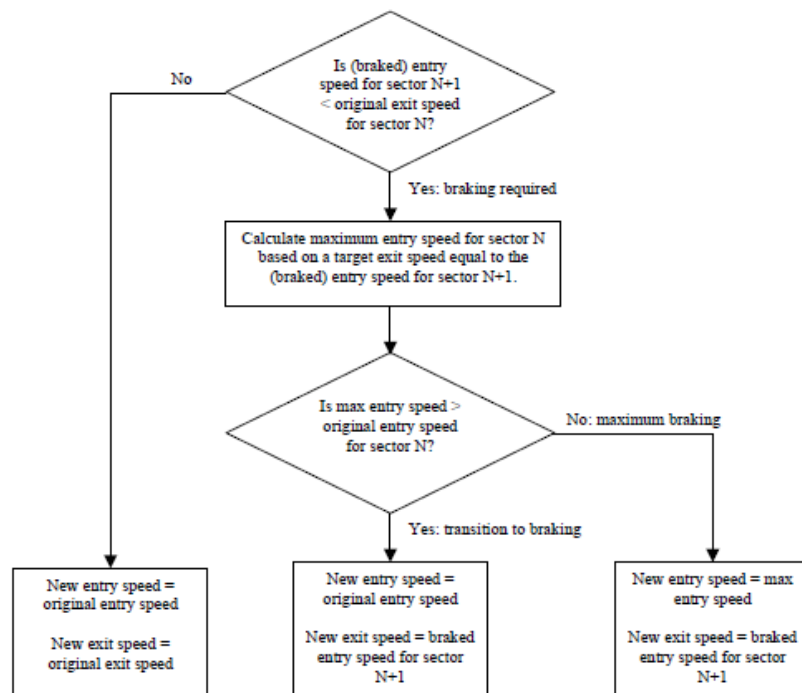
También se conoce que consiguió estimar la energía consumida en circuito y la relación de transmisión óptima para diferentes pruebas en circuito, pero debido a no dejar ninguna documentación no se podrán comparar o tomar de referencia su estudio con este. A pesar de eso, se considera la primera persona en realizar este tipo de simulación en el equipo y motivación para aprender y mejorar dichas simulaciones.

2.4 Otros estudios relacionados

En este apartado se mencionarán otros estudios relacionados con el presente estudio. También es cierto que es complicado encontrarlos debido al gran secretismo entre los equipos y evitar así filtraciones de datos a sus competidores. A pesar de esto se encontraron tres referencias que mencionar:

- 1) Un estudio realizado llamado *Lap Time Simulation*(Hakewill, 2000)habla sobre los aspectos mencionados en el libro de Tony Foale, pero aplicado a coches en circuito. Aspectos como la adherencia, velocidad máxima de curvas, frenadas y efecto de la aerodinámica son mencionados y explicadas con sus respectivas ecuaciones. Debido a estar orientado a coches en vez de a motocicletas, hace que no sea del todo relevante para este estudio, por el hecho de que las dinámicas de ambos no son iguales. A pesar de eso, es una lectura interesante para conocer las diferencias y coger algunas referencias como diagramas de flujo para frenadas en programas de simulación o discretización de circuitos en zonas de rectas y curvas.

Flow diagram for braking



A simple plot of the data from the model against distance travelled is shown below:

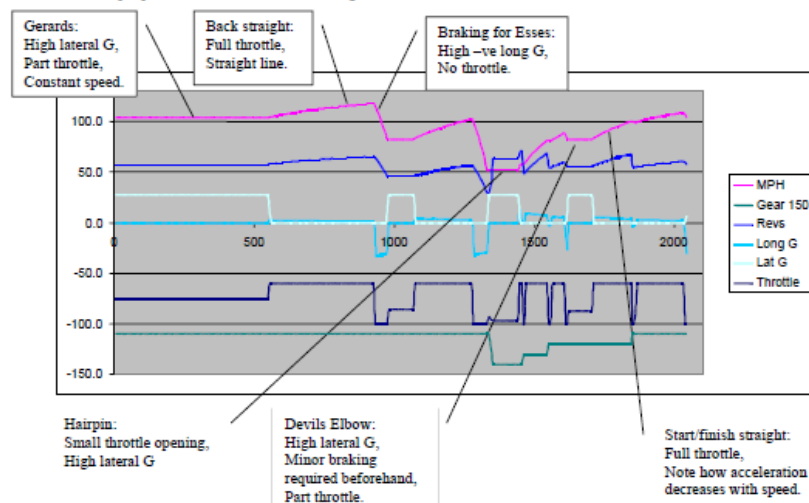


Ilustración 5 - Gráficas de Lap Time Simulation (J. Hakewill)

- 2) Se encontró un vídeo llamado *Steady-StateLap Time Simulation* realizado por Martin Arndt, Andreas Metz y Francisco Sevilla, pertenecientes al equipo TUFast Racing Team, equipo de FormulaStudent. Este vídeo promocionado por la herramienta MATLAB muestra como utilizan dicho programa para mejorar las decisiones de diseño, para estudios de sensibilidad de parámetros, comparaciones generales de conceptos de vehículo y estudios de eficiencia aerodinámica.

Durante el vídeo muestran una interfaz gráfica en la que pueden ir cambiando parámetros de entrada relacionados con el vehículo y ver cómo se comportaría según sus cálculos. No muestran en ningún momento ninguna ecuación ni código del propio programa realizado, solo gráficas de resultados.

Es interesante remarcar como en las opciones entran la posibilidad de modificar datos como suspensiones, chasis o del tren motriz. Para este trabajo solo se estudiará el efecto del tren motriz y sus variaciones, pero podría llegar a incluirse en actividades futuras más elementos como los que han realizado este equipo de FormulaStudent.

Enlace: <https://es.mathworks.com/videos/matlab-and-simulink-racing-lounge-steady-state-lap-time-simulation-116109.html>

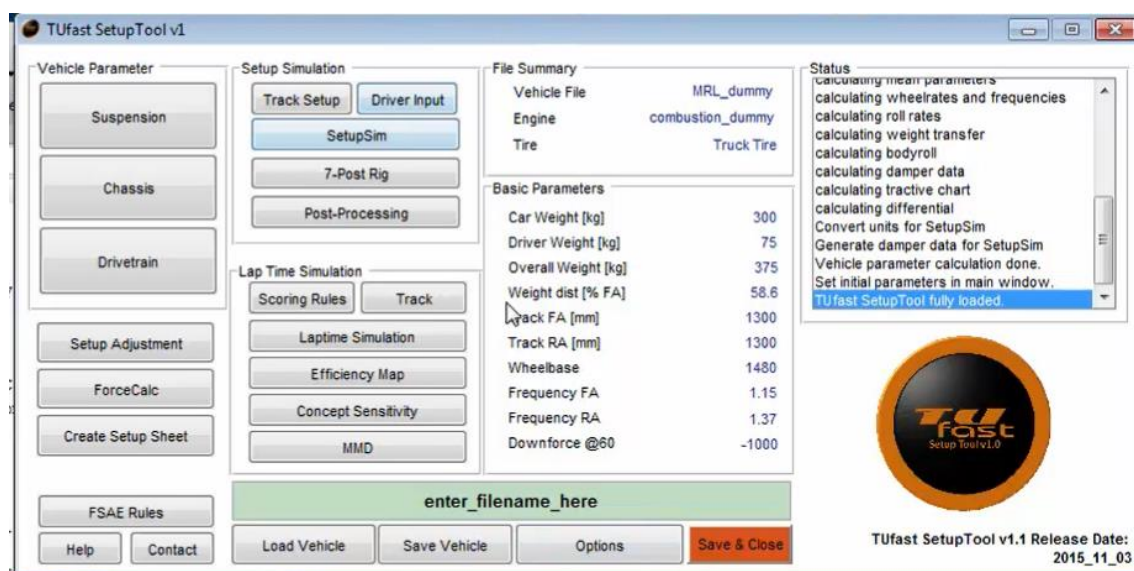


Ilustración 6 - Interfaz gráfica del equipo TUFast

- 3) OpenLap Lap Time Simulator. En mayo de 2020 salió a la luz un programa llamado *OpenLAPLaptimeSimulation Project*, por Michael Chalkiopoulos. Un programa libre realizado en MATLAB para realizar simulaciones de coches en diferentes circuitos. Para conocer cómo funciona, creó una lista de YouTube donde ver los diferentes módulos y qué cálculos realiza. Un programa muy completo y donde a diferencia del caso anterior, si menciona todas las ecuaciones relativas al cálculo de velocidades, paso por curva, adherencia, aerodinámica... pero relativos a coches también.

Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=WWaouT6EhJ0&list=PLQiPsAzoaLqUtdVImOM4WjzoYrNUy7fve>

Capítulo III:

MODELO

TEÓRICO



3. Modelo teórico

3.1. Modelado de circuito de velocidad

En este apartado se desarrollará como se procedió para modelar un circuito de velocidad, dato base del que se partirá para obtener cómo se comporta el prototipo en un determinado circuito. El procedimiento es igualmente válido para cualquier tipo de circuito, por lo que se podrán analizar los principales circuitos dónde se realizarán pruebas con el prototipo de equipo EPS JAEN UJATEAM. Los circuitos a analizar serán MotorLand (Aragón) y Jarama (Madrid). El principal explicado será el circuito de MotorLand por ser el principal de la competición, en los anexos se incluirán los resultados del circuito del Jarama.

3.1.1 Rectas y curvas

La modelación de circuito consiste en discretizar la trazada que realizan los pilotos en diferentes rectas y curvas, definiendo recta como parte del circuito que el piloto recorre en línea recta sin inclinar la moto y curva como parte del circuito que el piloto realiza con la moto inclinada cambiando su dirección. Tras esta diferenciación, se puede obtener en cada una de esos tramos la longitud, radio de curvatura, altitud y peralte.

Para el caso de MotorLand se dispone de los planos del circuito, incluyendo los radios de las curvas, longitud de las rectas, altura de cada punto a lo largo del circuito y peraltes.

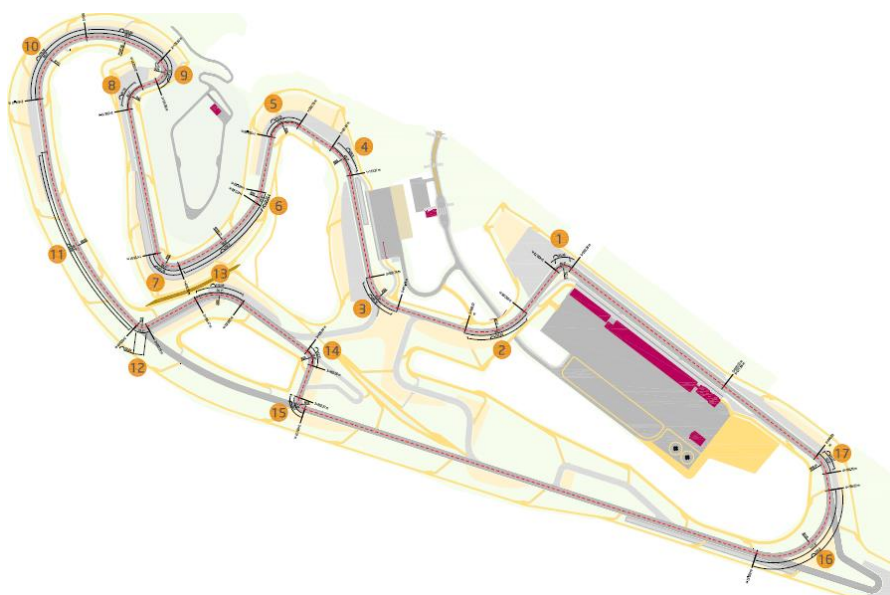


Ilustración 7 - Circuito de Motorland (Alcañiz)



An aerial photograph of the MotorLand Aragón complex. The image shows several racing tracks, including the 'MotorLand Aragón Completo para el motor y la competición' (red pin), 'Peddcock Motorland' (green pin), 'MotorLand GT' (orange pin), and 'MotorLand Grade 1C' (blue pin). A large building is labeled 'Pelouse MotorLand Grando temporaneamente' (blue pin). The complex is surrounded by a mix of green grass and brown earth. A yellow label 'TV-V7033' is visible in the top right corner.

Se partirá de una foto del circuito obtenida por Google Maps con la mayor resolución posible, de manera que se puedan ver con claridad todos los límites de la pista y diferentes

referencias que pueden ser de importancia como carteles o pianos. Al realizar esta fotografía, es importante poner un marcador de distancia para luego escalar la foto. Normalmente, se realizará una línea de 50 o 100 m sobre el mapa.



Ilustración 10 - Realización de escalado del circuito en SolidWorks

Tras esto, se introduce en el programa SolidWorks dicha foto. Se escalará de manera que la longitud de la línea de la foto (50 m según Google) se corresponda con una línea dibujada en SolidWorks de la misma longitud (50 mm en el ejemplo). Con esto se consigue que cualquier línea dibujada en mm se corresponda con la misma medida en m en el circuito real.

Estando ya escalado, se puede pasar a dibujar las trazadas de los pilotos, con las diferentes curvas y rectas. Intuitivamente se pueden obtener conociendo que queremos obtener el mayor radio posible en las diferentes curvas sin salirnos de los límites de la pista. Es una de las opciones y se pueden obtener buenos resultados, pero siempre es más fiable ver cómo traza el circuito un piloto profesional. Para ello, se han encontrado varios videos de cámaras OnBoard realizando el circuito de MotorLand, del cual obtener puntos de frenada, puntos dónde inclina la moto y velocidades límite de dichas curvas. Se dejan a continuación dos enlaces que sirvieron para dicho propósito.

- 1) Aragón 2014 - Yamaha OnBoard

https://www.youtube.com/watch?v=IOU_VLMjYgc

- 2) GoPro™ OnBoardlap of MotorLandAragón

<https://www.youtube.com/watch?v=b4AtXtjRYVE>

Se analizó el circuito a través de los vídeos y la foto en SolidWorks. Se dibujaron diferentes líneas rectas y curvas que representan dichas trazadas que realizaban los pilotos completando una vuelta al circuito. Se realizó intentando aproximarlos máximo posible a la realidad, pero, obviamente, cada piloto tiene una forma de trazarla y según la vuelta tener

distintos puntos de frenado, por lo tanto, es un dato estimado de esos puntos. A pesar de eso, no suelen cambiar demasiado los resultados debido a que el error relativo es pequeño, por ejemplo, equivocarnos en 1 metro respecto a una recta de 300 metros, como la recta principal, supone un error de un 0,3%.

Analizando las vueltas de los pilotos profesionales, se concluyó que la mejor forma de analizar una curva no es analizarla como una sola curva con un solo radio de curvatura, sino como si fuesen dos seguidas. Esto se explica porque realmente la forma de realizar las curvas los pilotos es una elipse, pero el cálculo se vuelve tremendamente complicado. Para simplificarlo, se simplifica como una circunferencia. El problema que surge de esta simplificación es que los pilotos, al pasar el vértice de la curva, aceleran para salir rápido de la curva y tomar con velocidad la siguiente recta. Para ello, cambian ligeramente el radio de curvatura para poder obtener dicha aceleración del neumático. Esta explicación y su aplicación será explicada en el apartado 3.7) *Modelo de curvas*. Por tanto, se modelará las curvas como si se tratasen de dos, una de un primer radio de curvatura que definirá la velocidad máxima de la curva, y una segunda que modelará la salida de curva con su correspondiente aceleración.

El resultado que se obtienen de este estudio relacionado con el circuito es la siguiente imagen, la cual es la trazada que simularemos con nuestro programa.

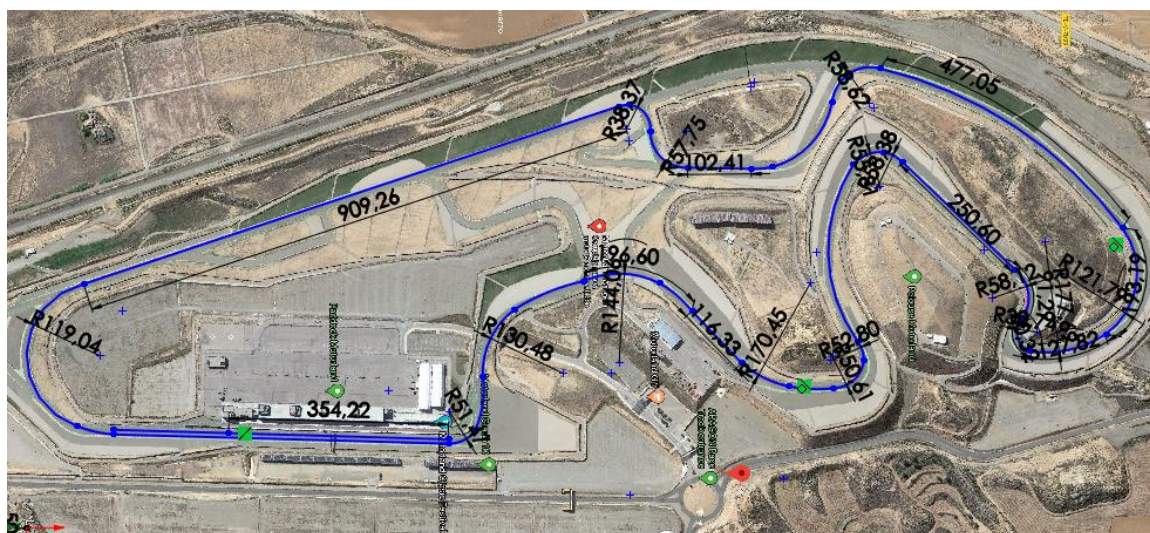


Ilustración 11 - Diferentes tramos del circuito de Motorland, representando la trazada del piloto

No están incluidas todas las cotas para no dificultar la visión del mismo, pero si para dar una imagen del trabajo que se realizó.

3.1.2 Alturas

En cuanto a las alturas en los diferentes puntos, se analizó los datos de la planimetría del circuito. En él, nos representan las alturas de todo el circuito, remarcando ciertos puntos importantes como son las entradas y salidas de curva.

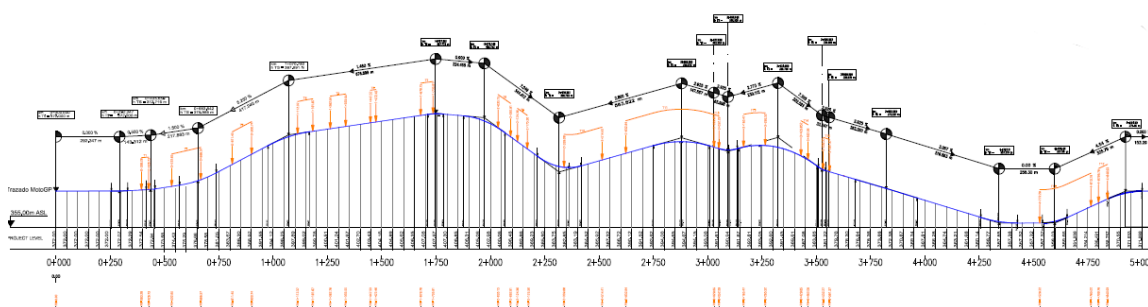


Ilustración 12 - Altura sobre el nivel del mar de cada punto del trazado de Motorland

Para el caso de Motorland, simplemente se han elegido los puntos de entrada y salida de tramo utilizando esa planimetría, almacenando esos datos de circuito. Obviamente, no en todos los circuitos tenemos la posibilidad de tener su planimetría, así que, como método opcional, está el uso de Google Earth, el cual, nos muestra la altura de cada punto respecto del nivel del mar. Puede ser una buena primera aproximación en caso de falta de datos, aunque no es demasiado recomendable por el hecho de dar los datos de metro en metro, sin decimales.

3.1.3 Peraltes

Hasta ahora se ha supuesto que la pista puede tener un desnivel en el plano longitudinal, lo cual afectará a la potencia empleada en acelerar. Al mismo tiempo, no solo existe ese desnivel longitudinal, sino también transversal llamado peralte. Este otro tipo de desnivel no afecta a la potencia entregada en acelerar, sino en la velocidad máxima que se puede tomar una curva.

Para manejarse en problemas más complejos de rozamiento es mejor usar el ángulo de rozamiento ϕ_r en lugar del coeficiente μ .

$$tg(\phi_r) = \mu \rightarrow \phi_r = \arctg(\mu)$$

Siendo:

- ϕ_r ángulo de rozamiento
- μ coeficiente de rozamiento

El ángulo de inclinación teórico de la moto es el ángulo formado entre la inclinación de la moto y la dirección normal del suelo. Se refiere a teórico por estar referido al punto de contacto entre la rueda-suelo con el centro de gravedad de masas. Este ángulo es ϕ . El máximo ángulo que puede alcanzar hasta el límite de deslizamiento es $\phi_{max} = \phi_r$. Si se analiza la igualdad anterior, para un $\mu = 1$ el ángulo de rozamiento será $\phi_r = 45^\circ$. Para otros valores de rozamiento, superiores o inferiores, corresponderá con otro ángulo distinto. Por tanto, se observa cómo influye el rozamiento en la inclinación máxima que puede alcanzar la moto, y, por consiguiente, la velocidad a la que puede pasar por dicha curva.

Cabe considerar, por otra parte, que no solo influye el ángulo de rozamiento, sino que existe otro ángulo más, este es el ángulo del peralte. Este ángulo mayor a los efectos del ángulo de rozamiento. Por lo tanto, el ángulo total inclinado será $\phi + \beta$, siendo β el ángulo que forma el peralte.

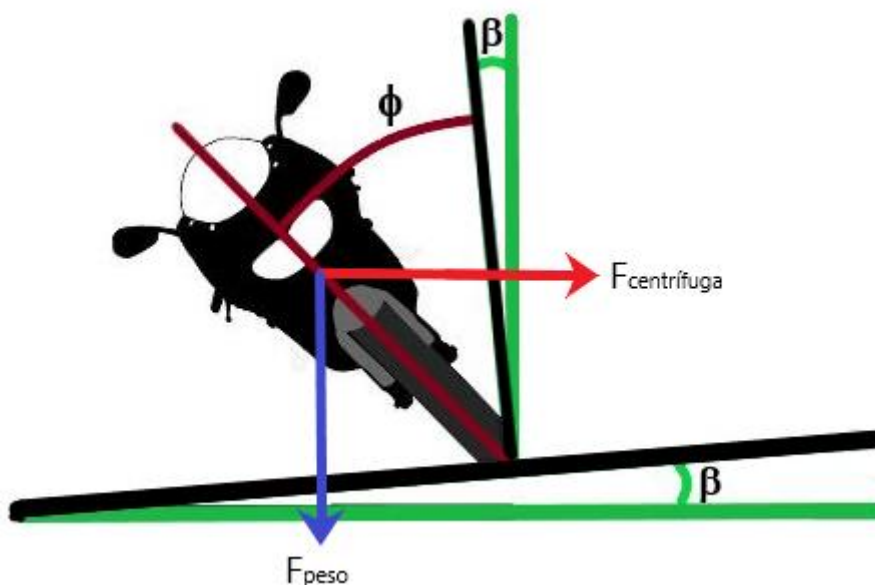


Ilustración 13 - Diagrama de fuerzas sobre una motocicleta en un peralte de inclinación β

Conociendo estos datos, se podrá estimar la velocidad máxima igualando los vectores de fuerza centrífuga y fuerza peso, conociendo que el ángulo de desviación máximo será $\phi_r + \beta$. Resolviendo el triángulo planteado y despejando se obtiene:

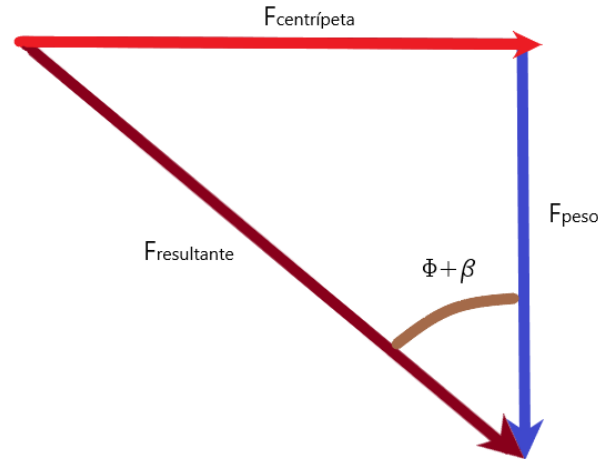


Ilustración 14 - Diagrama de fuerzas y ángulos

$$\operatorname{tg}(\phi + \beta) = \frac{F_{centrifuga}}{F_{peso}} = \frac{v^2 * \frac{m}{R}}{m * g} = \frac{v^2}{R * g}$$

$$v = \sqrt{g * R * \operatorname{tg}(\phi + \beta)}$$

Siendo $\phi = \phi_r = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(\mu)$

Por tanto, se conoce cómo afectan los peraltes a la hora de calcular la velocidad máxima en cada curva. Estos datos se pueden obtener de la planimetría que ofrecen los circuitos, por lo que obtendremos un vector con todos sus valores. Si por el contrario se desconocen, el valor introducido será 0.

Con todos estos datos obtenemos 4 vectores que introducir y partir el programa de simulación.

- 1) Longitud de cada uno de los tramos en los que se ha discretizado. Con ello se expresa en metros la distancia que recorrer en cada uno, dando igual si es recta o curva.

- 2) Radio de curvatura. Se recoge los radios de curvatura de las diferentes curvas, tanto de entrada como de salida de curva. Se considerará como radio infinito a las rectas.
 - 3) Altura de cada punto. Se considerará la altura de los puntos de cambio entre un tramo y otro. Con esto podemos saber la pendiente de cada tramo.
 - 4) Peralte de cada una de las curvas, siendo esta el desnivel en el tramo trasversal a la pista.
- Se representará un ejemplo práctico de los resultados de Alcañiz, siendo los cuatro vectores los siguientes:

$L=[354.2 \ 48.8 \ 91.3 \ 124.2 \ 119.9 \ 126.4 \ 70 \ 116.3 \ 84.7 \ 73.35 \ 74.7 \ 33.0 \ 302.5 \ 54.5 \ 35.4 \ 250.6 \ 91.3 \ 60.3 \ 127.8 \ 193.2 \ 300.0 \ 177.0 \ 56.0 \ 52.1 \ 150.5 \ 33.4 \ 102.46 \ 94.4 \ 60.3 \ 17.5 \ 897 \ 307.75 \ 246.3]$

$R=[\text{inf} \ 51.5 \ 153 \ 130.5 \ \text{inf} \ 144 \ 163 \ \text{inf} \ 170.5 \ 220 \ 50.6 \ 52.8 \ 253 \ 55.8 \ 58.4 \ \text{inf} \ 58.1 \ 30.7 \ 177 \ 121.8 \ \text{inf} \ 58.6 \ 68.6 \ 133.4 \ 140 \ \text{inf} \ 57.75 \ 38 \ 58.4 \ \text{inf} \ 119 \ \text{inf}]$

$h=[372.0 \ 372.5 \ 372.6 \ 374.1 \ 377.5 \ 382.0 \ 391.5 \ 391.9 \ 394.1 \ 399.7 \ 400.0 \ 400.5 \ 402.0 \ 406.7 \ 407.2 \ 407.6 \ 401.0 \ 396.5 \ 391.0 \ 382.5 \ 386.0 \ 394.7 \ 392.2 \ 391.9 \ 390.9 \ 391.4 \ 393.0 \ 389.7 \ 384.4 \ 380.9 \ 380.0 \ 357.3 \ 370.55]$

$P=[0 \ 2.5 \ 0 \ 2.5 \ 0 \ 2.5 \ 0 \ 0 \ 2.5 \ 0 \ 2.5 \ 0 \ 2.5 \ 2.5 \ 2.5 \ 0 \ 2.5 \ 2.5 \ 2.5 \ 0 \ 0 \ 2.5 \ 0 \ 2.5 \ 2.5 \ 0 \ 2.5 \ -2.5 \ -2.5 \ 0 \ -2.5 \ 2.5 \ 0]$

3.2 Modelo de rectas

Una recta será considerada como un tramo del circuito en la cual la moto sigue una trayectoria rectilínea. Durante este trayecto en línea recta, pueden darse dos casos: caso de frenada y caso de aceleración.

Teniendo un tramo con trayectoria rectilínea, debemos conocer los siguientes datos de entrada de dicho tramo:

- Longitud del tramo (m)

- Desnivel del tramo, siendo estos la altura de entrada y la altura de salida del tramo (m)
- Velocidad de entrada al tramo (m/s)
- Velocidad de salida del tramo (m/s)

Con esos cuatro datos serán suficientes para estudiar cómo se comportaría la motocicleta, refiriéndonos a cuando aceleraría, cuanta sería su velocidad en cada punto y dónde debería de comenzar a frenar. El dato de cuándo frenar es importante para así poder tomar, a la velocidad adecuada, la siguiente curva, por lo que partiremos de ese dato y cómo se calculará.

3.2.1 Cálculo de frenada

Debido a que la velocidad, la potencia entregada y la potencia resistiva van variando con el tiempo, es difícil estimar en qué punto comenzaría a frenar, pero debido al potencial de la simulación de tiempos finitos, podemos ir calculando en cada intervalo de tiempo infinitesimal, a la velocidad actual a la que circula, cuántos son los metros que necesitaría para frenar y comparar con los metros que quedan. Es decir, si el cálculo de metros para frenar a la velocidad actual es menor que la distancia que queda por recorrer seguirá acelerando, en caso contrario, comenzará a frenar.

$$distancia\ frenado < distancia\ por\ recorrer \rightarrow acelerar$$

$$distancia\ frenada \geq distancia\ por\ recorrer \rightarrow frenar$$

La frenada que realizará el piloto será la máxima que pueda proporcionar la motocicleta y esta estará limitada por dos situaciones: el límite de adherencia y el límite de vuelco por frenada. El caso de límite de adherencia es el mismo que se comentó previamente y será estimado como $\mu * g$. Sin embargo, el límite de vuelco por frenada será calculado como la aceleración máxima de frenada que provoca el levantamiento de la rueda trasera.

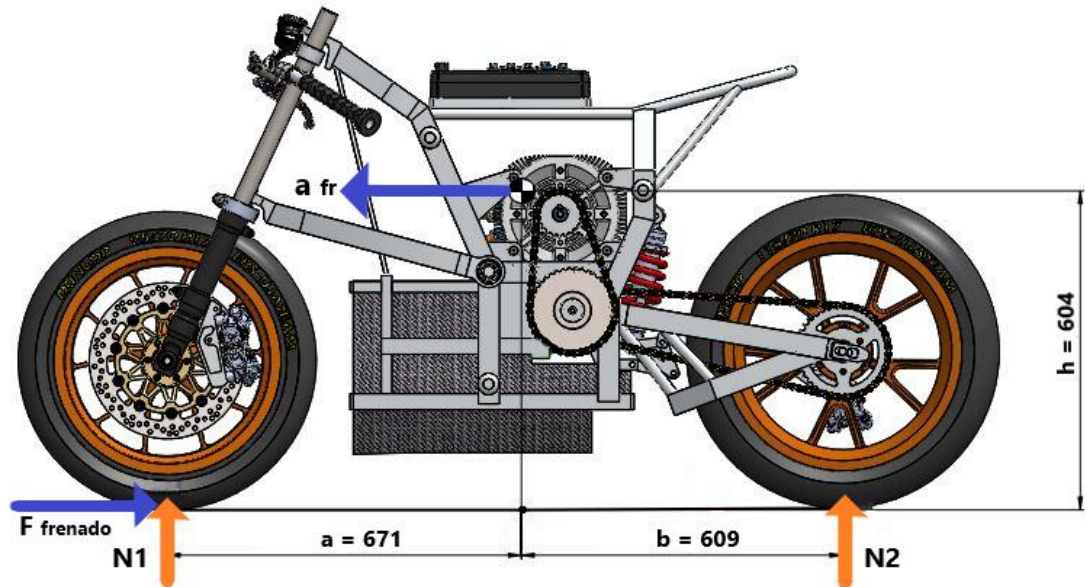


Ilustración 15 - Fuerzas en frenada

Su cálculo será realizando la sumatoria de momentos respecto del punto de apoyo de la rueda trasera (fuerza N2) igual a 0.

$$N1 * (a + b) = m * g * b + m * a_{fr} * h$$

En el momento de la frenada máxima, las fuerzas de inercia hacen que la distribución del peso se dirija hacia adelante, llegando a levantar la rueda trasera. En este caso, todo el peso se encuentra en la rueda delantera, por lo que se puede estimar:

$$N1 = m * g$$

Simplificando la ecuación:

$$g * (a + b) = g * b + a_{fr} * h$$

$$a_{fr} = \frac{g * a}{h}$$

Conociendo que, por diseño del prototipo, el centro de gravedad se encontrará en b=671 mm y h=604 mm, se obtiene:

$$a_{fr} = \frac{9,81 * 671}{604} = 10'89 \text{ m/s}^2$$

Por consiguiente, se puede considerar que la frenada máxima será la limitada por el levantamiento de la rueda trasera, siendo esta de $10'89m/s^2$. En cuanto al neumático, siendo calculada como $\mu * g$, siempre tendrá un valor superior salvo en el caso de que la adherencia de la pista sea aproximadamente inferior a $\mu = 1'1$. En ese determinado caso, la adherencia será el factor límite de frenada.

Con la aceleración máxima de frenado posible, calcularemos el tiempo de frenado como:

$$t_{frenado} = \frac{v_{actual} - v_{salida\ del\ tramo}}{a_{frenado}}$$

$$d_{frenado} = v_{actual} * t_{frenado} + 0,5 * a_{frenado} * t_{frenado}^2$$

Esta $d_{frenado}$ será la que compararemos con la distancia por recorrer y tomaremos la decisión de si frenar o continuar acelerando. En el caso de que sí se vaya a comenzar a frenar, las ecuaciones que sigue el programa son:

$$\Delta v = a_{frenado} * t$$

$$v_{nueva, i} = v_{i-1} + \Delta v$$

3.2.2 Cálculo de aceleración

En el caso de que la decisión sea que la distancia de frenado es menor que la distancia por recorrer se tiene el caso de que el piloto debe continuar acelerando. Así que habrá que seguir un método similar al anterior, determinando la aceleración y la distancia de frenado, pero la aceleración no será continua, sino que será variable con la potencia del motor y la potencia de pérdidas como se mencionó anteriormente. Por ello el modelo de cálculo es el siguiente:

$$P_{pérdidas} = P_{inercia} + P_{aerodinámica} + P_{peso} + P_{rodadura}$$

$$P_{motor} = T_{motor} * \omega_{motor} * \eta$$

$$P_{inercia} = m' * a * v$$

$$P_{aerodinámica} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * C_d A$$

$$P_{peso} = m * g * \sin(\alpha)$$

$$P_{rodadura} = m * g * C_r * v$$

$$a = \frac{T_{motor} * \omega_{motor} * \eta - \left(\frac{1}{2} * \rho * v^3 * C_d A + m * g * \sin(\alpha) + m * g * C_r * v + m' * a * v \right)}{m * v} \quad 1$$

Siendo:

- T_{motor} : Par en el eje del motor (función de la velocidad de giro) (N·m)
- ω_{motor} : Velocidad de giro del motor (rad/s)
- η : Rendimiento de la cadena cinemática (adim.) aproximada a 0,95.
- m' : Masa reducida del sistema (incluye inercias de ruedas y motor) (kg)
- a : Aceleración lineal del sistema (m/s²)
- v : Velocidad lineal del sistema (m/s)
- ρ : Densidad del aire (kg/m³)
- $C_d A$: Producto del coeficiente de arrastre por el área frontal de la moto (m²)
- g : Aceleración de la gravedad (m/s²)
- α : Pendiente del firme (rad)
- C_r : Coeficiente de rodadura. Equivale a la pendiente que generaría la misma resistencia que la propia resistencia a la rodadura. Según bibliografía, toma valores del orden de 1/70

1

Este método es el mismo que se presentó en el apartado de simulaciones en el equipo, siendo M. Alcázar el primero en desarrollar este procedimiento.

El par motor desarrollado habrá que consultarlo en función de la velocidad, según el mapa par-velocidad del mapa motor, que será explicado en el apartado referente al motor.

Existe un caso en que esa aceleración puede ser menor, siendo el caso en que se supere el límite de adherencia o el límite de vuelco por aceleración. Para el límite de adherencia se tomará como $\mu * g$. En el caso de límite de vuelco por aceleración se estudiará como la aceleración máxima la cual, genera un momento mayor que el del peso y levantará la rueda delantera.

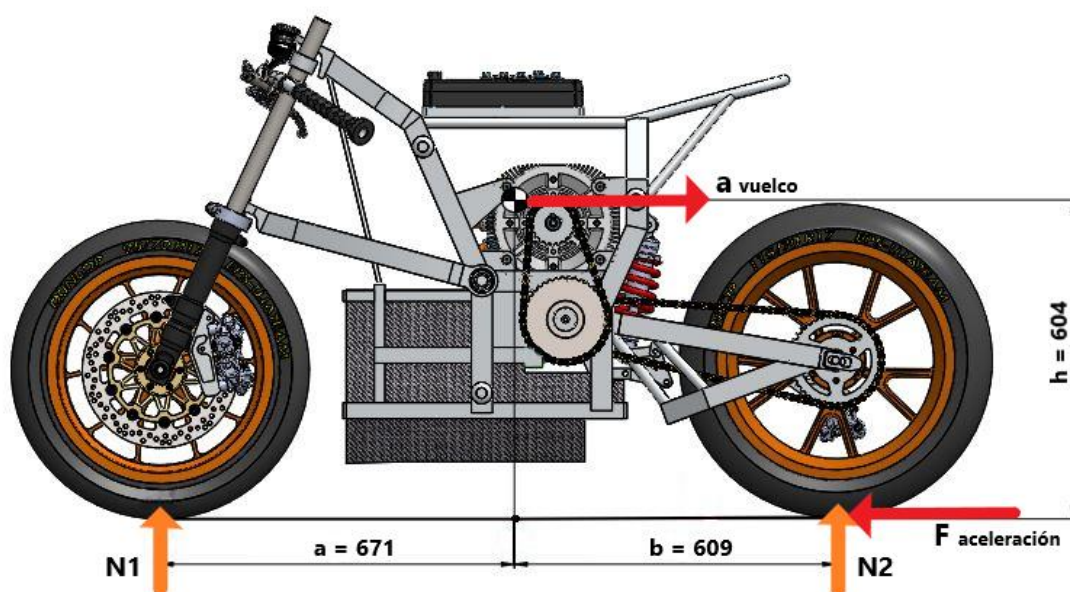


Ilustración 16 - Fuerzas en aceleración

Su cálculo será realizando la sumatoria de momentos respecto del punto de apoyo de la rueda delantera (fuerza N1) igual a 0.

$$N2 * (a + b) = m * g * a + m * a_{vuelco} * h$$

En el momento de aceleración que genera el levantamiento de la rueda delantera, hace que todo el peso quede sobre la rueda trasera, por tanto, la fuerza sobre esa rueda será:

$$N2 = m * g$$

Simplificando la ecuación:

$$g * (a + b) = g * a + a_{vuelco} * h$$

$$a_{vuelco} = \frac{g * b}{h}$$

Conociendo que, por diseño del prototipo, el centro de gravedad se encontrará en $b=609$ mm y $h=604$ mm, se obtiene:

$$a_{vuelco} = \frac{9,81 * 609}{604} = 9,89 \text{ m/s}^2$$

Por tanto, la aceleración máxima será normalmente la que proporciona el motor, salvo en los casos de bajas revoluciones con mucho par en los que podría superar el límite de fuerza de adherencia. Por otro lado, si el piloto se moviese y cambiase el centro de gravedad hacia atrás podría reducirse el valor de límite de vuelco y ser ese el límite, aunque ese caso no se tendrá en cuenta.

Una vez obtenida la aceleración que se obtiene del balance de potencias, podemos obtener el incremento de velocidad, la nueva velocidad y calcular nuevamente si la distancia de frenada es mayor o menor que la que queda por recorrer.

3.3 Modelo de curvas

Una curva será considerada como un tramo del circuito en la cual la moto sigue una trayectoria curvilínea. Durante este trayecto en curva, pueden darse tres casos: que se tome a velocidad constante, que se acelere o que se frene. La decisión de estar en uno u otro caso dependerá de:

- Longitud del tramo (m)
- Desnivel del tramo, siendo estos la altura de entrada y la altura de salida del tramo (m)
- Velocidad de entrada o actual del tramo (m/s)
- Velocidad de salida del tramo (m/s)
- Radio de curvatura (m)

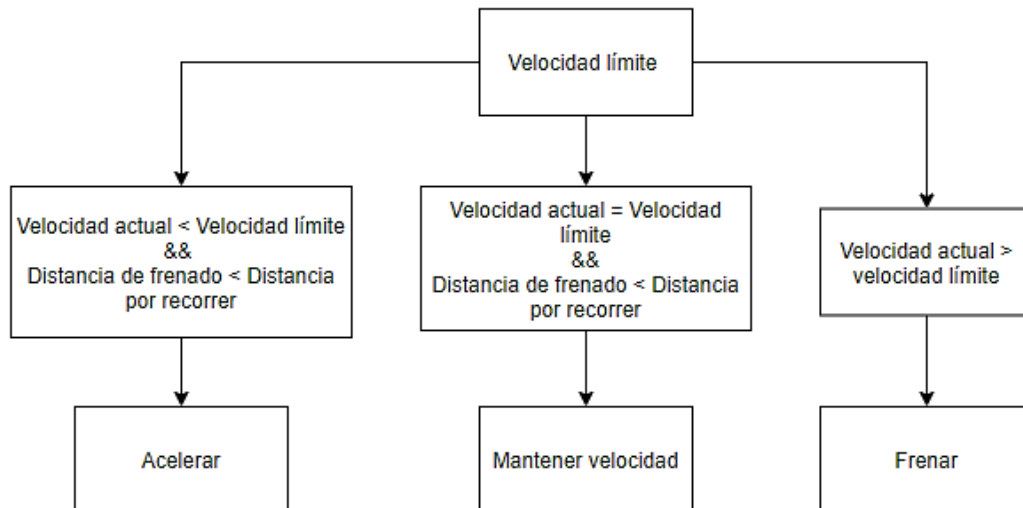
En base a estos datos conocidos se realizará un cálculo para estimar qué es lo que realizaría el piloto en cada uno de los tramos de curvas. Cómo se explicó en el modelado del

circuito, las curvas del circuito se han discretizado en dos, una antes del vértice y otras tras el vértice de la curva. Con ello se aproxima de una manera más real el modo de pilotaje de la motocicleta en circuito. Por lo que el concepto de “tramo” es cada una de esas zonas de la curva, no la curva completa.

Para todos los cálculos que se realizarán se partirán del hecho del cálculo de la velocidad límite de cada curva, calculada como:

$$v_{límite} = \sqrt{g * R * \mu}$$

Y decidiremos:



3.3.1 Cálculo de curva con frenada

Se plantea el caso de que la velocidad a la que se tiene que salir del tramo es menor que la velocidad a la que hemos entrado. En este caso será necesario disminuir la velocidad de manera controlada para poder tomar la siguiente curva, pero no se debe de frenar en cualquier momento, sino en el justo que consiga ganar la mayor cantidad de tiempo. Por ello, se plantea el estudio de las distancias de frenado necesarias en cada momento para analizar cuándo se debe de comenzar a frenar, de manera que se esté el mínimo tiempo a baja velocidad.

En el caso de frenada en el paso de una curva existe un problema y es que, si la velocidad a la que estás tomando dicha curva es la velocidad límite, el neumático está soportando el máximo y no puede soportar ningún esfuerzo más, por lo que frenar a tope de manera normal no sería posible. Para superar ese problema, se puede basar en lo expuesto de frenada aerodinámica explicada por Tony Foale, en la cual además del freno con los neumáticos, la propia aerodinámica puede frenarnos de manera adicional, consiguiendo que la velocidad sea menor de la velocidad límite e introducir una cierta fuerza de frenada. Conforme vaya frenando, esta fuerza podrá ir siendo progresivamente mayor.

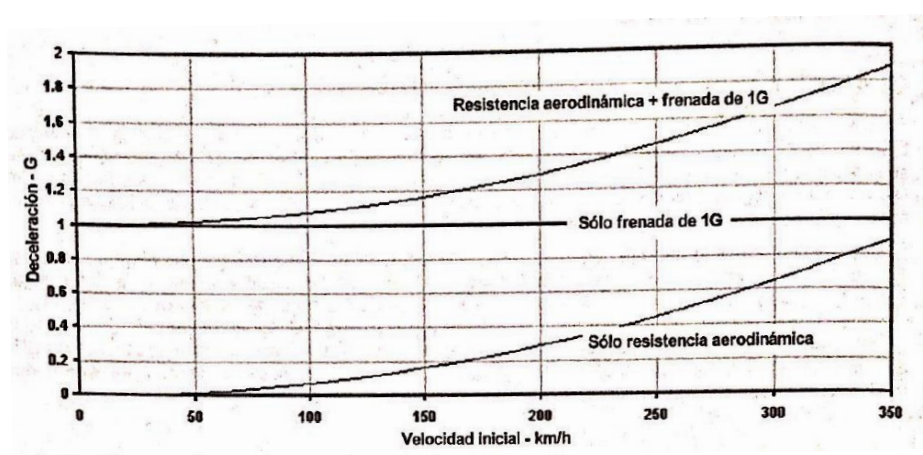


Ilustración 17 - Deceleración frente a velocidad

Como se observa en la gráfica, la resistencia aerodinámica no es constante en todo el trayecto, sino que va variando con la velocidad. Por este motivo el método de cálculo se complica. La manera de solucionarlo es plantear una pequeña simulación de frenada, en la que, en cada instante de tiempo, realizar un cálculo iterativo de cuantos metros serían necesarios para frenar desde la velocidad actual hasta la velocidad límite del próximo tramo. Si la distancia obtenida es menor o igual que la distancia que queda por recorrer, se comenzará a frenar.

$$a_{aerodinámica} = \frac{\frac{1}{2} * \rho * v^3 * C_d A}{m * v}$$

Máxima frenada posible:

$$F_{disponible}^2 + F_{centrífuga}^2 = F_{neumático}^2$$

$$(m * a_{neumático})^2 + \left(m * \frac{v^2}{R}\right)^2 = (m * g * \mu)^2$$

$$a_{neumático}^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)^2 = (g * \mu)^2$$

$$a_{neumático} = \sqrt{(g * \mu)^2 - \left(\frac{v^2}{R}\right)^2}$$

Esta aceleración representa la máxima aceleración extra posible que puede soportar el neumático a la velocidad y radio de curvatura dada. Si la aceleración posible es igual a 0 o un número complejo, solo frenará con el uso de la aerodinámica, sino, existirá la frenada con ambas aceleraciones. Por lo que la frenada o aceleración negativa será:

$$a_{total} = a_{neumático} + a_{aerodinámica} = \sqrt{(g * \mu)^2 - \left(\frac{v^2}{R}\right)^2} + \frac{\frac{1}{2} * \rho * v^3 * C_d A}{m * v}$$

Tras esto se vuelve a calcular la nueva velocidad y el espacio durante el periodo de tiempo infinitesimal t , e iteraremos volviendo a calcular las aceleraciones de la frenada.

$$\Delta v = a_{total} * t$$

$$v_{nueva, i} = v_{i-1} + \Delta v$$

$$d_{recorrida, i} = v_{actual, i-1} * t - 0,5 * a_{total} * t^2$$

Al resolver esto iterativamente hasta llegar a que la velocidad nueva $v_{nueva, i}$ sea igual que la velocidad límite del siguiente tramo, teniendo así la distancia que será necesario recorrer. Si esa distancia es menor o igual que la distancia que falta por recorrer, será el momento de comenzar a frenar. En caso contrario, se mantendrá la velocidad o aceleración que tuviese.

3.3.2 Cálculo de curva a velocidad constante

En el caso de que la velocidad de entrada sea igual a la velocidad límite, se considerará que debe de pasar dicha curva a velocidad constante, ya que el neumático no soporta más esfuerzos que la fuerza centrífuga. Por tanto, acelerar para ir más rápido no es una posibilidad,

ya que superaría dicho límite. Por otro lado, habrá que tener en cuenta si la velocidad del siguiente tramo es menor que la del tramo actual. En ese caso será necesario frenar para poder tomar el siguiente tramo de curva. Para ello se calculará la distancia de frenado necesaria para entrar en el siguiente tramo a su velocidad límite.

Para el caso de estudiar en qué momento de debe de comenzar a frenar se ha explicado en el apartado anterior de curva de frenada. Ese cálculo se irá realizando en todas las iteraciones para comprobar que puede seguir manteniendo el ritmo actual y poder simular correctamente el pilotaje del piloto. En este caso se mantendrá la velocidad límite de la curva, simplemente calculando el espacio recorrido, ya que las velocidades, y por tanto las aceleraciones, son constantes.

$$d_{recorrido} = v_{limite} * t$$

3.3.3 Cálculo de curva con aceleración

En el caso de que la velocidad de entrada al tramo o la actual sea inferior que la velocidad límite a la que se puede tomar dicha curva, se acelerará hasta conseguir llegar a esa velocidad salvo un caso, que es en el que el siguiente tramo su velocidad límite sea inferior a la del tramo actual. En ese caso, se deberá de frenar tal y como se ha procedido en el apartado anterior de curva con frenada. Se deberá ir comprobando esa distancia de frenado en cada paso de tiempo a la vez que sigue acelerando. Obviamente esto no se dará en todas las curvas, pero puede darse el caso.

Una vez se explicó cómo realizar el cálculo de la frenada, quedará conocer cuánto podemos acelerar en cada curva si nuestra velocidad es inferior a la velocidad límite. Para hallar ese límite, se procederá en el mismo sentido que en el de frenada, calculando cuanto es lo máximo que se puede acelerar teniendo en cuenta el límite de adherencia del neumático.

Máxima aceleración posible:

$$(m * a_{neumático})^2 + \left(m * \frac{v^2}{R}\right)^2 = (m * g * \mu)^2$$

$$a_{neumático}^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)^2 = (g * \mu)^2$$

$$a_{neumático} = \sqrt{(g * \mu)^2 - \left(\frac{v^2}{R}\right)^2}$$

Ahora, con la curva par-velocidad, calcularemos cuanta es la aceleración que nos proporciona el motor a dichas revoluciones. Esta será igual que la aceleración explicada en rectas.

$$P_{pérdidas} = P_{inercia} + P_{aerodinámica} + P_{peso} + P_{rodadura}$$

$$P_{motor} = T_{motor} * \omega_{motor} * \eta$$

$$P_{inercia} = m' * a * v$$

$$P_{aerodinámica} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * C_d A$$

$$P_{peso} = m * g * \sin(\alpha)$$

$$P_{rodadura} = m * g * C_r * v$$

$$a_{motor} = \frac{T_{motor} * \omega_{motor} * \eta - \left(\frac{1}{2} * \rho * v^3 * C_d A + m * g * \sin(\alpha) + m * g * C_r * v + m' * a * v\right)}{m * v}$$

Siendo ambas conocidas las compararemos para ver cuál de ellas es menor, siendo esta la elegida. El motivo es sencillo, por mucho que el neumático pueda proporcionar una determinada aceleración, nunca podrá ser mayor que la aceleración que nos proporciona el motor. Y funciona igual a la inversa, aunque el motor pudiese proporcionar más aceleración, el neumático no podría transformarlo en velocidad porque derraparía o perdería estabilidad.

$$\min(a_{neumático}, a_{motor})$$

3.4 Modelo de baterías

3.4.1 Introducción

El sistema empleado para almacenar la energía será la utilización de baterías. Este sistema produce una reacción química en el interior de las baterías provocando una corriente eléctrica, que pasará por el controlador y más tarde por el motor, convirtiéndose en energía mecánica que proporcionará el movimiento a la motocicleta.

Estas estarán introducidas en un contenedor de material compuesto para evitar su manipulación involuntaria y aislarla de agentes externos, siendo estos tanto partículas de polvo/tierra/pequeños insectos como del agua. Cualquiera de ellos si llegasen a entrar en contacto con las baterías pondría en peligro la seguridad del piloto, factor primordial de la competición. Por último, constará de una serie de aberturas para favorecer el paso controlado de aire, impidiendo la entrada de esos agentes externos y conseguir la refrigeración, aspecto fundamental para evitar daños por exceso de temperatura y alargar su vida útil.

Las baterías utilizadas en la VI Competición Internacional MotoStudent fueron las MOLICEL INR21700-P42A. Las propiedades de dicha batería son:

- Capacidad: 4000 mAh
- Voltaje máximo: 4.2 V
- Voltaje mínimo: 2,5 V
- Resistencia interna: 16 mΩ
- Temperatura máxima: 60°C
- Peso: 70 g



Ilustración 18 - Baterías INR21700-P42A

La configuración en la que irán conectadas en el cajón será 28s15p, es decir, 28 baterías conectadas en serie formando un pack y 15 packs conectados en paralelo, resultando un total de 392 baterías. Las propiedades que nos da dicho contenedor son las siguientes:

- Tensión nominal: 103.6 V
- Tensión máxima: 117.6 V
- Capacidad: 60 Ah
- Compuesto: Litio níquel recargable o baterías INR usando LiNiMnCoO₂, óxido de níquel-manganeso-cobalto (NMC)

3.4.2 Resistencia interna de baterías

Conociendo la resistencia interna y la forma en la que irá conectada se puede conocer la resistencia interna equivalente del sistema de acumulación, lo cual será útil más tarde para hallar sus pérdidas.

Se parte del cálculo de la resistencia de cada pack:

$$R_{pack} = 28 \text{ (baterias)} * 16 \text{ (m}\Omega\text{)} = 0.448 \Omega$$

Siendo conocido el del pack, se pasará al cálculo de la conexión de los 15 packs en paralelo:

$$\frac{1}{R_{equivalente}} = 15 * \left(\frac{1}{R_{pack}} \right) \rightarrow R_{equivalente} = \frac{1}{15 * \left(\frac{1}{R_{pack}} \right)} = \frac{1}{15 * \left(\frac{1}{0.448} \right)} = 0.030 \Omega$$

3.4.3 Curvas características

Se han analizado las diferentes curvas proporcionadas por el fabricante para este tipo de baterías. Con ello se espera ver la relación entre el nivel del almacenamiento y el voltaje, lo que proporcionará relaciones importantes con la intensidad demandada y el calentamiento de dichas baterías. Se tienen dos curvas principales que se han proporcionado: almacenamiento

frente a voltaje en función de la temperatura de operación y almacenamiento frente a voltaje en función de la intensidad de descarga.

Respecto a la curva de almacenamiento frente al voltaje en función de la temperatura de operación, podemos ver cómo afectan las diferentes temperaturas al voltaje de dicha batería. Las curvas más alejadas son las que se sitúan a una temperatura de -40°C como mínimo y a 60°C como máximo. Obviamente, se puede observar que a menor temperatura su comportamiento se vuelve más inestable y a pesar de no haber consumido nada de su capacidad, tener un voltaje menor que el de máxima carga. Este rango, además, no será nuestro caso de estudio ya que no se enfriarán dichas baterías a menos de la temperatura ambiente. Por tanto, centrándonos en nuestro rango de aplicación, que será de entre 25°C a 60°C , podemos observar que los cambios en las gráficas son mínimos, siendo prácticamente iguales que los de descarga a baja intensidad. Se concluye por tanto que esa gráfica no es relevante.

■ Discharge Temperature Characteristics

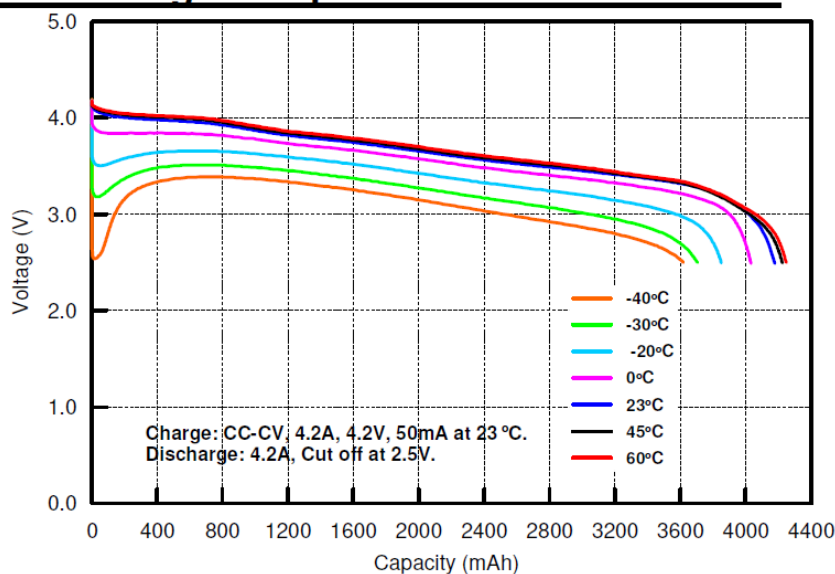


Ilustración 19 - Curvas de descarga en función de la temperatura de batería INR21700

Por otro lado, la gráfica de almacenamiento frente al voltaje en función de la intensidad de descarga si es relevante. La intensidad demandada por el tren motriz irá variando en función de la potencia a entregar según el punto del circuito, por ejemplo, no será la misma en una curva dónde la potencia será la necesaria para cubrir las pérdidas y mantener la velocidad, que en la de una recta dónde se quiere conseguir la velocidad máxima. Debido a

estas diferencias, será necesario simularlas diferentes curvas para determinar la intensidad de descarga que haya en cada momento, calculando su voltaje relacionado.

■ Discharge Rate Characteristics

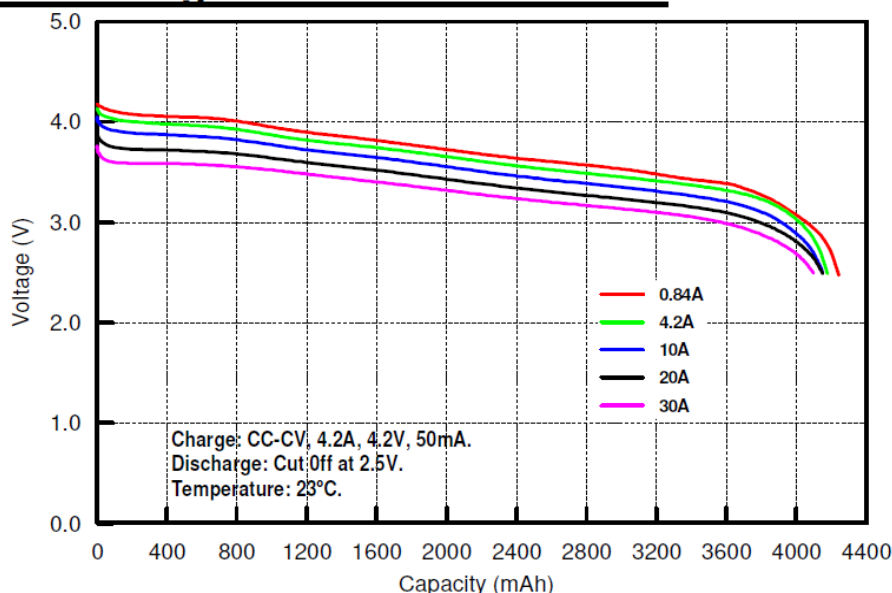


Ilustración 20 - Curva de descarga en función de la intensidad de descarga de batería INR21700

El método a proceder es introducir una imagen de las curvas de descarga en el programa *EngaugeDigitizer*. En él, se seleccionan varios puntos de las gráficas para obtener las referencias. Tras esto, se seleccionan los puntos de las gráficas de las curvas de descarga y proporcionaba un .csv con los datos de los puntos seleccionado. Este procedimiento se realizó tanto en la curva a menor descarga, de 0,84 A, como en la curva de mayor descarga, de 30A. Además, se observó que ambas curvas eran prácticamente paralelas, por lo que la manera de obtener las curvas intermedias, fue con una interpolación lineal. Es decir, calcular primero la intensidad de descarga de ese momento y, para una capacidad dada, hallar los voltajes para ambas curvas. Para terminar, se halla el punto a la intensidad dada con una interpolación lineal. Con ello se llegó a las siguientes expresiones:

Curva para descarga de 0,84 A:

$$V(0,84 A) = -5,95 * 10^{-21} * c^6 + 5,74 * 10^{-17} * c^5 - 2 * 10^{-13} * c^4 + 3,01 * 10^{-10} * c^3 - 1,93 * 10^{-07} * c^2 - 0,0002 * c + 4,15$$

Curva de descarga para 30 A:

$$V(30 A) = 3,34 * 10^{-21} * c^6 + 5,67 * 10^{-17} * c^5 - 3,33 * 10^{-13} * c^4 + 8,67 * 10^{-10} * c^3 - 1 * 10^{-07} * c^2 - 0,0006 * c + 3,71$$

Interpolación para curvas intermedias:

$$V = V(30) + \left(\left(\frac{30 - A}{29,16} \right) * (V(0,84) - V(30)) \right)$$

Siendo:

- V voltaje
- c capacidad gastada en mAh
- A valor de intensidad de descarga

3.4.4 Capacidad consumida

Al final del apartado anterior se vio cómo la capacidad consumida influía en la tensión que proporcionan dichas baterías, es por ello, que se debe de calcular cuánto se han gastado las baterías en ese intervalo de tiempo.

El procedimiento de cálculo será sencillo siendo conocida la demanda de intensidad de las baterías. Esa intensidad multiplicada por el tiempo y dividida entre 3600 para obtenerlo en valor de amperios hora (Ah).

$$Capacidad\ consumida = \frac{I_{demandada\ batería}(A) * t(s)}{3600} (Ah)$$

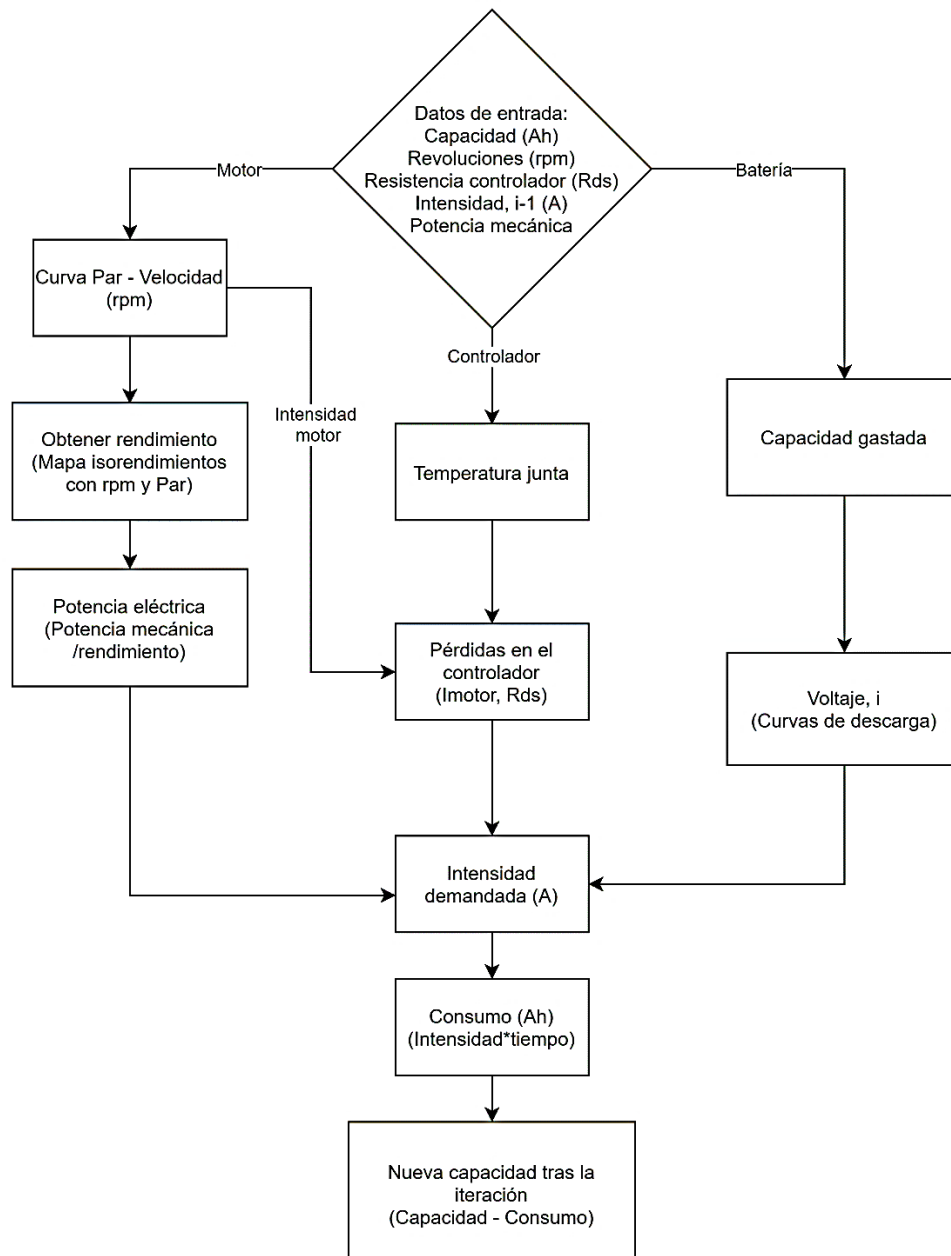
Para conocer ahora el consumo que se ha realizado en este intervalo de tiempo, será necesario:

$$Wh = C_{consumida}(Ah) * V_{total}$$

Con este sencillo cálculo se podrán comparar los consumos de diferentes relaciones de transmisión para así obtener el mínimo consumo de energía, optimizando al máximo la autonomía de la motocicleta.

3.4.5 Esquema resumen de capacidad consumida

Se presenta ahora un esquema resumen de los pasos para calcular el consumo, donde se parte de unos datos iniciales o del cálculo anterior, se siguen los pasos y llegamos a obtener el consumo y la capacidad que nos queda en baterías



3.4.6 Calor generado

El calor generado será el correspondiente a todas las pérdidas de potencia eléctrica producidas en un circuito, en este caso en específico, las pérdidas producidas en las baterías. Para calcular dichas pérdidas se usa el efecto Joule, el cual dice que toda la potencia de pérdidas se transforma en calor y, por tanto, en un incremento de temperatura de este. Por este motivo su estimación es importante, para saber si los acumuladores llegan a una temperatura crítica que lo deteriore y pueda producir su rotura.

A partir del dato de la resistencia interna calculada anteriormente, se podrá calcular sus pérdidas por efecto Joule utilizando la expresión:

$$Pérdidas = Calor\ generado = I^2 * R = I^2 * 0,030$$

La intensidad se calculará como la intensidad demandada en baterías, que será muy diferente de la que circula por el motor. El modo de calcularlo será explicado en el apartado 3.8) *Cálculo de intensidad demandada*.

Por otro lado, la intensidad no se considera constante, tal y como se explicó en el apartado anterior 3.4.3) *Curvas características*. Dependiendo de la demanda de potencia y el voltaje de la batería, irá cambiando esa necesidad de intensidad. Una manera de explicar eso es con la definición de potencia:

$$P = V * I$$

Primero se supone que la potencia demandada es constante. Conforme avanza el tiempo se van consumiendo la batería, y según las curvas de almacenamiento frente a voltaje, el voltaje comienza a caer. Para mantener esa potencia, el valor de la intensidad tendrá que aumentar en la misma proporción, con lo que se aumenta el gasto de batería. Estos cambios pueden ser bastante notables, de ahí la importancia de modelizar las curvas de descarga.

3.4.7 Calor específico

A partir del calor generado se podrá calcular el incremento de temperatura que produce usando el calor específico de la batería. Este dato no es un dato directo que dé el fabricante por lo que se tendrá que usar un procedimiento indirecto. Se partirá de los datos

que proporciona de una batería de las mismas características, pero de menor tamaño, la Molicel INR 18650. Link: <https://18650.uk/what-is-an-18650-battery/>.

En dicha página se presentan diferentes baterías de similares características, siendo todas ellas cilíndricas de Ion-litio, entre las que se encuentran la del caso de estudio. Se comenta la forma de construcción (ilustración 21) y los diferentes materiales que la componen. Estos son: óxido de Litio (LiNiMnCoO_2 (INR)) del cátodo, aluminio que cubre el cátodo, grafito del ánodo, cobre que cubre al ánodo y una embutición de acero.

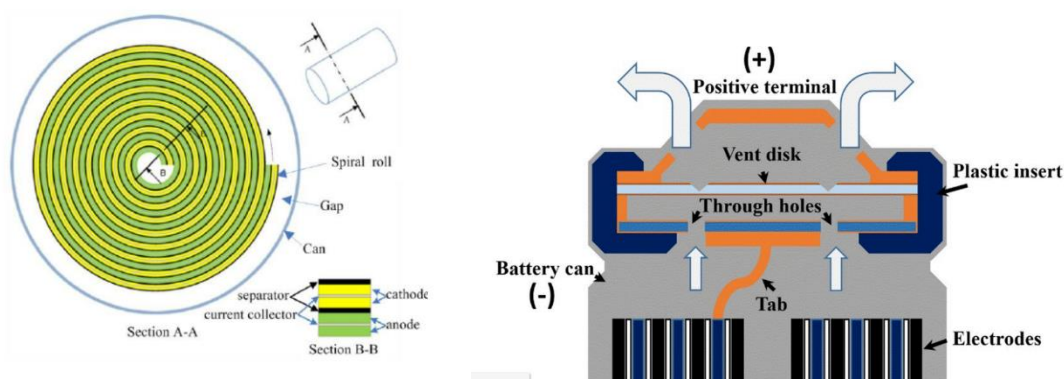


Ilustración 21 - Fotografías de construcción de la batería MOLICEL INR 18650. Superior izquierda corte transversal donde se observa el ánodo y cátodo. Superior derecha corte longitudinal con sistema de ventilación en caso de explosión. Inferior corte longitudinal de batería real.

Siendo conocida la composición química se puede estimar el calor específico de cada uno de los componentes por separado. Para muchos de ellos es dato directo salvo el caso del óxido de Litio, que habrá que analizar cada uno de los componentes químicos. Se detalla más adelante:

Composición química de la pila LiNiMnCoO ₂ (INR) (CÁTODO)		
	Calor específico (J/ mol K)	Peso molar (g/mol)
Li	24,77	6,94
Ni	25,95	58,69
Mn	26,29	54,93
Co	24,75	58,93
O ₂	29,35	32
	Calor específico total (J/mol K)	Peso total (g/mol)
	131,11	211,49

Tabla 1 - Datos químicos del cátodo, incluyendo: Calor específico de cada componente y general (izquierda) y peso molar por componente y total (derecha)

Material	Calor específico (kJ/ kg K)
CátodoLiNiMnCoO ₂	620
Aluminio	897
Grafito	710
Cobre	385
Acero	450
Polietileno	1900
Etilenglicol	2400

Tabla 2- Calores específicos de los materiales que forman la batería

Se pasará ahora a hallar las masas de corresponden a cada uno de estos materiales. El dato de la cantidad de acero es fácilmente calculable debido a que en la propia página describen el espesor de esa embutición, siendo de 0.005" (o 0.13 mm) ilustración 22 en rojo a la izquierda. El resto tomaremos una estimación en base a la ilustración 21.

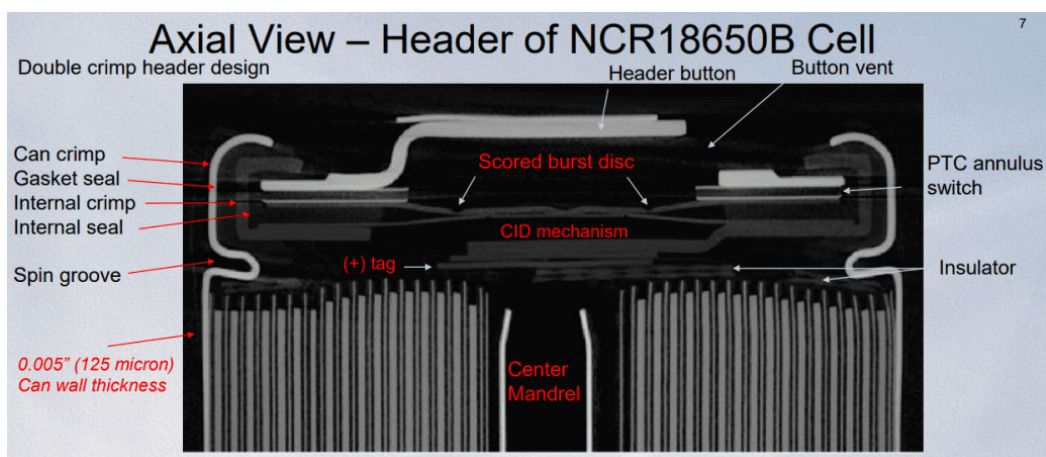


Ilustración 22- Fotografía explicativa de zona superior de batería NCR 18650

	Embutición de acero (Paredes)	Embutición acero (Fondo)
Espesor (mm)	0,13	0,13
Perímetro (mm)	67,3557	-
Área cilíndrica (mm ²)	8,75624	361,026
Volumen cilíndrico (mm ³)	614,688	46,9334
Peso (kg)	0,004825	0,000366

Tabla 3 - Estimación del peso de acero en la embutición

El peso estimado es de 5,19 g de acero. Si el peso de la batería total es de 70 g, el peso del resto de componentes será: $\text{Peso resto componentes} = 70 - 5,19 = 64,81 \text{ g}$

MATERIAL	PORCENTAJE (%)	PESO (G)
CÁTODO	30	19,49
CARBONO	30	19,49
COBRE	10	6,49
ALUMINIO	10	6,49
ACERO	-	5,19
PLÁSTICO SEPARADOR DE POLIETILENO	15	9,746
DISOLVENTE ETILENGLICOL	5	3,24

Tabla 4 - Masa de cada componente de la batería en función de su porcentaje estimado en peso

$$\frac{\sum(Peso_i * Calor\ específico_i)}{Peso\ total\ batería} = 896 \left(\frac{kJ}{kg\ K} \right)$$

3.4.8 Necesidad de refrigeración

Se plantea ahora la situación de que tenemos un cajón hermético, sin ventilación, con las baterías estudiadas y con una demanda media de potencia de 25 kW, 75% de la vuelta con acelerador a fondo y una tensión media igual a la nominal de 103,6 V. ¿Cuánto tiempo sería el necesario para llegar a la temperatura límite de 60°C si la temperatura ambiente es de 25°C?

El cálculo sería el siguiente:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Siendo:

- Q el calor generado
- m la masa total
- c_p el calor específico
- ΔT el incremento de temperatura

La masa total se calculará como el peso de una batería por el número total de ellas:

$$m = 0,0702 \left(\frac{kg}{batería} \right) \cdot 392 (batería) = 27,518\ kg$$

El calor generado por otra parte será el producido por efecto Joule con las pérdidas anteriormente mencionadas, utilizando para calcular la intensidad, la potencia y la tensión demandada media.

$$I = \frac{P_{demandada}}{V_{nominal}} = \frac{25000}{103,6} = 241\ A$$

$$Q' = I^2 \cdot R = 241^2 \cdot 0.032 = 1863\ W$$

Si esa demanda se produce durante el 75% de la vuelta:

$$Q = 1863 \cdot 0,75 \approx 1400 \text{ W}$$

Sustituyendo en la **ecuación X**:

$$t_{60^{\circ}\text{C}} = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{Q \text{ (W)}} = \frac{27,518 \text{ (kg)} \cdot 764 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) \cdot (60 - 25)(^{\circ}\text{C})}{1400 \text{ (W)}} = 525 \text{ s}$$

Si conocemos que el tiempo medio de una vuelta es de 150 segundos:

$$t_{\text{carrera}} = 150 \left(\frac{\text{s}}{\text{vuelta}}\right) \cdot 6(\text{vueltas}) = 900 \text{ (s)}$$

Como $t_{60^{\circ}\text{C}} < t_{\text{carrera}}$ se puede asegurar que se producirá un calentamiento superior a la temperatura límite de 60°C en estas condiciones ideales medias. Por tanto, es necesario refrigeración para mantener la temperatura dentro de límites y evitar provocar un daño irreparable en las baterías.

Como solución, se plantea un sistema de refrigeración por aire, de manera que se introduzca un caudal mínimo pero suficiente para controlar la temperatura. El aire es introducido desde la zona frontal de la motocicleta hacia un conducto, aprovechando la misma inercia para canalizar ese aire. Tras esta introducción del aire en el tubo, se canalizará hasta la zona inferior del cajón de baterías. Allí se separarán las posibles gotas de agua que hayan podido entrar del aire fresco y pasar ese aire, ya sin gotas de agua, a la zona donde se ubican las baterías. En ese momento, se producirá el intercambio térmico entre el aire y las baterías, de manera que parte del calor generado será traspasado al aire, aumentando su temperatura, y reduciendo el incremento de temperatura de las baterías. A la salida del contenedor se encontrarán extractores que ayudarán a la expulsión del aire caliente, especialmente estando en parado.

Se estimarán ahora tanto la velocidad de paso del aire por dichas baterías y el incremento de temperatura del aire tras su paso por el contenedor. Ambos serán unas

estimaciones basados en unos cálculos básicos y la experiencia. Tras la fabricación del mismo, se realizarán ensayos para corroborar dichas hipótesis y condiciones.

La presión disponible en el contenedor será la debida a la propia velocidad de la motocicleta, al cual se puede estimar con la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 + P_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 + P_2 + \Delta P_{pérdidas}$$

Considerando que los cambios de altitud son nulos, que la presión de entrada y salida es la atmosférica y que la velocidad de salida será despreciable, podemos simplificarlo como:

$$\rho gh_1 = P_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 = \rho gh_2 = P_2 = 0$$

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 = \Delta P_{pérdidas}$$

Lo cual para una velocidad media de 120 km/h obtendríamos:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 = \frac{1}{2} * 1,225 \left(\frac{kg}{m^3}\right) * \left(\frac{120}{3,6}\right) \left(\frac{m}{s}\right) = 680,5 Pa$$

Analizando la canalización de entrada del contenedor hasta las baterías tenemos las siguientes pérdidas:

Elemento	K_s
Curva 90º	0,20
Curva 180º	0,20
Cambio de sección	0,30
Pérdidas a lo largo del tubo	0,20
Suma	0,90

Tabla 5 - Coeficientes de pérdidas en diferentes elementos. Tabla obtenidas del libro Ingeniería fluidomecánica (Vera, Iglesias, Sánchez, & Martínez, 2012).

Se estima ahora la pérdida de carga:

$$\frac{1}{2}\rho v_m^2 \sum K_s = \Delta P_{pérdidas} \sum K_s = 680,5 * 0,90 = 612,45$$

$$P_{disponible} = 680,5 - 612,45 = 68,05 \text{ Pa}$$

Que supone una velocidad:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = P_{disponible} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 * P_{disponible}}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 * 68,05}{1,225}} = 10,54 \text{ m/s}$$

Esta será la velocidad de entrada a la sección de baterías y con la cual se hará el cálculo de refrigeración. Obviamente, este es un cálculo para la velocidad media del prototipo, si se quiere obtener la velocidad en otro régimen de velocidad se estudiará del mismo modo. La relación entre la velocidad del prototipo y la velocidad de entrada del aire en las baterías, para otras velocidades, queda de la siguiente manera.

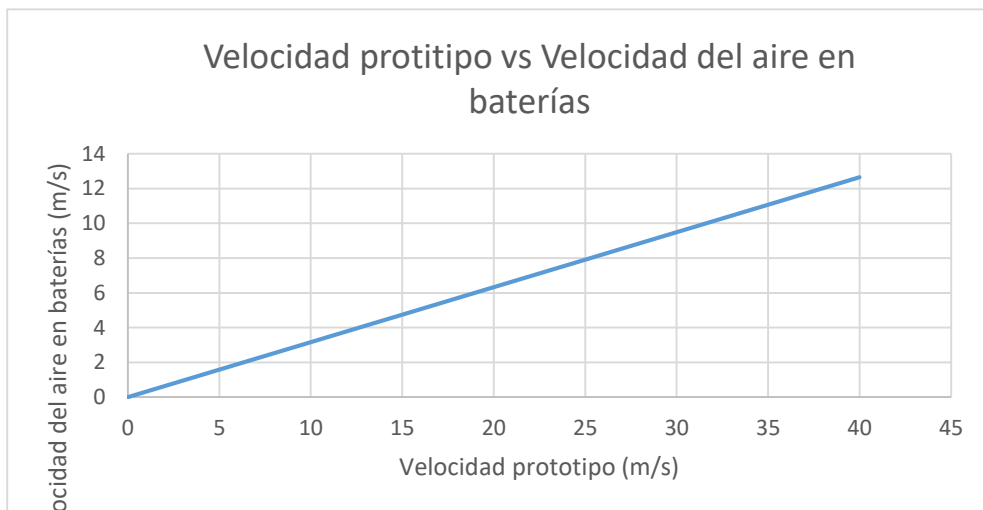


Ilustración 23 - Relación entre la velocidad del prototipo y la velocidad de entrada al contenedor de baterías. Valor estimado en función de las pérdidas.

La temperatura del aire que sale, cambiará en función de la temperatura de la pila. Estas serán, como mucho, de 10°C respecto de la temperatura de entrada. Con esta temperatura se obtendrá una diferencia media logarítmica de temperatura en el cajón para estimar el calor refrigerado.

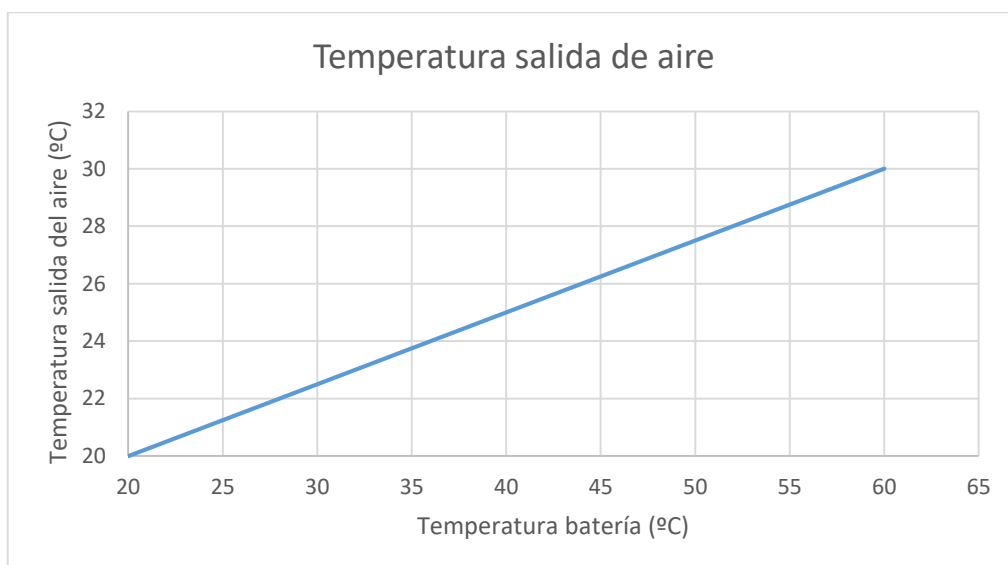
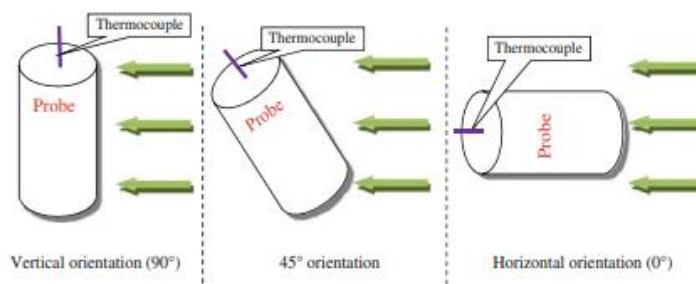


Ilustración 24 - Relación entre la temperatura de la batería y la temperatura de salida del aire estimada

Las baterías irán colocadas de manera vertical respecto del suelo en cuatro bandejas, una sobre otra. Uno de estos niveles se puede observar en la ilustración 26. El aire se canalizará de manera que entrará por la zona frontal e inferior de cada nivel. Con esto se espera aprovechar tanto la velocidad del aire como el efecto del calentamiento para facilitar la evacuación de calor. Se tendrán, por tanto, dos velocidades distintas de paso de aire. Por consiguiente, se puede deducir que la suma vectorial de ambas velocidades da como resultado una velocidad con un cierto ángulo respecto del suelo, que se podrá estimar en 67° .

En la publicación *An Experimental Study of Heat Transfer During Forced Air Convection* (Xiao, Wang, Wang, Maniruzzaman, & Rong, 2009) nos presentan un estudio térmico de un cilindro dónde relacionan el coeficiente de convección (h) con la inclinación de dicho cilindro respecto la dirección del aire. Uno de sus conclusiones se resume en la gráfica:



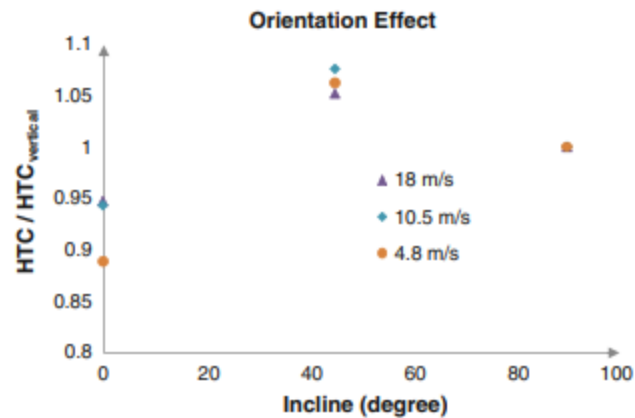


Ilustración 25 - Relación entre coeficiente de convección a diferentes ángulos respecto de la orientación vertical a 90°

Por lo que, para el cálculo, se realizará con la orientación vertical (90°) pero multiplicando por el factor de 1'02 por ser la dirección del aire de unos 67° . Esta corrección se debe a que el aire que sube de manera vertical tiene una sección de 6800 mm^2 mientras que la sección horizontal es de 2850 mm^2 .

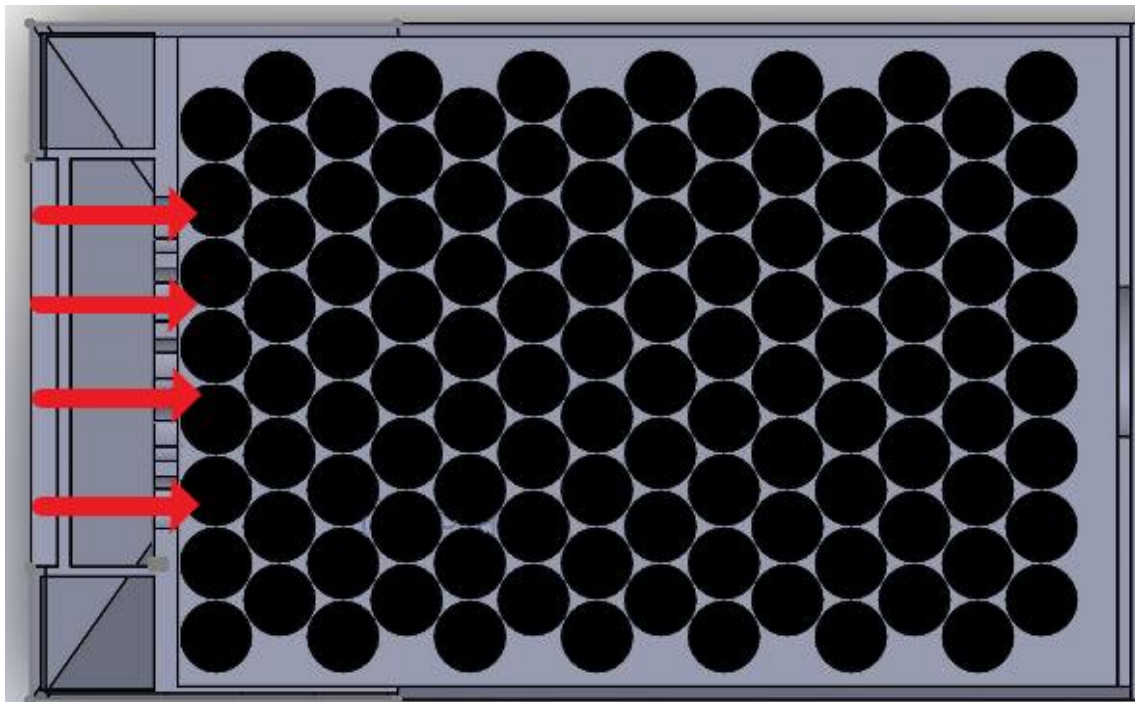


Ilustración 26 - Interior del contenedor de baterías. Disposición de baterías (negro) y dirección del aire (rojo)

Esta será la colocación de las baterías en una de las 3 bandejas iguales que tendremos incorporada en la motocicleta. Como se puede observar, están colocadas al tresbolillo,

pasando el aire de izquierda a derecha, como marcan las flechas rojas. Ya dada esta posición nos condiciona cómo será la refrigeración y el estudio de esta. En cuanto a las medidas y separación entre baterías se puede ver a la izquierda.

3.4.9 Calor refrigerado en baterías

En este apartado se estudiará la refrigeración de las baterías utilizando las ecuaciones experimentales que aparecen en el libro Fundamentos de transferencia de calor (Frank P. Incropera, 1998).

Con los datos del posicionamiento de las baterías podemos calcular cual será la velocidad máxima a la que pasará el aire a través de las ellas. Las distancias entre las pilas son iguales en la dirección x e y, por lo que dará igual cuál de las dos separaciones se escoja. Dicha velocidad máxima se calculará como:

$$V_{max} = \frac{e_x}{e_x - D} * V = \frac{23'5}{23'5 - 21'2} * V$$

Siendo:

- V_{max} la velocidad máxima
- e_x el espacio en la dirección x
- D el diámetro del tubo, en este caso, de la pila
- V velocidad del aire de entrada

Siendo conocida la velocidad máxima, se puede hallar el número de Reynolds asociado a dicha velocidad de paso del aire con la expresión siguiente. Este valor cambiará al mismo tiempo con la velocidad del prototipo, cambiando la velocidad de paso por la batería, como con la temperatura del aire de entrada, cambiando el valor de la viscosidad.

$$ReD = \frac{V_{max} * D}{viscosidad}$$

Se deben linealizar los coeficientes relativos a viscosidad, conductividad (k) y Prandtl (Pr) del aire como el de la superficie de las baterías (Pr0). Estos variarán con la temperatura de entrada del aire, por lo que para poder variar ese parámetro se plantea como una ecuación para cualquier situación. Por otro lado, el Pr0 va cambiando conforme se va calentando la

batería, por lo que linealizarla es imprescindible. En cada caso se obtuvo la siguiente ecuación utilizando los datos de tablas de propiedades del aire obtenidos de la bibliografía.

$$\text{viscosidad} = \frac{(208,2 - 184,6) * 10^{-6}}{50} * (77 - T_{\text{aire}}) + 208,6 * 10^{-6}$$

$$\text{conductividad} = k = \frac{(30 - 26,3) * 10^{-3}}{50} * (77 - T_{\text{aire}}) + 0,030$$

$$\text{Prandlt} = Pr = \frac{(0,7 - 0,707)}{50} * (77 - T_{\text{aire}}) + 0,7$$

$$\text{Prandlt superficial} = Pr_0 = \frac{(0,7 - 0,707)}{77 - 27} * (77 - T_{\text{bateria}}) + 0,7$$

Una vez se obtuvieron estas ecuaciones podremos usar la ecuación experimental proporcionada por Zhukauskas para calcular el Nusselt (Nu). Esta varía dependiendo, fundamentalmente, del número de Reynolds, del Prandlt, número de tubos por fila y otros tres parámetros más en función del Reynolds y del Prandlt. La ecuación es la siguiente:

$$\overline{Nu_D} = C * Re_{D,max}^m * Pr^{0,36} * \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{\frac{1}{4}}$$

Siendo:

- $\overline{Nu_D}$ el número de Nusselt para el diámetro de la batería
- C constante en función del Reynolds
- $Re_{D,max}$ número de Reynolds para la velocidad máxima
- m constante en función del Reynolds
- Pr número de Prandlt para el aire
- Pr_s número de Prandlt para la superficie de la batería

Los valores de C y m vienen tabulados según el número de Reynolds, como se muestra en la siguiente imagen:

Re_D	C	m
1 a 40	0,75	0,40
40 a 1000	0,51	0,50
10^3 a $2 * 10^5$	0,26	0,60
$2 * 10^5$ a 10^6	0,076	0,70

Tabla 6 - Valores tabulados de C y m en función de Reynolds

Una vez obtenido el valor del Nusselt, podemos calcular el coeficiente de convección (h) de esta situación, aprovechando la ecuación adimensional de esta:

$$\overline{Nu_D} = \frac{h \cdot D}{k} \rightarrow h = \frac{\overline{Nu_D} \cdot k}{D}$$

Finalmente, podremos estimar el calor refrigerado utilizando la ecuación de enfriamiento de Newton, que sigue la siguiente expresión:

$$Q_{refrigerado} = 1'02 \cdot A \cdot h \cdot \Delta T$$

- $Q_{refrigerado}$ calor refrigerado por el paso del aire
- A área de intercambio de calor entre batería y aire
- h coeficiente de convección calculado
- ΔT diferencia de temperatura entre la batería y el aire

La diferencia de temperatura entre la batería y el aire va cambiando conforme avanza el aire dentro del cajón de baterías, por lo que se estimará una diferencia logarítmica media de temperaturas, en base a la temperatura de salida estimada según datos de diseño (gráfica 24 temperatura de salida del aire).

$$\Delta T = \Delta T_{ml} = \frac{(T_s - T_i) - (T_s - T_o)}{\ln\left(\frac{T_s - T_i}{T_s - T_o}\right)}$$

Siendo:

- ΔT_{ml} temperatura media logarítmica
- T_s temperatura de la superficie o de batería
- T_i temperatura de entrada del aire
- T_o temperatura de salida del aire
- $\ln$ logaritmo neperiano

3.4.10 Calor almacenado e incremento de temperatura

En este apartado se desarrollará el cálculo del incremento de temperatura de las baterías en función de los parámetros calculados en los apartados anteriores. Este cálculo representa el incremento de temperatura en un tiempo infinitesimal, es decir, que durante un corto periodo de tiempo se tomará como que ha incrementado esa temperatura en función del resto de parámetros, que de un periodo a otro podrán ir variando. Poniendo un ejemplo, la velocidad de la motocicleta irá variando según el punto del circuito, por lo que el ReD irá

variando y este cambia el $Q_{refrigerado}$. También la intensidad irá variando según la demanda por lo que el calor generado también irá variando, pero durante un pequeño intervalo de tiempo, se considerará estable y se hará ese cálculo de incremento de temperatura.

Como se habló anteriormente, se debe de calcular el calor generado con las ecuaciones de pérdidas en función de la intensidad de demanda.

$$\text{Calor generado} = Q_{generado} = I^2 \cdot R = I^2 \cdot 0.030$$

Una vez conocido ese calor generado, se debe de calcular el calor refrigerado. Este será como se explicó en el anterior apartado, llegando a obtenerlo con la ecuación:

$$Q_{refrigerado} = 1'03 \cdot A \cdot h \cdot \Delta T = 1'02 \cdot A \cdot h \cdot (T_{bateria} - T_{aire})$$

Una vez obtenido ambos, podemos calcular el calor almacenado, que será la diferencia entre ambos calores:

$$Q_{generado} - Q_{refrigerado} = Q_{almacenado}$$

Siendo conocido el calor específico de las baterías, estimadas en 896 (kJ/kg K), se puede conocer qué incremento de temperatura se obtiene con el calor que se almacena en la batería, siguiendo la ecuación:

$$\Delta T = \frac{Q_{almacenado} \cdot t}{m \cdot c_p}$$

Siendo:

- ΔT incremento de temperatura
- $Q_{almacenado}$ calor almacenado
- t tiempo
- m masa de la pila
- c_p calor específico

En este punto, el análisis se puede realizar de dos maneras distintas llegando a los mismos resultados: por pila o por bandeja.

1) Por pila.

Se puede analizar el calor generado en una sola pila, dividiendo el calor generado total entre el número de pilas. Después el calor refrigerado por bandeja y dividirlo entre el número de pilas por bandeja, y obtener el incremento de temperatura de una batería con la ecuación anterior de ΔT . En esta se introduce calor almacenado resultante y la masa de una sola batería.

2) Por bandeja.

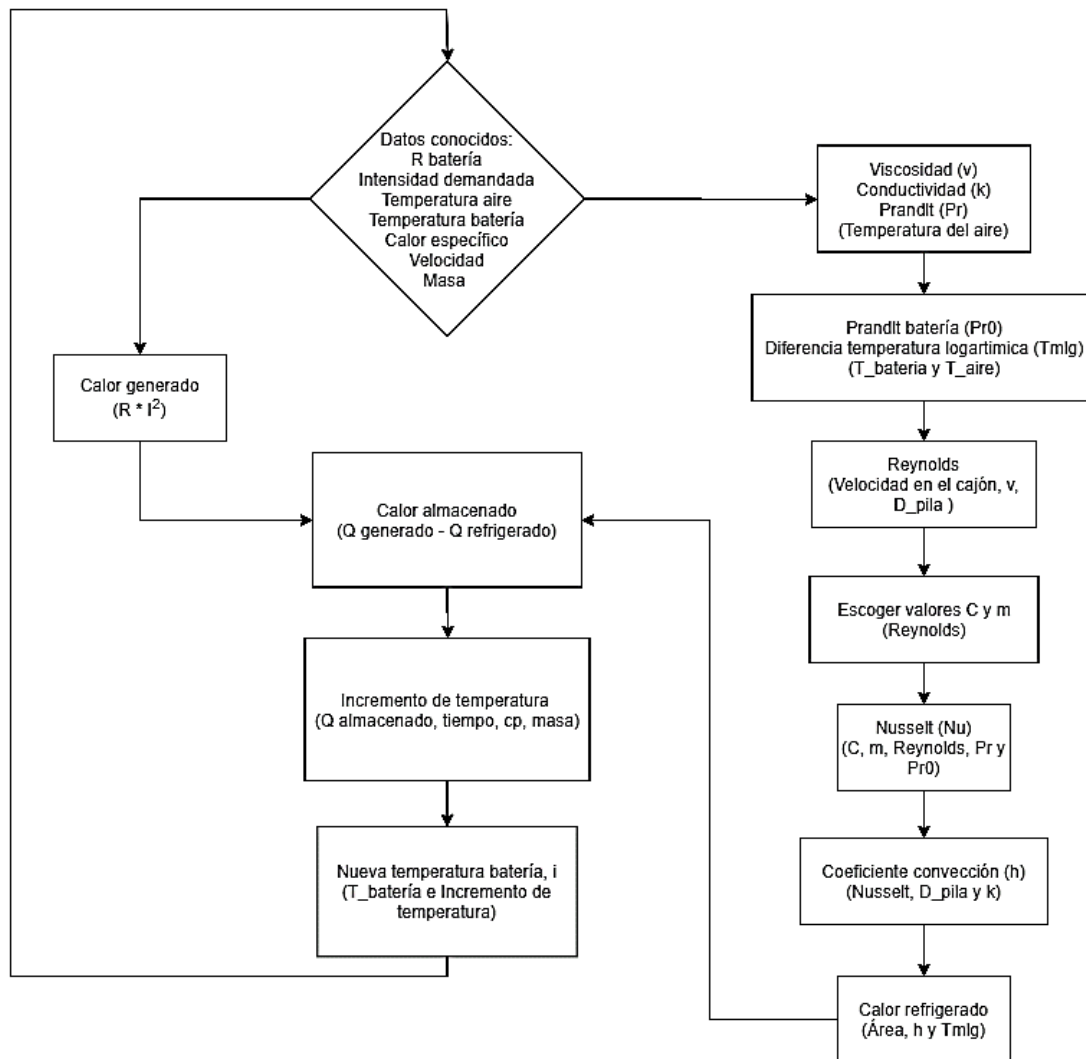
Se puede analizar cómo se comporta una bandeja completa, analizando el calor generado en una bandeja completa, multiplicando el calor generado por la proporción de pilas en dicha bandeja. Tras esto, se analiza el calor refrigerado de toda la bandeja, tal y como se explicó anteriormente, y se obtiene el calor almacenado de la bandeja. Por último, se utiliza la ecuación anterior de ΔT con la masa de las baterías de la bandeja y el calor almacenado resultante.

Para finalizar, habrá que calcular la temperatura final tras dicho periodo, que consistirá en sumar ese incremento de temperatura, a la temperatura que ya tenía la batería anteriormente. Se traduce en la siguiente ecuación:

$$T_{batería, i} = T_{batería, i-1} + \Delta T$$

3.4.11 Esquema resumen de pasos para incremento de temperatura en baterías

Se presentará, como ya se realizó en el consumo, un esquema dónde se explican los pasos a seguir, incluyendo de que datos anteriormente obtenidos o iniciales se usan en cada paso, mostrados entre paréntesis, y ver los diferentes flujos de cálculos que se realizan.



3.5 Modelo del controlador

3.5.1 Introducción

El controlador es el dispositivo responsable de la conversión de la señal eléctrica de tipo continua, que viene desde las baterías, a una señal tipo sinusoidal, siendo esta la corriente con la que trabaja el motor.

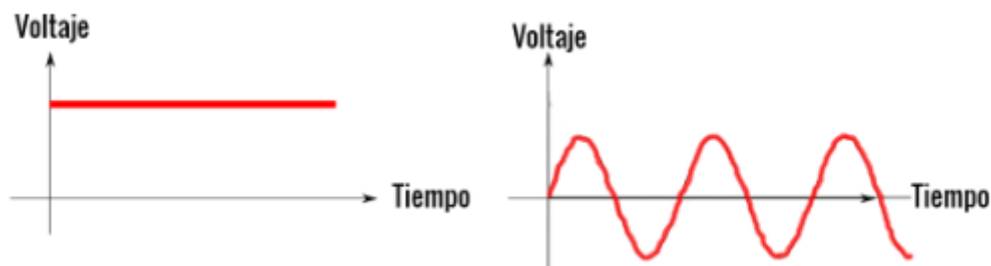


Ilustración 27 - Diferencia entre corriente continua típica de una batería (izquierda) y corriente alterna con la que funciona el motor (derecha)

Para ello, usa una serie de transistores, los cuales van abriendo o cerrando el circuito de manera coordinada para convertir esa señal continua en una alterna trifásica. Un esquema general de este tipo de circuito se puede ver en la ilustración 28.

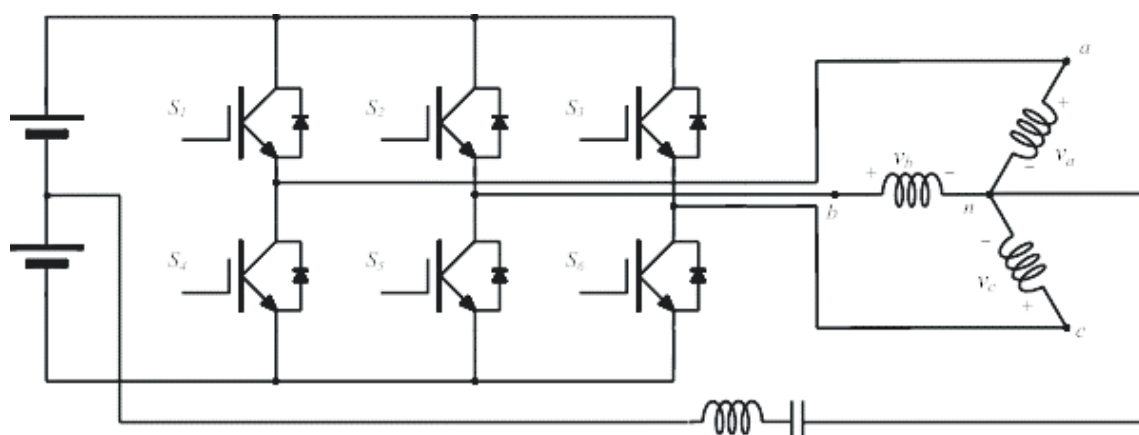


Ilustración 28 - Esquema de inversor trifásico

Con el objetivo de no complicar los cálculos ni entrar en el propio funcionamiento de dicho controlador, se aplicarán los valores eficaces de la tensión y de la corriente. De esta manera, con unos simples cálculos podremos conocer la potencia que está pasando por el controlador y las pérdidas que se producen por el inversor. Recordemos que el objetivo es conseguir estimar la pérdida de potencia y el calentamiento que se produce en dicho elemento, no realizar un estudio profundo del funcionamiento del circuito, formas de onda o cambios de frecuencia.

Entrando ya en el controlador que usa el equipo EPS JAEN UJATEAM, es el SEVCON GEN4 Size 6. Fue el elegido debido a que el rango de voltajes e intensidades en los que trabaja se adapta a las necesidades de la competición. Estos rangos se ven en la tabla 7.

INPUT VOLTAGE				
	24V only (Size 2 24V)	24/36V controllers	36/48V controllers	72/80V controllers
Conventional working voltage range (Note 1)	16.8V to 28.8V	16.8V to 43.2V	25.2V to 57.6V	50.4V to 96V
Working voltage limits (Note 2)	12.7V to 34.8V	12.7V to 52.2V	19.3 V to 69.6 V	39.1 V to 116 V
Non-operational overvoltage limits:	39.6V	59.4V	79.2 V	132 V
Battery voltage droop:	Vnom to 0.5 x Vnom for 100 ms			
Input protection:	Input protected against reverse connection of battery			

Tabla 7 - Rangos de funcionamiento de los diferentes modelos de controlador de la marca Sevcon.

Conociendo que este es el inversor que se dispone, pasamos a analizar las características de dicho controlador. A partir de estos, se podrá realizar un análisis de su funcionamiento en régimen continuo.

Será necesario conocer el régimen de temperatura a la que trabaja. Según la ilustración 29, la temperatura límite a la cual tiene un funcionamiento normal es hasta 75°C. A partir de esta, empieza a disminuir la intensidad suministrada para frenar el ritmo de calentamiento, evitando así el deterioro de los componentes del sistema. A 85°C, la intensidad que deja pasar el inversor es nula, por lo que el motor, y, por tanto, el prototipo, se pararía.

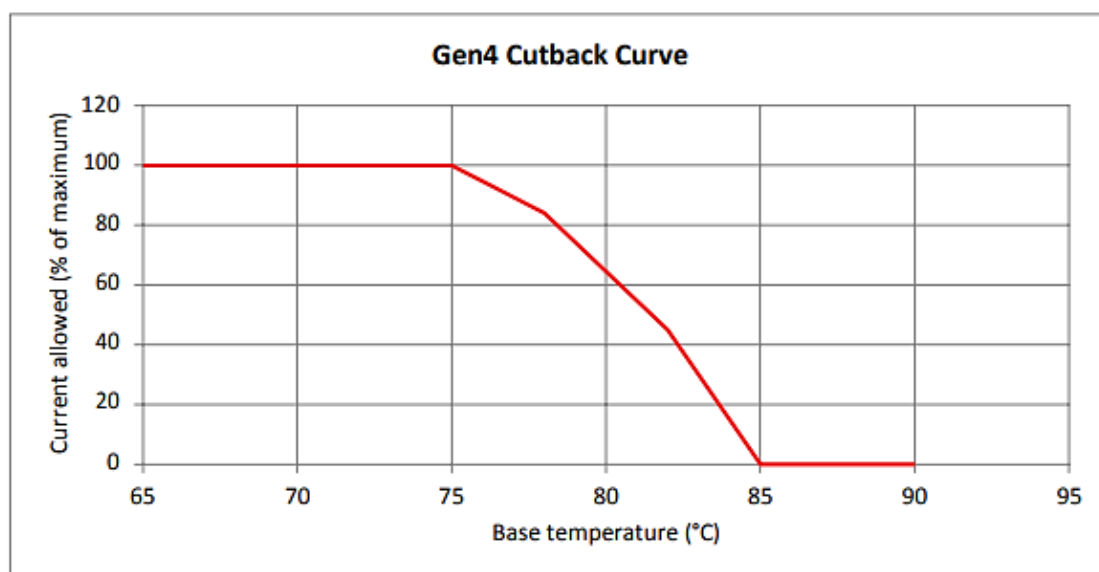


Ilustración 29 – Corriente permitida en función de la temperatura del controlador

3.5.2 Calor generado

El calor generado en el inversor se debe principalmente a las pérdidas en los transistores de potencia, MOSFET, y en el circuito de control. Los primeros habrá que estudiar el componente y sus curvas características, las cuales variarán en función de la temperatura y la intensidad. Por el contrario, las pérdidas en el circuito de control se tomarán como constantes en función de datos obtenidos del manual.

Las pérdidas producidas en los inversores trifásicos son de 2 tipos: pérdidas por conducción y pérdidas por conmutación. Mientras las primeras se tratan de las pérdidas de los componentes al dejar pasar la corriente, las segundas son las pérdidas que se producen en los componentes al abrir y cerrar el circuito de manera controlada. Con la suma de ambas, se obtendrá la pérdida de potencia en el controlador y, por tanto, su calor generado.

$$P_{totales} = P_{conducción} + P_{conmutación}$$

3.5.2.1 Pérdidas por conducción

Las pérdidas de conducción es la energía disipada en forma de calor que aparece cuando el componente se encuentra en conducción. En estado de conducción existen dos

elementos que trabajan de manera distinta: el transistor y su diodo. Debido a que el inversor a estudiar utiliza MOSFET, ambos están incluidos de manera intrínseca.

Cuando conduce el transistor, se tratará como la intensidad activa que circula por la resistencia de dicho transistor. Por otro lado, está el diodo. Este conducirá en los intervalos que se necesite conducir la corriente reactiva. En esos intervalos, la carga devuelve intensidad a la batería porque ésta absorbe intensidad por el terminal positivo (la intensidad tiende a circular en el mismo sentido que en el instante anterior). El periodo o ángulo de conducción de los diodos será igual al argumento de la carga o desfase entre la tensión y la corriente, definido como ϕ . Para cargas totalmente resistivas $\cos(\phi)$ será igual a 1, por lo que no serán necesarios. En el caso opuesto, un $\cos(\phi) = 0$ significará que es totalmente reactiva. Esta pérdida de potencia se tratará como:

$$I_{rms, t} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{2}{3}\pi - \phi} I_{rms\ motor}^2 dt} = I_{rms, m} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{2}{3}\pi - \phi} dt}$$

$$= I_{rms, m} \sqrt{\frac{\frac{2}{3}\pi - \phi}{2\pi}}$$

$$P_{transistor} = I_{rms, t}^2 * R_{ds(on)}$$

$$I_{rms, D} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\frac{2}{3}\pi - \phi}^{\frac{2}{3}\pi} I_{rms\ motor}^2 dt} = I_{rms, m} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{2}{3}\pi - \phi}^{\frac{2}{3}\pi} dt}$$

$$= I_{rms, m} \sqrt{\frac{\phi}{2\pi}}$$

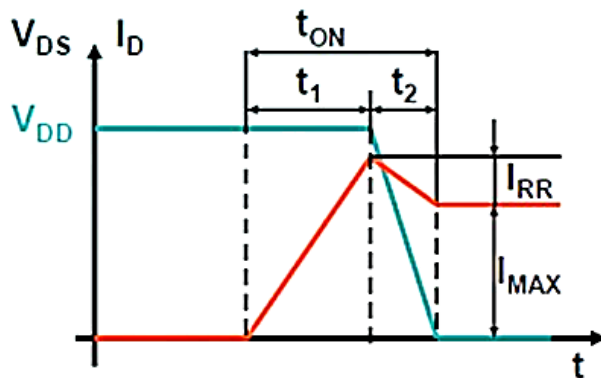
$$P_{diodo} = I_{D,rms} * V_{diodo}$$

Y, por tanto, las pérdidas totales en conducción serán:

$$P_{conducción} = P_{transistor} + P_{diodo}$$

3.5.2.2 Pérdidas por conmutación

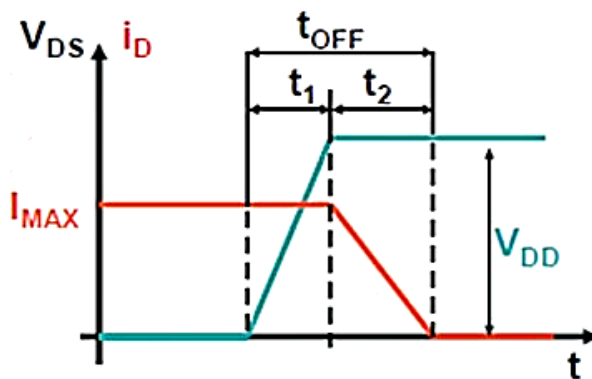
Las pérdidas por conmutación son aquellas pérdidas producidas durante la conexión y desconexión del componente. Durante el intervalo de tiempo en que se producen este cambio de estado, una cantidad de energía se pierde en el componente. Su manera de calcularlo es:



$$E_{on}(t) = \int_0^{T_{on}} i_d(t) \cdot u_{ds}(t) \cdot dt$$

$$E_{on} = \frac{I_{max} V_{DD} T_{on}}{2} + \frac{I_{RR} V_{DD} \left(T_{on} + \frac{t_1}{2} \right)}{3}$$

$$I_{RR} = \sqrt{2Q_{rr} \frac{di}{dt}}$$



$$E_{off}(t) = \int_0^{T_{off}} i_d(t) \cdot u_{ds}(t) \cdot dt$$

$$E_{off} = \frac{I_{max} V_{DD} T_{off}}{2}$$

Los tiempos de cada uno de los intervalos serán obtenidos del Datasheet de los transistores de potencia utilizados en el inversor.

Una vez obtenida la energía perdida en cada conmutación, obtendremos la potencia disipada multiplicando por la frecuencia de conmutación, para el caso de este controlador será de 16 kHz.

$$P_{conmutación} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f$$

3.5.2.3 Datos del transistor de potencia

En el manual del controlador no aparecen qué transistores usan, por lo que se tuvo que realizar una búsqueda para encontrar dichos modelos y cómo estaban conectados. En *EndlessSphere*, un foro sobre vehículos eléctricos, se encontró un foro que nos habla de dicho controlador y nos enseña unas fotos de su conexión. De ahí se consiguió conocer que los transistores que utilizan son los OptiMOS IPP075N15N 150V. Además, se observa en las fotos, que se encuentran 10 conectados en paralelo, reduciendo así la intensidad que circula por cada uno.



Ilustración 30 - Interior del controlador GEN6 de Sevcon. Se puede distinguir la zona izquierda el circuito de potencia y a la derecha el circuito de control. En la parte de potencia podemos distinguir los 10 mosfets en paralelo que trabajarán como uno solo, acompañado de 7 condensadores.

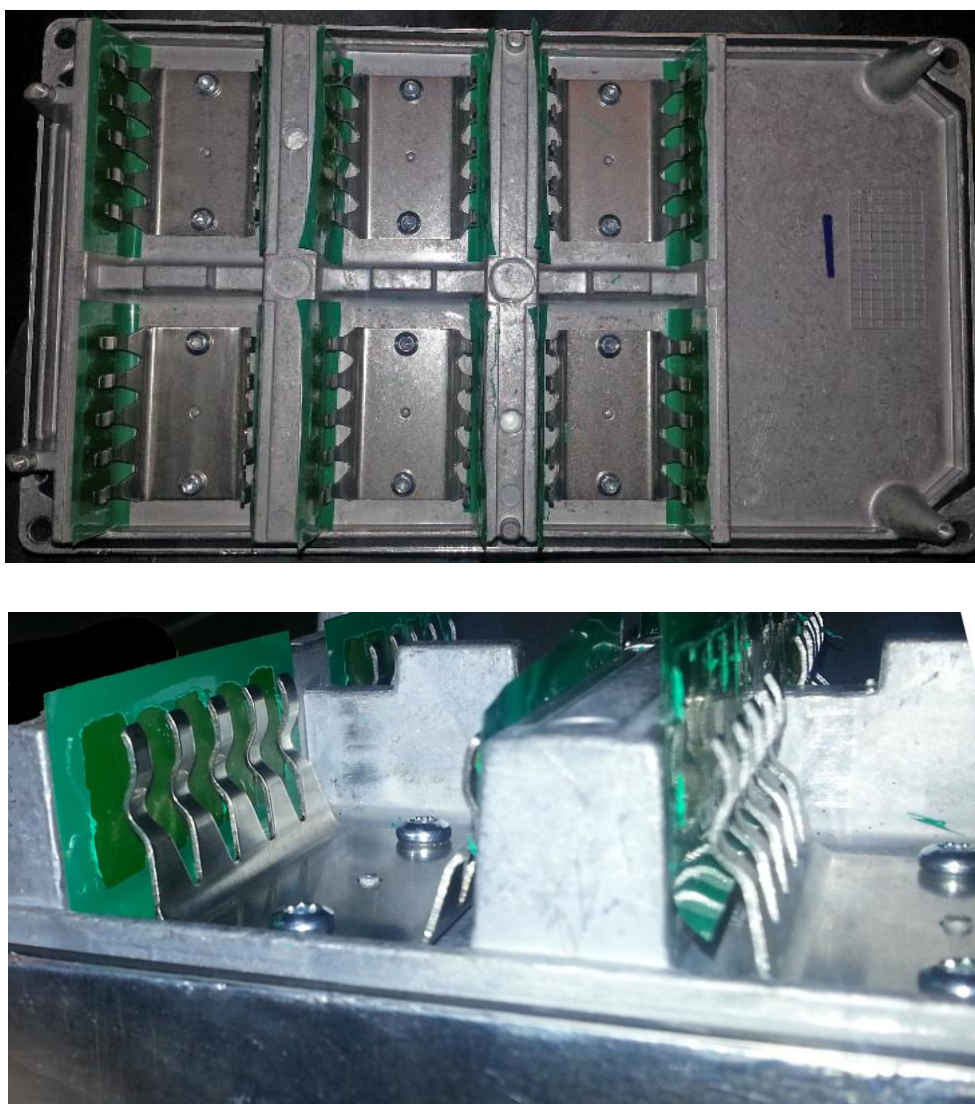


Ilustración 31 - Vista del disipador térmico interior. En la imagen superior se encuentra la vista frontal y en la inferior la lateral. En ella se situarán los mosfets y se refrigerarán por conducción.

La hoja de características será incluida en los anexos. Link dónde se encontró toda la información en: <https://endless-sphere.com/forums/viewtopic.php?t=66290>

Una vez en dicha hoja de características nos encontramos con diversidad de datos y gráficas, pero el valor relevante es el dato de $R_{ds} = 7,2 \text{ m}\Omega$. Este valor representa la resistencia que produce el MOSFET a que pase la corriente al motor y, obviamente, serán las pérdidas de nuestro controlador. En la parte final se muestran una serie de gráficas que habrá que analizar.

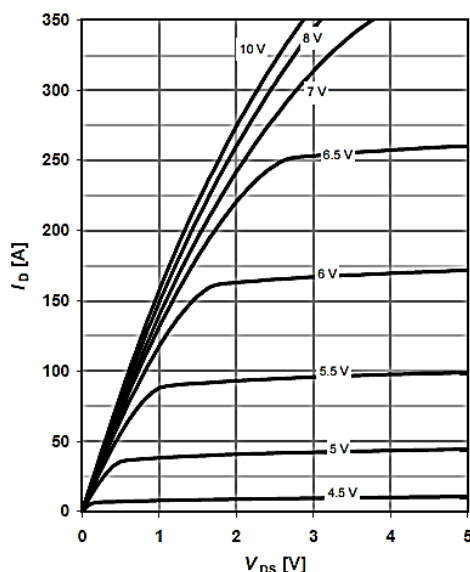
La primera de ella es la nº 5. En ella muestra la variación de I_d , la intensidad drenaje o intensidad que circula por el transistor hacia el motor, frente a V_{ds} , la caída de tensión que se

produce en la puerta drenaje-fuente. También va en función de la tensión de puerta (o gate), que se considerará que funciona siempre a tope, es decir, 10 V, para poder darnos la máxima potencia.

5 Typ. output characteristics

$$I_D = f(V_{DS}); T_J = 25^\circ\text{C}$$

parameter: V_{GS}



6 Typ. drain-source on resistance

$$R_{DS(on)} = f(I_D); T_J = 25^\circ\text{C}$$

parameter: V_{GS}

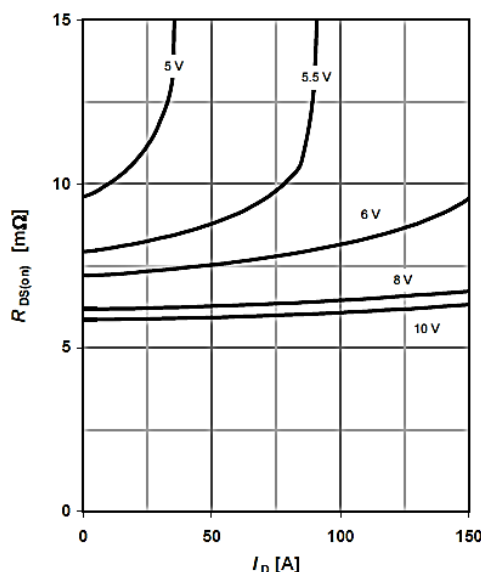


Ilustración 32 - Curvas características del mosfetOptiMOS IPP075N15N. A la izquierda la curva corriente del mosfet frente a la tensión drenaje-fuente. A la derecha, la resistencia frente a la corriente según la tensión de la puerta.

Ambas para temperatura de unión de 25°C.

El funcionamiento de la gráfica nº 5 sería la siguiente:

1. Calcular la intensidad de salida y entrar en la gráfica por I_D igual a ese valor dividido entre diez, por haber diez transistores en paralelo
2. Se entra en la curva de 10 V, por ser la tensión de puerta que nos daría más potencia
3. Hallamos V_{DS} que es la caída de tensión del transistor
4. Hallar la potencia que cae en ese transistor multiplicando $I_D \cdot V_{DS}$

Los valores que hallaremos serán bastante pequeños, del orden de menos de 50 A y menos de 1 V. Si observamos en la zona en la que trabaja ese orden de magnitud se puede considerar prácticamente constante, sigue una recta, esto quiere decir, que, según la ley de Ohm, puede obtenerse una resistencia equivalente. Utilizando $R = V/I$ y aproximando los valores

de la gráfica a 50 A y 0,35V tenemos $R=V/I= 0,35/50 = 0,007 \Omega$. Esta resistencia no es otra que el valor de resistencia que nos mencionan anteriormente de 7,2 mΩ. Por otro lado, aunque podríamos considerar esta resistencia como las pérdidas buscadas, se debe de tener en cuenta que esta no es constante, sino que varía con otros factores como la intensidad que circula, I_d , o la temperatura.

Por ello, se analizará ahora la curva de la figura nº 6 del manual, que aparece en la imagen anterior a la derecha. En esta se observa cómo va variando el valor de esa resistencia del transistor para diferentes intensidades. El caso de estudio será la inferior, la de tensión de puerta de 10 V. El comportamiento es prácticamente lineal, teniendo un pequeño incremento conforme aumenta la intensidad, pero debido a que la intensidad que pasará por dicho transistor de potencia será inferior a 50 A, se considerará constante para este caso. Si se tratase de otro caso, se intentaría estimar esa variación en función de la intensidad I_d .

Por otro lado, está la temperatura. Este si es más relevante debido a que la variación de la resistencia R_{ds} en estado activo varía desde 5 mΩ a -60°C a 17mΩ a 180°C. Obviamente, el rango de aplicación, según se vio en los datos del inversor, variarán entre la temperatura ambiente, unos 20°C, a unos 80°C, valor al cual comienza a cortar potencia. A pesar de que en este rango es bastante menor la variación, sigue siendo no descartable, por lo que la mejor opción es obtener la curva que relaciona esos valores y poder calcular su resistencia a cualquier temperatura.

9 Drain-source on-state resistance

$$R_{DS(on)}=f(T_J); I_D=100 \text{ A}; V_{GS}=10 \text{ V}$$

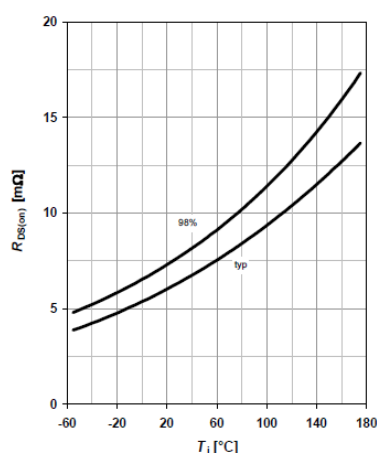


Ilustración 33 - Variación de la resistencia drenaje-fuente respecto a la temperatura de la unión para el caso típico y del 98%.

Para obtener su ecuación, se utilizó el mismo método que el descrito en las curvas de descarga de baterías, se introdujo dicha foto en *EngaugeDigitizer*, en él, se seleccionaron los ejes y sus valores. ras esto se seleccionaron una serie de valores de la curva y nos da como resultado un .csv dónde tratar los datos. El resultado es un polinomio de grado 2 que se aproxima perfectamente a dichos datos.

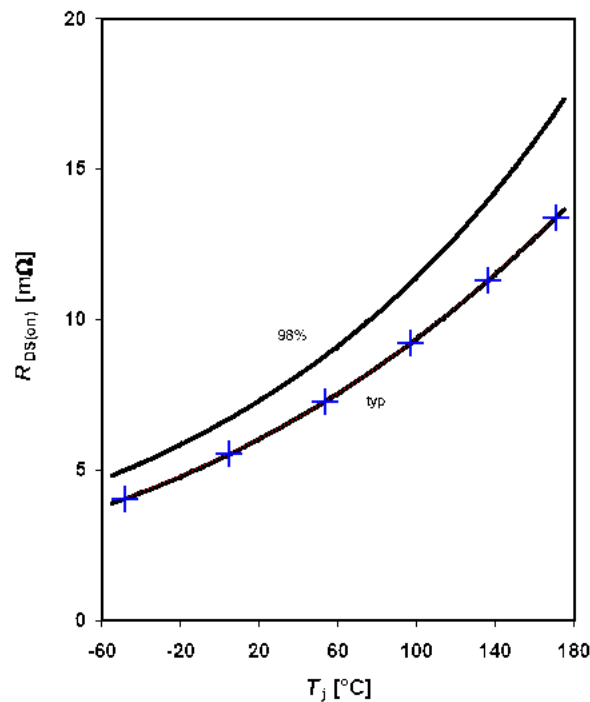


Ilustración 34 - Linealización de la curva con el programa EngaugeDigitizer.

$$R_{DS,on} = 0,0001 * T^2 + 0,0306 * T + 5,3483$$

En la gráfica nº 12 nos encontramos las características del diodo intrínseco del MOSFET. Para obtener los datos se procederá como en el caso anterior, obteniendo varios puntos y obteniendo la tensión V_{sd} en función de la intensidad que circula I_d y de la temperatura. Para obtenerla en función de la temperatura se obtendrá el valor para 175°C y luego para 25°C. Tras eso se interpolará linealmente con la temperatura de la unión.

12 Forward characteristics of reverse diode

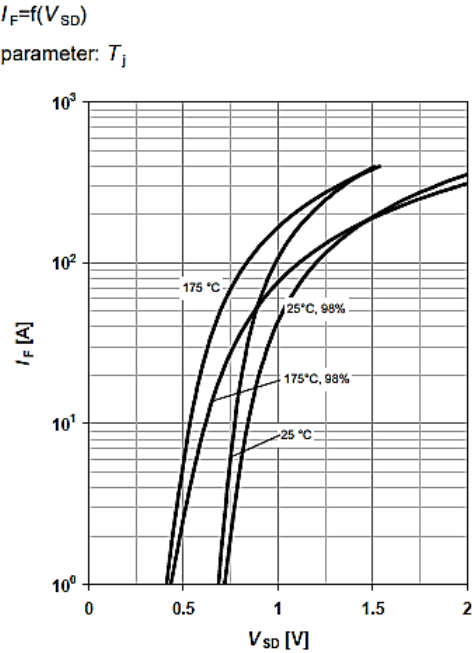


Ilustración 35 - Caída de tensión del diodo del transistor OptiMOS IPP075N15N según la intensidad y la temperatura

Será necesario también conocer los tiempos de encendido y apagado del transistor para obtener sus pérdidas de conmutación, utilizando el método explicado anteriormente. Para ello, se recurrirá a los datos del Datasheet.

Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$V_{DD}=75\text{ V}, V_{GS}=10\text{ V},$ $I_D=100\text{ A}, R_G=1.6\ \Omega$	-	25	38	ns
Rise time	t_r		-	35	52	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	46	69	
Fall time	t_f		-	14	21	

Ilustración 36 - Tiempos de encendido y apagado del transistor OptiMOS IPP075N15N

Con esta ecuación, podemos ya estimar las pérdidas de calor en función de la temperatura y la intensidad que está circulando. Para ello utilizaremos el efecto Joule como se usó en las baterías.

1. Conocida la temperatura del transistor, hallaremos R_{ds}
2. Conocida la intensidad que circula podremos hallar el calor generado con:

$$P_{transistor} = I_{rms, t}^2 * R_{ds}$$

$$= \left(\frac{I_{rms, t}}{10 (\text{mosfet paralelo})} \right)^2 * R_{DS, on}(T) * 20 \left(\frac{\text{mosfet}}{\text{fase}} \right) * 3 (\text{fase})$$

$$P_{diodo} = I_{rms, D}^2 * V_{sd}$$

$$= \left(\frac{I_{rms, D}}{10} \right)^2 * V_{ds}(T, I) * 20 \left(\frac{\text{mosfet}}{\text{fase}} \right) * 3 (\text{fase})$$

$$P_{conmutación} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f$$

$$P_{conmutación} = \left(\frac{I_{max} V_{DD} T_{on}}{2} + \frac{I_{RR} V_{DD} \left(T_{on} + \frac{t_1}{2} \right)}{3} + \frac{I_{max} V_{DD} T_{off}}{2} \right) \cdot f$$

Siendo I_{RR} :

$$I_{RR} = \sqrt{2 Q_{rr} \frac{di}{dt}} = \sqrt{2 \cdot 478 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 9,778 \text{ A}$$

Utilizando los datos del Datasheet:

Reverse recovery charge	Q_{rr}	$di_F/dt=100 \text{ A}/\mu\text{s}$	-	478	-	nC
-------------------------	----------	-------------------------------------	---	-----	---	----

Tener en cuenta que:

- Se divide entre diez por ser diez transistores de potencia en paralelo por fase y la intensidad se distribuyen igualmente por cada uno de ellos.
- El circuito de una fase tiene diez MOSFET a la entrada y otros diez a la salida, por lo que dicha pérdida habrá de ser multiplicada por 20
- La resistencia del transistor y la caída de tensión en el diodo varían con la temperatura, por lo que habrá de ser calculada antes de introducirla en esta ecuación

Además de estas pérdidas, también aparecen otras pérdidas fijas relacionadas con el circuito de control. Estas serán estimadas según la tabla de consumos de intensidad dadas en

el manual. Se conoce también la tensión de alimentación de dicho circuito de control, siendo de 12 V.

$$Pf = 12 (V) \cdot (2 + 2 + 1)(A) = 60 W$$

	Device	Current
A	Contactor de línea	2 A
	Contactor de bomba	2 A
	Circuitos de control	1 A

Ilustración 37 - Corriente circulante por el circuito de control

3.5.3 Calor refrigerado

En este apartado se estudiará la cantidad de calor que refrigera el controlador. De esta forma, el componente es capaz de mantener su temperatura dentro de su rango de funcionamiento sin deteriorarse. Existen dos casos: refrigeración por convección no forzada y forzada. La primera de ellas suele darse en forma de resistencia térmica y debido a la diferencia de temperaturas, consigue perder parte del calor generado. Por otra parte, la refrigeración por convección forzada, se produce por un flujo de aire que pasa alrededor del elemento, llevándose con él parte de su energía calorífica.

Respecto a la refrigeración por convección no forzada, tenemos una tabla en el manual que menciona cuanta es su resistencia térmica, en °C/W, siendo esta la oposición que ofrece un cuerpo al paso de un flujo calorífico. Para conocer los valores de dichas resistencias tendremos que buscar en el apartado de requerimientos de refrigeración, el cual, se muestra un fragmento a continuación.

Cooling requirements

To ensure you get the maximum performance from your Gen4 controller:

- Keep it away from other heat generating devices on the vehicle
- Maintain its ambient operating temperature below the specified maximum (see ‘Operating environment’ on page 4-6)

To obtain maximum performance it is important to keep Gen4’s base plate within the operating temperature range. To do this, mount Gen4 to a surface capable of conducting away the waste heat. Finned heatsinks are considerably better at doing this than flat plates. For example, a finned heatsink used at Sevcon has a footprint of 330mm x 200mm and thermal resistance of 0.3°C/W, whereas a plate approximately 420 mm x 270 mm x 9.5 mm will give approximately the same thermal performance (0.3°C/W). Ratings achievable with conductive heatsinking are shown in Figure 11 on page 4-3.

In Sevcon’s experience the thermal resistance of the stand-alone Gen4 packages and achievable thermal resistances to ambient using conductive heatsinking are as shown in the table below. These are given as a guide: actual performance in an application must be verified.

Gen4 Size	Thermal resistance without additional heatsinking (°C/W)	Thermal resistance achievable with finned heatsink (°C/W)	Dimension of finned heatsink (W x L)
Size 2	0.7	0.5	250mm x 180mm
Size 4	0.6	0.3	330mm x 200mm
Size 6	0.5	0.2	330mm x 280mm

Ilustración 38 - Requerimientos de refrigeración dados por el fabricante Sevcon

Por otra parte, será necesario realizar el cálculo del calor refrigerado en el caso de ventilación forzada, que recordemos, será propiciado por el propio movimiento de la motocicleta. En este caso, consistirá en estudiar cuanto es el calor refrigerado por una circulación de aire alrededor de dicho controlador. Se simplificará estudiando el calentamiento y refrigeración de la plancha inferior de aluminio, que es el principal elemento que facilita ese intercambio térmico, cosa que no se produce en el resto de la carcasa.

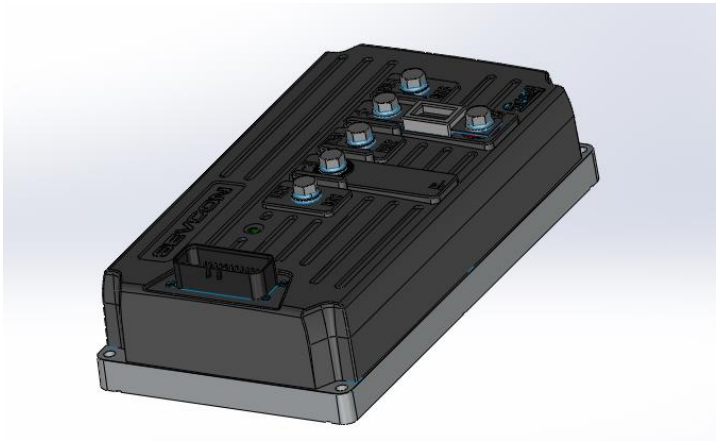


Ilustración 39 - CAD 3D del controlador GEN4 de Sevcon

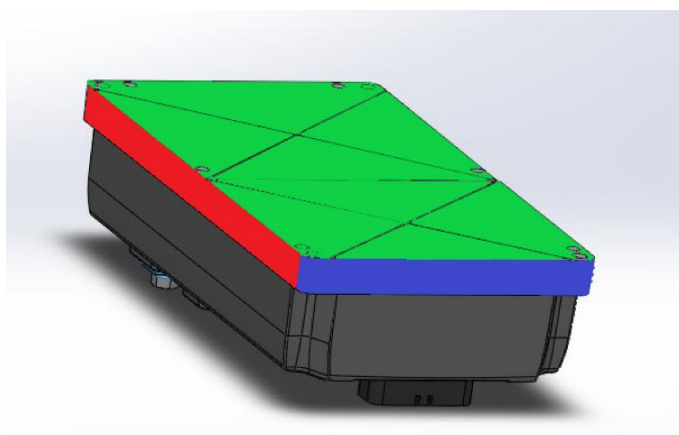


Ilustración 40 - Representación de las diferentes zonas según su orientación. La zona verde será la inferior, la roja la lateral y la azul la frontal.

Tenemos aquí una fotografía del CAD disponible del controlador. En la primera podemos observar el modelo que se corresponde con el anteriormente citado. En la segunda imagen, se le ha dado la vuelta para ver la zona inferior, zona dónde se sitúa la plancha metálica de aluminio. La plancha actúa como disipador térmico y, por tanto, la que analizar su interacción con el entorno provocando la búsqueda refrigeración.

Entrando en la refrigeración, para realizar su análisis se han diferenciado tres partes según su orientación. Para diferenciarlas se han coloreado de los colores: verde (zona inferior), azul (zona frontal) y rojo (zona lateral). De la zona frontal y lateral existen otras dos áreas en su zona totalmente opuesta de la placa. Respecto la zona inferior esta solo dispone de una sola área.

La necesidad de dividirla en estas tres zonas es por las diferentes velocidades de paso del aire y las áreas de intercambio. Las zonas correspondientes a inferior y lateral (colores verde y rojo), se pueden considerar con una velocidad del aire próxima a la del movimiento. Sin embargo, en la zona frontal (azul) y, por tanto, en la trasera, la velocidad del aire será prácticamente nula por tratarse de una zona de remanso. Es decir, en el caso de la frontal, el aire llega a impactar con esa zona reduciéndose la velocidad e incrementando la presión, por lo que esa velocidad se puede prácticamente despreciar y considerar como refrigeración nula. Por el contrario, en la zona posterior se trata de una depresión. En esta zona, el aire circundante tiene una presión mayor por lo que confina ese aire ahí, haciendo que su velocidad sea prácticamente nula y se pueda despreciar, al igual que la otra zona azul.

El método a seguir para calcular el calor refrigerado será el de utilizar el símil de placa plana. Se tomará por tanto la circulación de aire paralela a la superficie.

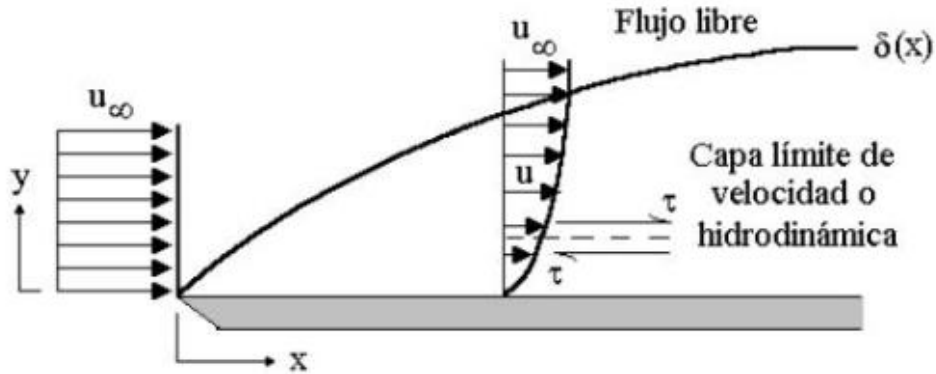


Ilustración 41 - Esquema de capa límite de una placa plana

Como se explicó anteriormente en el apartado 3.3.9) *Calor refrigerado en baterías*, se usarán una serie de correlaciones experimentales de cálculo de convección, pero esta vez aplicado a placas planas. El primer paso será obtener el Reynolds a partir de la velocidad de la moto, la longitud de la zona y la viscosidad del aire.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{v \cdot L}{\nu} = \frac{v \cdot 0'305}{15'27 \cdot 10^{-6}}$$

El valor de L es el mismo para ambas zonas, tanto roja como verde, de 305 mm. Por tanto, se conoce que el Reynolds será el mismo.

Una vez obtenido Re, comprobaremos si está en régimen: laminar, turbulento o capa límite mezclada. A partir de cuál de los tres regímenes estemos, se escogerá una ecuación de cálculo u otra. Las 3 ecuaciones son:

- 1) Laminar: $Nu = 0'664 (Re)^{1/2} (Pr)^{1/3}$
- 2) Turbulento: $Nu = 0'0296 (Re)^{4/5} (Pr)^{1/3}$
- 3) Mixta: $Nu = (0'037 (Re)^{4/5} - 871) (Pr)^{1/3}$

Calcularemos el Prandtl, mediante la ecuación linealizada de este coeficiente según la temperatura del medio (aire) como:

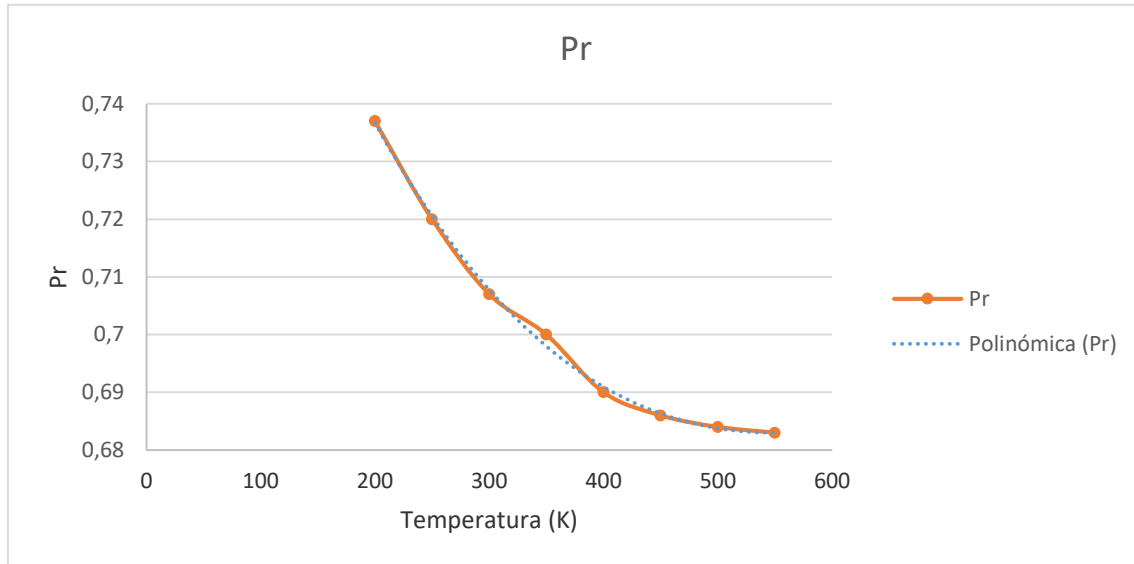


Ilustración 42 - Curva Prandtl vs Temperatura

Tras esto, calcularemos la conductividad térmica del aire, k , usando la ecuación:

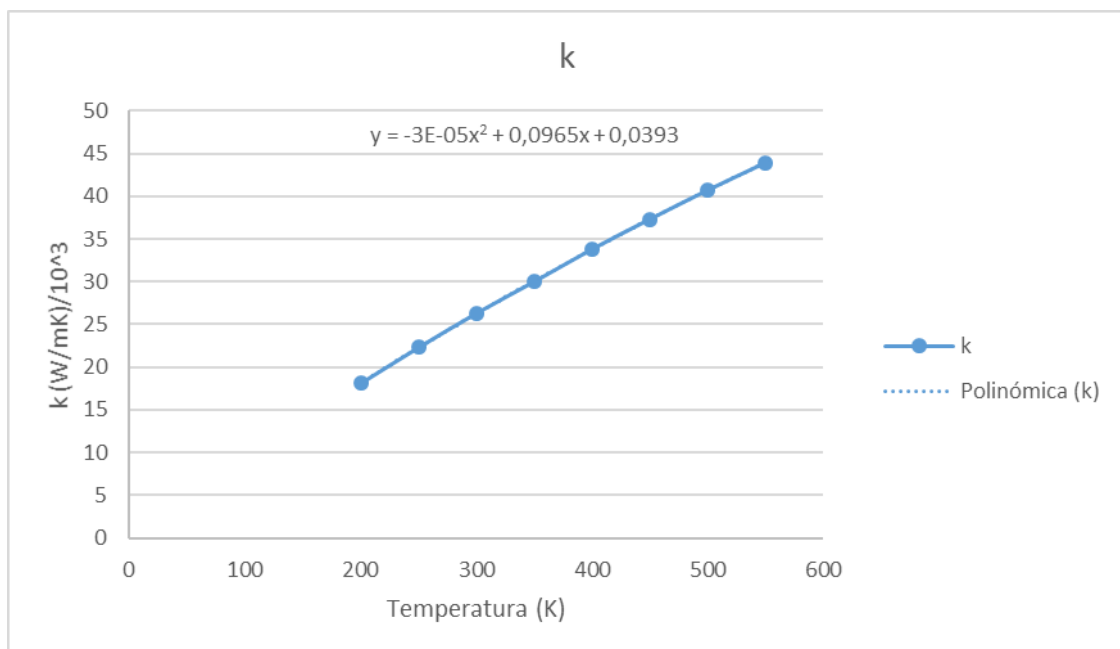


Ilustración 43 - Curva conductividad térmica (k) vs temperatura

Y finalmente obtenemos el valor de Nusselt según las ecuaciones mostradas anteriormente según el régimen. Tras esto, será solo necesario sustituir en la siguiente:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

Obteniendo así el coeficiente h de convección buscado. Una vez obtenido, podemos calcular finalmente el calor refrigerado:

$$\dot{Q} = A \cdot h \cdot (T_s - T_f)$$

Siendo:

- $\dot{Q}$ el flujo de calor.
- A el área de transferencia de calor, que variará según sea la superficie lateral (roja) o inferior (verde).
- h el coeficiente de convección.
- $T_s - T_f$ la diferencia de temperaturas entre el sólido y el fluido, en nuestro caso, la temperatura del controlador (T_s) y la del aire circulante (T_f).

3.5.4 Calor almacenado e incremento de temperatura

Conociendo el calor refrigerado, se pasará a conocer el calor almacenado, el cual será la diferencia entre el calor generado y el refrigerado.

$$Q_{almacenado} = Q_{generado} - Q_{refrigerado}$$

Como se explicó al principio del apartado, tenemos la ecuación que nos relaciona la intensidad del motor con el calor generado, valor conocido durante la iteración de la simulación, por lo que es simplemente sustituir.

$$Q_{generado} = P_{transistor} + P_{diodo} + P_{conmutación}$$

$$Q_{refrigerado} = A \cdot h \cdot (T_s - T_f)$$

$$\text{Siendo } A = A_{verde} + 2 \cdot A_{roja} = 0'305 \cdot 0'170 + 2 \cdot 0'305 \cdot 0'02 = 0'06405m^2$$

El resto de parámetros irán cambiando conforme la situación de la moto en la simulación.

Para concluir, será necesario estimar la nueva temperatura del controlador al terminar la iteración. Se realizará siendo conocidas las masa de la placa, de 4'6 kg y material aluminio con $c_p = (900 \text{ kJ/kg K})$.

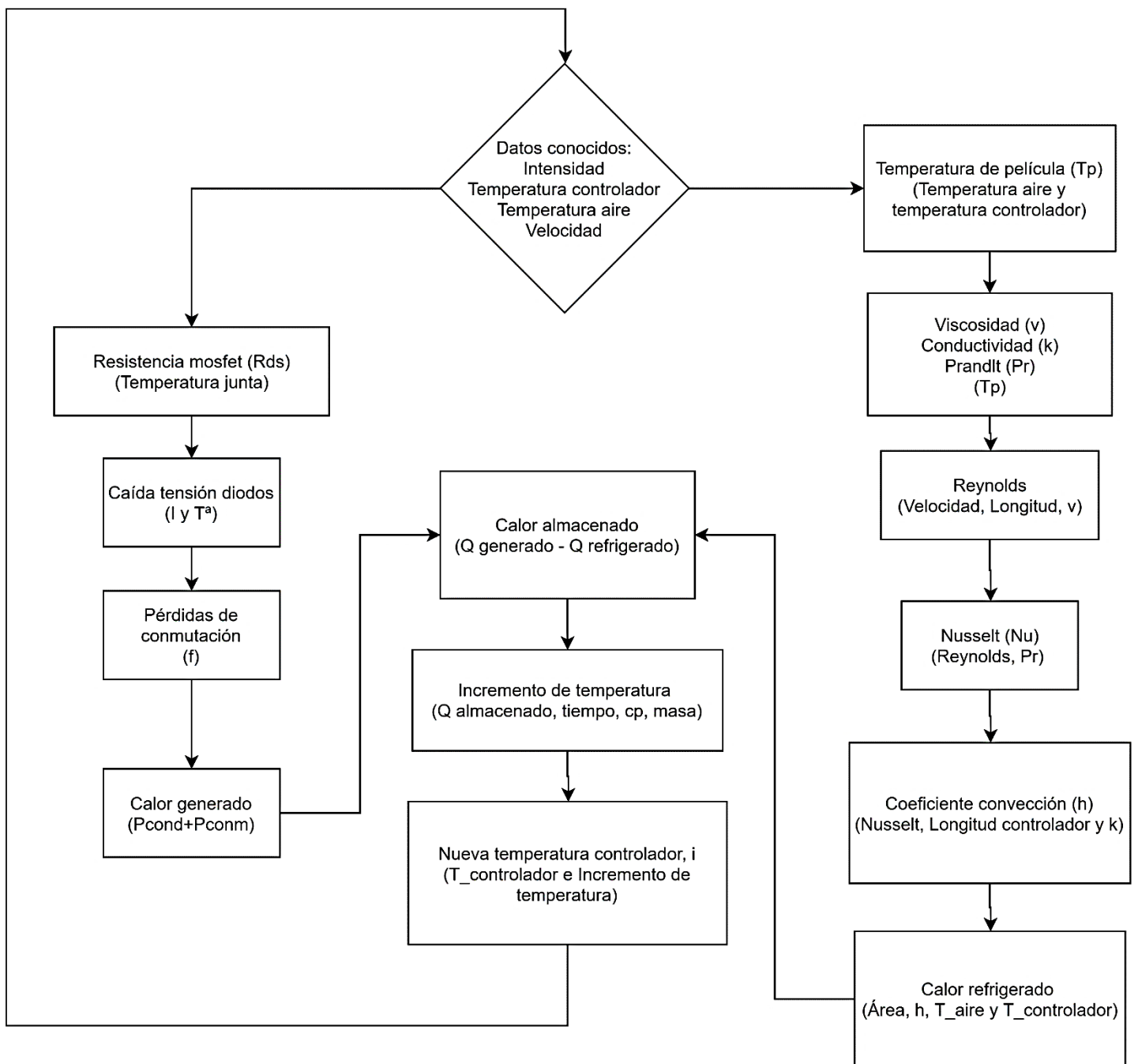
$$T_{\text{controlador}} = \frac{Q_{\text{almacenada}} \cdot t}{m \cdot c_p} + T_{\text{controlador}-1}$$

Siendo:

- $T_{\text{controlador}}$ la nueva temperatura del controlador en dicha iteración.
- $T_{\text{controlador}-1}$ la temperatura del controlador en la iteración anterior.
- m la masa de la plancha de aluminio.
- c_p el calor específico del aluminio
- t el paso de tiempo en dicha iteración
- $Q_{\text{almacenada}}$ el calor almacenado, siendo la diferencia entre el calor generado y el refrigerado por la convección.

3.5.5 Esquema resumen del cálculo del incremento de temperatura en el controlador

Se presentará como se realizó anteriormente otro esquema resumen de todos los pasos seguidos para el cálculo del incremento de temperatura en el controlador. Para ello se parte de una serie de datos iniciales o de la iteración anterior, y se siguen diferentes ramas según el dato buscado. Entre comillas se suele presentar qué datos son necesarios para calcular cada paso.



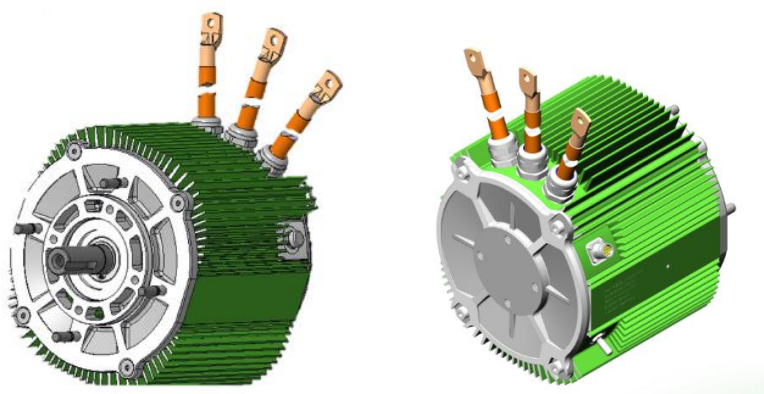
3.6 Modelo del motor eléctrico

En este apartado se desarrollará todo lo relacionado con el motor eléctrico que se utilizará en la competición MotoStudent edición 19/20, el cual, es obligatorio e igual para todos los competidores.

Se analizarán las diferentes características y parámetros que se nos proporciona en su hoja de características y cómo éstas se pueden modelar. Además, se mostrará qué mapas de motor serán utilizados, modelización de las pérdidas, calor refrigerado y como incrementa su temperatura a lo largo de la carrera.

3.6.1 Motor ENGIRO de MotoStudent 19/20

El motor para la edición 19/20 de MotoStudent es un motor síncrono de imanes permanentes de la empresa alemana ENGIRO. Éste trabaja entre tensiones que van desde los 48 hasta los 200 V, está refrigerado por aire y tiene una potencia nominal de 13 kW.



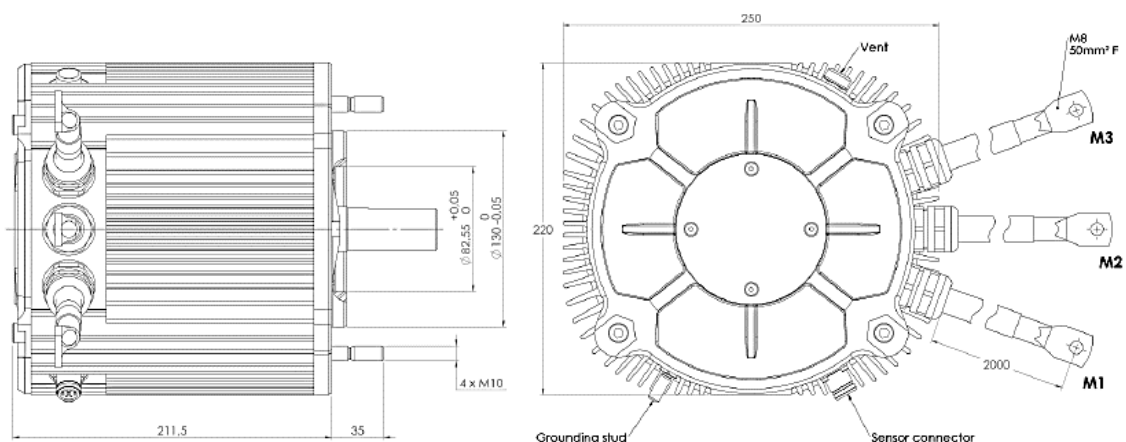
Este motor tiene una serie de características eléctricas y mecánicas que se presentan en la ilustración 44. Estos serán los datos de partida para analizar el motor y su posterior modelado. Su correspondiente hoja de características completa está en los anexos.

En la primera tabla se nos presenta una serie de datos para el caso de potencia nominal de 13 kW. También un par de 22 Nm y una intensidad rms de 156 A. Todos estos datos se refieren a ese punto de potencia nominal.

Nominal Operation (S1, cooling as specified below)			
Torque	T_{nom}	22	Nm
Power	P_{nom}	13	kW
Speed	n_{nom}	5720	rpm
Phase rms-current	I_{nom}	156	A
Battery voltage (DC)	U_{nom}	96	V
Electric frequency	$f_{e(nom)}$	381	Hz
Power factor	$\cos(\varphi)$	0.75	
Maximal Values (S2, 10s, cooling as specified below)			
Torque	T_{max}	95	Nm
Power	P_{max}	42	kW
Phase rms-current	I_{max}	781	A
Battery voltage (DC)	U_{max}	200	V
Speed	n_{max}	8000	rpm
Electric frequency	$f_{el, max}$	533	Hz

Ilustración 44 - Valores nominales y máximos del motor Engiro de la edición 19/20 de MotoStudent.

Sin embargo, la segunda tabla nos muestra todos los valores máximos a los que llega el motor, sin tener que suceder a la vez, es decir, la potencia máxima no se da a las 8000 rpm, sino que en realidad se da a las 5000 rpm, pero nos cuenta que puede llegar a las 8000 rpm. Todos estos datos son importantes para saber lo máximo que se puede obtener de este motor y que valores no sobrepasar.



Electrical Data				
Number of phases	3			
Number of pole pairs	4			
Maximal efficiency	>96 %			
T/I constant ($I < I_{nom}$)	0.14 Nm/A _{rms}			
U/n constant (AC)	rms:	9.1	peak:	12.9 V/(1000rpm)
K_e constant (AC)	rms:	0.022	peak:	0.031 V/(rad*s ⁻¹)
Additional Data				
Weight (w/o cables)	20 kg			
Rotor moment of inertia	0.009 kg*m ²			
Protection category	IP65			
Maximal motor temperature	120 °C			
Allowed ambient temperature	-20 ... 45 ¹⁾ °C			
Cooling (medium, flow rate, inlet temperature, pressure)	air, 18 m/s, ≤ 45°C			
Temperature monitoring	1 x KTY84-130			
Type approval	CE, EN 60034			
Customs tariff number	8501 5230			

Ilustración 45 - Datos eléctricos y adicionales del motor Engiro.

Esta otra parte se comentan varios datos muy importantes. El primero, que tiene un rendimiento mayor al 96%. Obviamente esto no será para todo el rango de velocidades ni potencias, pero indica que tiene un funcionamiento mejor que el motor anterior de la edición 17/18, donde se llegaba al 92% de rendimiento máximo. Otro dato es la temperatura máxima, la cual no debemos de sobrepasar para no deteriorar el motor, ésta será de 120°C. La masa de este motor es de 20 kg.

Eso respecto a parámetros conocidos, dan otros dos datos que nos servirán para modelar el motor, estas son las constantes T/I y U/n .

- T/I es la relación constante existente entre el par que proporciona el eje del rotor con la intensidad que está circulando, mostrando que es igual a 0,14.
- U/n es la relación constante existente entre la tensión en el motor por cada 1000 rpm. Para los cálculos se usará la tensión rms de 9,1.

Con estos dos parámetros, podríamos conocer tanto la intensidad como la tensión en el motor, sabiendo el par y la velocidad a la que está trabajando. Con estos datos también podríamos calcular la potencia que da el motor con la siguiente ecuación:

$$P = V * I = \left(12'9 * \frac{rpm}{1000}\right) * \left(\frac{T}{0,14}\right) = T * \omega$$

Siendo:

- P potencia
- V voltaje
- I intensidad que circula por el motor
- Rpm revoluciones por minuto del motor
- T par en Nm
- ω velocidad de giro en rad/s

Todas ellas son maneras de calcular la potencia que proporciona el motor.

Los propios fabricantes de ENGIRO proporcionan una serie de gráficas de simulaciones realizadas por ellos mismos, que muestran cómo varían los rendimientos según el par y la velocidad de giro del motor. Además de otra gráfica de diferentes curvas como potencia entregada, intensidad, par y eficiencia según la velocidad para dos casos distintos: potencia nominal y potencia máxima.

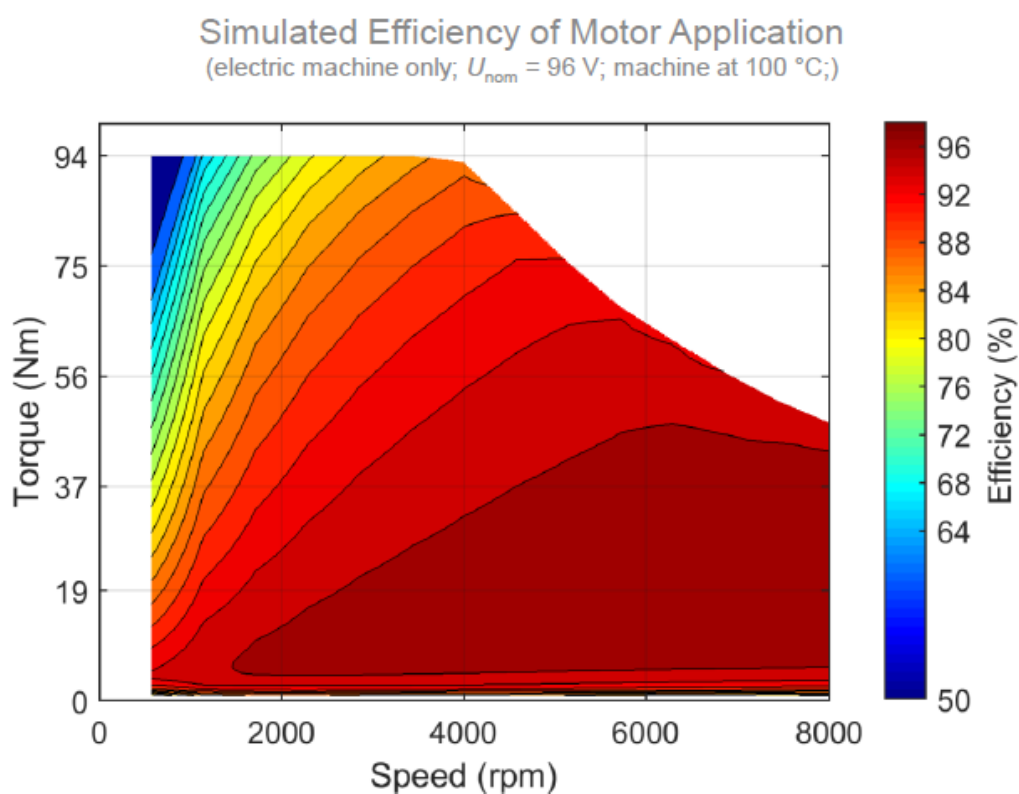


Ilustración 46 - Mapa de isorendimientos en función del par y la velocidad.

Se comenzará con la gráfica de rendimiento o eficiencia según el par y velocidad. Como se puede observar, a un par bajo y altas velocidades se consigue un altísimo rendimiento, llegando al 96 % anteriormente citado en la hoja de características. También se observa que un alto par y bajas velocidades tiene un rendimiento muy bajo, por lo que será una zona en la que se evitará trabajar.

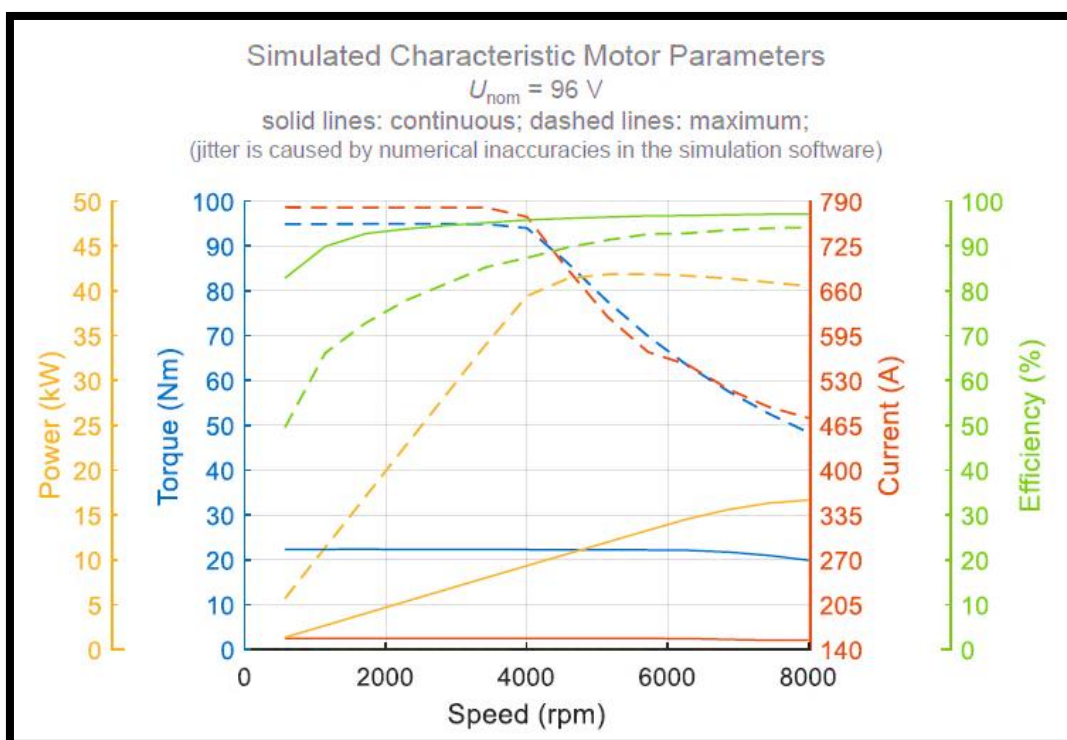


Ilustración 47 - Diferentes curvas dada por el fabricante Engiro. En trazo continuo los valores a potencia nominal y en trazo discontinuo a potencia máxima. Representan las corrientes que circulan por el motor (líneas rojas), la potencia mecánica (líneas amarillas), el par (líneas azules) y el rendimiento (líneas verdes).

Se pasará ahora a analizar la Ilustración 47, dónde muestran los ensayos a potencia nominal y máxima. La nominal es la línea de trazo continuo y la máxima la de trazo discontinuo. Si se observa la de potencia nominal, la potencia mencionada de 13 kW se llega a alcanzar a las 5700 rpm tal y como se mencionó. La intensidad es constante en toda la simulación hasta llegar próximos a las 8000 rpm dónde comienza a disminuir. La eficiencia varía desde el 83% hasta el 96% que nos mencionaban.

Por otro lado, está la de potencia máxima. En esta se llega a los 42 kW sobre las 5000 rpm, con una eficiencia del 90%. Este rendimiento va variando conforme se incrementan las revoluciones, como mostraba el mapa de isorendimientos presentado en la gráfica anterior. Respecto a la intensidad, es constante a 781 A hasta que llega al valor de las 4000 rpm, a partir del ahí comienza a disminuir hasta llegar a los 465 A. Esta reducción también se observa en el par, bajando en casi la misma proporción que la intensidad. Recordar que antes se menciona que la proporción entre la intensidad y el par es constante a 0'14, aunque si se realiza la operación de dividir el par entre la intensidad en esta curva, se obtiene una constante de 95 (Nm)/781 (A)= 0,12 (Nm/A), por lo que podemos pensar que varía en cuanto al par dicha constante.

3.6.2 Mapa motor usado

El mapa motor es la curva que relaciona la velocidad con el par. Ésta es configurada de manera directa en el controlador para que produzca un determinado par a la velocidad que corresponda, y, por ende, una determinada potencia mecánica buscada en el eje del rotor. Se caracterizará por tener tres zonas diferentes según las revoluciones: zona de par constante, zona de curva isopotencia y zona de corte.

- Zona de par constante: esta zona se caracteriza por tener un par constante a cualquier velocidad dentro de dicha zona. Esa “zona”, refiriéndonos a un margen de revoluciones, será desde 0 rpm hasta las revoluciones que tengamos la potencia buscada. Por tanto, será necesario calcular ese número de revoluciones máxima a la que llegar con par constante. Esto se hará como:

$$P = T * \omega = T * \frac{rpm * 2 * \pi}{60} = T * \frac{rpm}{9,55}$$

$$rpm_{max} = \frac{P * 9,55}{T}$$

Con esta sencilla expresión limitamos la zona en la que tendremos el par constante asignado. Poniendo el ejemplo de una potencia de 20 kW y un par de 95 Nm:

$$rpm_{max} = \frac{P * 9,55}{T} = \frac{20000 * 9,55}{95} = 2010 \text{ rpm}$$

- Curva isopotencia: se trata de la curva en la cual se obtiene potencia constante del motor, dando igual las revoluciones a la que gire el motor. La ecuación que rige esta zona de revoluciones es:

$$P = T * \omega = T * \frac{rpm}{9,55}$$

Para unas revoluciones dadas, podremos obtener su par:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P * 9,55}{rpm}$$

- Zona de corte: a partir de las 6000 rpm se irá recortando en potencia hasta llegar a dar un par igual a 0 a 8000 rpm con el objetivo de no sobrepasar dichas revoluciones máximas que nos indica el Datasheet.

$$P = P_{constante} * \left(1 - \frac{(rpm - 6000)}{2000}\right)$$

Un ejemplo de mapa motor se muestra en la figura 48, con una potencia mecánica de 20 kW y un par máximo de 90 Nm, realizándose los cálculos con las ecuaciones anteriores para determinar las potencias y pares que proporciona el motor según las revoluciones.

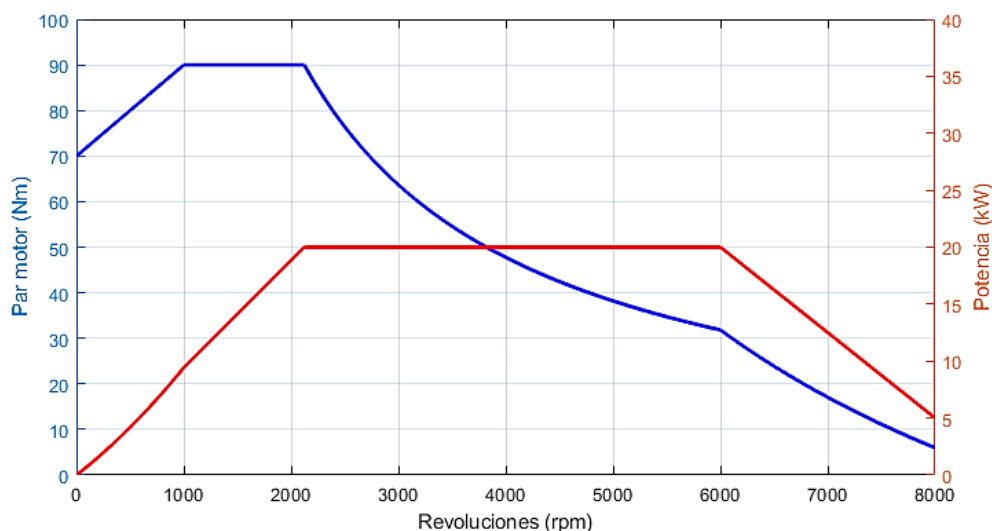


Ilustración 48 - Curva de Par - Revoluciones y Potencia - Revoluciones

3.6.3 Mapas isorendimientos

Los mapas de isorendimientos son gráficas que nos muestran diferentes curvas en las cuales el rendimiento es constante. Para este caso, se muestra una gráfica par -velocidad dónde el fabricante muestra diferentes zonas, pintadas de diferentes colores, donde se muestran estos rendimientos (Ver ilustración 46). El objetivo es llegar a obtener el mismo mapa de isorendimientos para poder así llegar a obtener las pérdidas del motor y con esto modelizar el calor generado.

Para conseguir nuestro objetivo, se modelizarán varias pérdidas asociadas a los motores eléctricos y, posteriormente, conociendo los dos ensayos que se dan, asociar valores a dichas pérdidas. Las pérdidas que trataremos de estimar, son las que nos menciona en Máquinas Eléctricas (Fraile Mora, 2003):

- Pérdidas óhmicas:

Las pérdidas óhmicas o las pérdidas $I^2 * R$ se deben a la corriente que fluye a través de los conductores del motor. Estas pérdidas son iguales al cuadrado de la corriente, multiplicado por la resistencia del camino a través del cual fluye la corriente.

- **Perdidas de hierro:**

También llamadas pérdidas de núcleo, estas son pérdidas asociadas en las rutas magnéticas del motor. Por lo general, se caracterizan por la pérdida de vatios por masa. Los diferentes aceros tienen diferentes características que afectan estas pérdidas. Para comprender mejor las pérdidas de hierro, podemos dividirlos en pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas.

- Las pérdidas de histéresis se deben a la cambiante polaridad del flujo en el núcleo de acero. Las pérdidas de histéresis se efectúan tanto por la capacidad del material para cambiar la polaridad fácilmente como por la densidad de flujo total en el acero.
- Las pérdidas por corrientes de Foucault son corrientes circulantes inducidas en el núcleo de acero por la polaridad cambiante del flujo. Las pérdidas de corriente de Foucault se ven afectadas por la densidad de flujo total, la frecuencia a la que cambia la polaridad del flujo y el área disponible para que fluyan las corrientes parásitas. Los diseños de motores utilizan núcleos de acero laminado para reducir el área disponible para que las corrientes de Foucault fluyan porque los electrones no pueden saltar.

- **Perdidas de fricción:**

Estas pérdidas se atribuyen a la fuerza que se necesita para superar el arrastre asociado con la rotación del rotor del motor. Como ejemplo de pérdidas de fricción son la fricción de los cojinetes. En general, las pérdidas por fricción son proporcionales a la velocidad del rotor.

- **Perdidas por inercia:**

En un motor enfriado por aire, estas pérdidas son causadas por la turbulencia en el aire que actúa contra la rotación del rotor. Ejemplos de estos son ranuras de armadura o geometrías que no son cilíndricas o ventiladores. Las pérdidas por inercia se estiman como proporcionales al cubo de la velocidad del rotor.

Por tanto, la ecuación que modelizará el rendimiento del motor será:

$$\eta = \frac{P_{mecánica}}{P_{mecánica} + T * \omega + C_i * \omega^3 + R * I^2 + X_s * I^2 + C_H * f + C_F * f^2}$$

Siendo:

- $P_{mecánica}$ potencia mecánica en el eje (W)
- T par resistivo (Nm)
- ω velocidad de rotación del motor (rad/s)
- C_i constante de las pérdidas de inercia ($kg * m^2$)
- R resistencia del motor (Ω)
- X_s resistividad de la bobina (Ω)
- I intensidad circulante por el motor (A)
- C_H constante de pérdidas por histéresis
- C_F constante de pérdidas por Foucault
- f frecuencia eléctrica

Siendo variables conocidas el rendimiento, potencia mecánica, intensidad, frecuencia eléctrica y la velocidad de giro en diferentes puntos de trabajo se pueden obtener los valores de las diferentes constantes. Los resultados se muestran a continuación.

Constantes	Valores
T	0,022
C_i	$3 \cdot 10^{-9}$
R	0,0058
C_H	0,04
C_F	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Inductancia(μH)	15

Tabla 8 - Coeficientes de diferentes pérdidas

Introduciendo estos coeficientes en la ecuación anterior de rendimiento y mostrándolo en una gráfica de par – velocidad, obtenemos el siguiente mapa de isorendimientos.

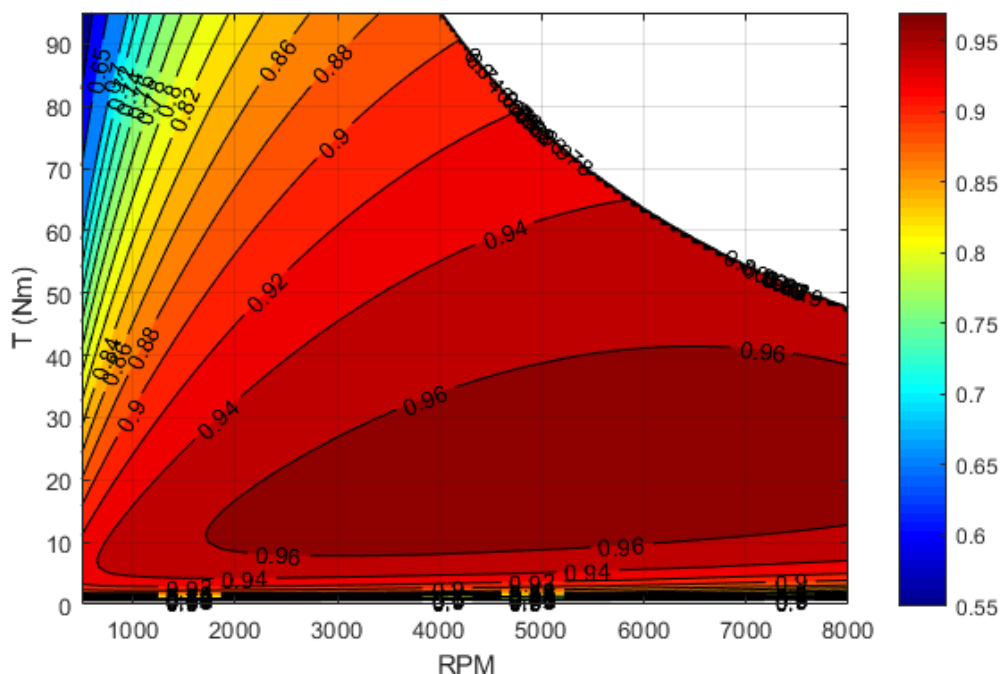


Ilustración 49 - Mapa isorendimientos teóricos obtenidos

Los resultados mostrados son muy similares a los que nos da el fabricante, teniendo una zona de alto rendimiento a bajo par y alta velocidad, y una zona de muy bajo rendimiento a alto par y baja velocidad.

3.6.4 Calor generado

Una vez conocido el rendimiento del motor en función de su par y su velocidad, como se mostró en el apartado anterior, podremos pasar al cálculo del calor generado. Este será estimado como la suma de todas las pérdidas que se producen en el motor y que se transformarán más tarde en calor. Por tanto, trabajar en una zona de rendimiento alto conllevará menores pérdidas y menor calentamiento del motor.

El procedimiento de cálculo será bien sencillo, consistirá en estimar el rendimiento en el punto de trabajo en el momento concreto, que se estimará con la ecuación del rendimiento en función de sus pérdidas. Tras esto, siendo conocido la potencia mecánica en el eje, se realizará la operación:

$$Q_{generado} = \frac{P_{mecánica}}{\eta} - P_{mecánica} = P_{mecánica} * \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)$$

Siendo este valor conocido se pasará a continuación a calcular el calor refrigerado para hallar, cuanto de este calor es evacuado y cual es almacenado.

3.6.5 Calor refrigerado

En este apartado se analizará el calor evacuado del motor por convección. Este se produce por la masa de aire que circula alrededor. De esta manera se pretende conseguir que su calentamiento no sea superior a su temperatura límite para no deteriorarlo durante su uso en la competición.

Respecto al tipo de estudio que se presenta aquí, será un resumen con los apartados más importantes del Trabajo de Fin de Grado propio titulado: ***DISEÑO MECÁNICO DE MOTOCICLETA ELÉCTRICA DE CARRERAS. ESTUDIO DE REFRIGERACIÓN DE MOTOR.***

Lo primero, se plantearán una serie de simplificaciones para poder abordar el problema, que se basan en:

- Se despreciarán los efectos de radiación y conducción, ya que en la evacuación de calor de estos casos puede tratarse como despreciable.
- Se simplificará como que el motor se calienta de manera uniforme a un ritmo constante. Con esto se quiere decir que toda la zona que se exponga al fluido estará a la misma temperatura y no habrá calentamientos localizados.

En el estudio del mismo, se realizaron dos subestudios: uno basado en una geometría de tubo circular y otro estudiando la geometría completa del motor con ANSYS. El objetivo era poder relacionar las ecuaciones estudiadas de Zhukauskas un cilindro con el de la geometría del motor. Dicho fragmento viene recogido en los anexos.

A partir del estudio anterior se observa que hay una gran diferencia entre la geometría de un cilindro y la geometría real con aletas. Como primera aproximación, se intentó obtener un coeficiente que relacionase ambos casos con el coeficiente f . El problema que plantea esa aproximación es que, a diferencias de temperatura bajas, la geometría real debe de evacuar más calor, debido a tener un área mayor, y eso no se da con esa fórmula. Por otro lado, el

método de cálculo se vuelve más complejo ya que además de calcular todos los parámetros de Reynolds, conductividad y demás parámetros hay que plantear el coeficiente f de corrección. Para suplir todos estos problemas se plantea obtener un valor h de convección utilizando exclusivamente el programa Ansys y tratar sus resultados.

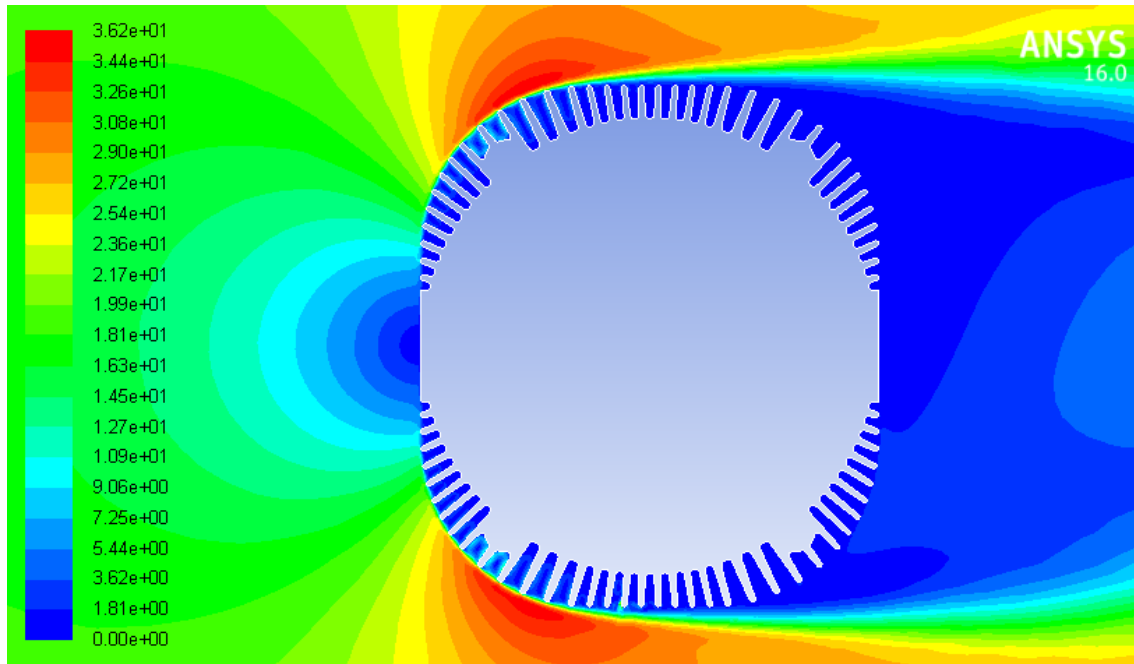


Ilustración 50 - Vista de la estela generada por el motor. Velocidades del aire circulante.

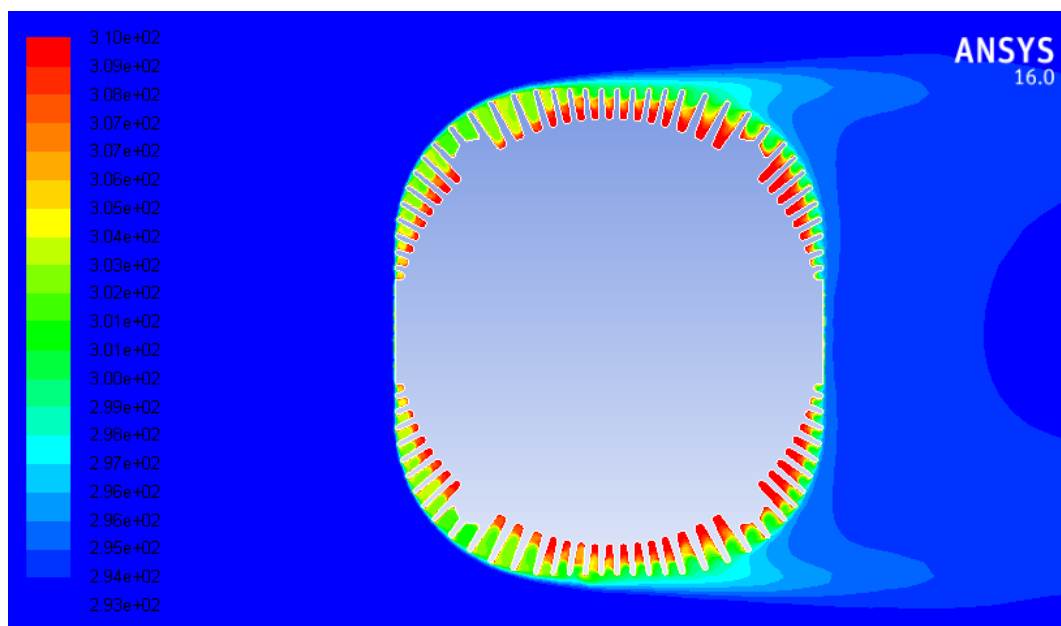


Ilustración 51 - Temperatura del aire alrededor del motor a velocidad de 10 m/s

Para ello se consiguió obtener un resultado de h media del motor de la simulación en 2D. Obviamente, este resultado no es constante y fijo debido a las turbulencias que genera el motor, pero la variación es bastante poca sabiendo cómo se puede ver en la imagen. Por tanto, el método será obtener diferentes ensayos a diferentes temperaturas y velocidades e intentar estimar un coeficiente de convección h en función de únicamente estos dos parámetros.

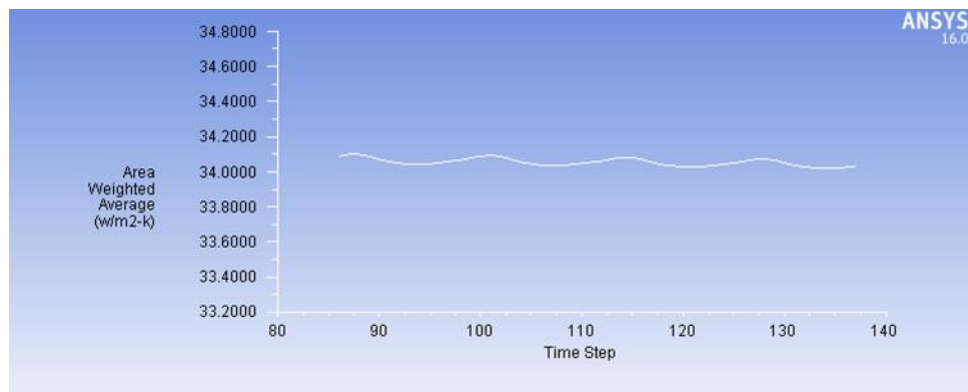


Ilustración 52 - Coeficiente de convección medio por paso de tiempo obtenido en ANSYS

Los resultados obtenidos para los diferentes ensayos son los siguientes:

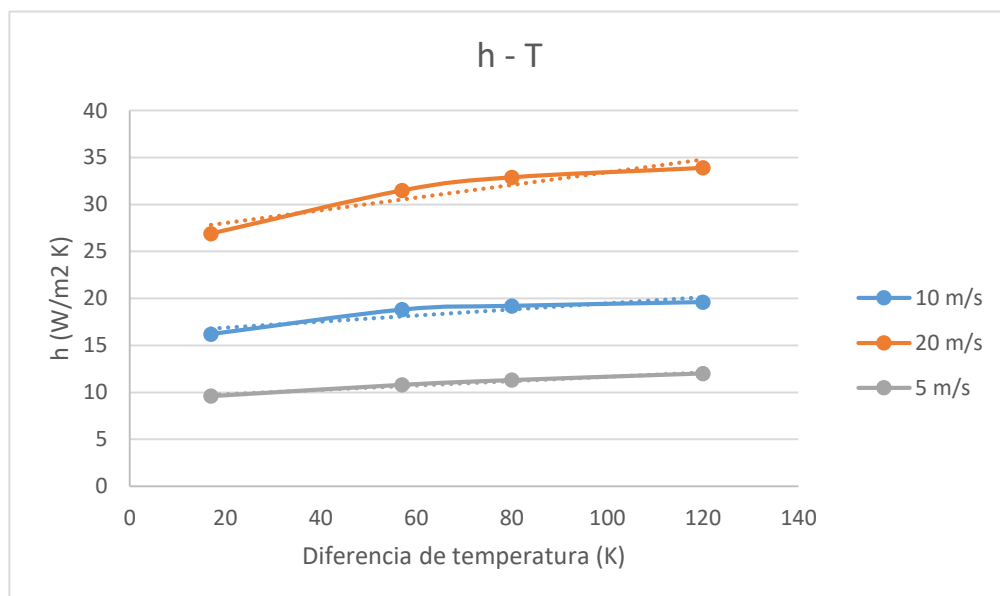


Ilustración 53 - Coeficiente de convección h obtenido para diferentes temperaturas y velocidades del aire

Se observa que incrementa el valor en función del incremento de temperatura y de la velocidad del aire que fluye alrededor del motor. Para obtener datos intermedios de

temperatura y velocidad, se linearizará esos coeficientes de las rectas en dos: en función de la temperatura y en función de la velocidad.

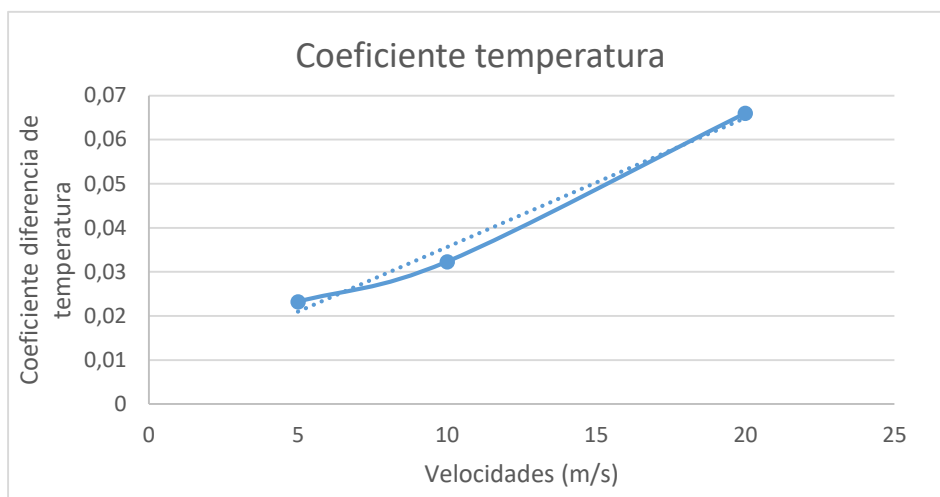


Ilustración 54 - Variación del coeficiente h en función solo de la temperatura

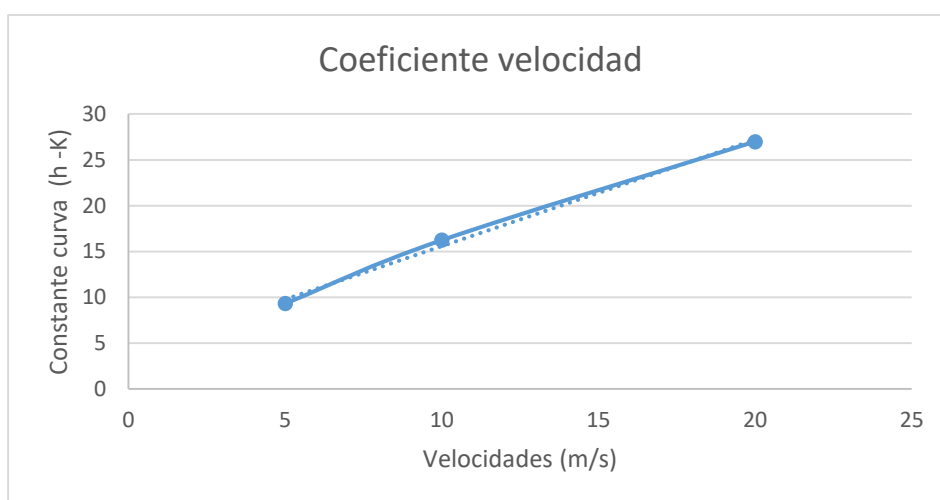


Ilustración 55 - Variación del coeficiente h solo en función de la velocidad del aire

Con estos datos obtenemos finalmente la expresión buscada, sumando ambas ecuaciones. El resultado final para obtener el coeficiente de convección h es:

$$h_{ANSYS} = ((0,0029 * V + 0,0063) * \Delta T) + (1,1618 * V + 3,9635)$$

Con el valor de h ya solo quedaría sustituir en la ecuación de calor refrigerado:

$$Q_{r,aletas} = h_{ANSYS} \cdot A_{aletas} \cdot (T_{motor} - T_{aire})$$

Respecto a la refrigeración de las zonas laterales del motor, que se estudiarán como una placa plana, es necesario obtener el comportamiento del Prandtl y la conductividad (k) en función de la temperatura.

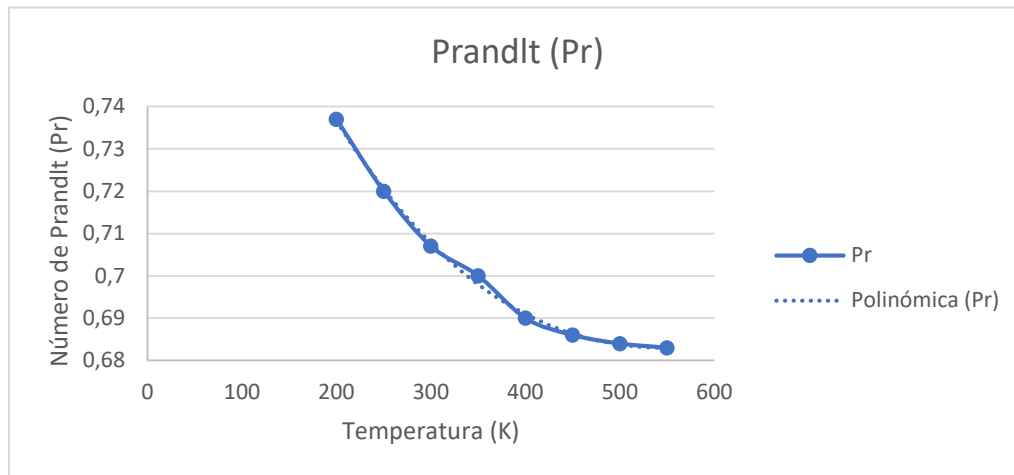


Ilustración 56 - Gráfica de la variación de Pr con la temperatura a presión atmosférica

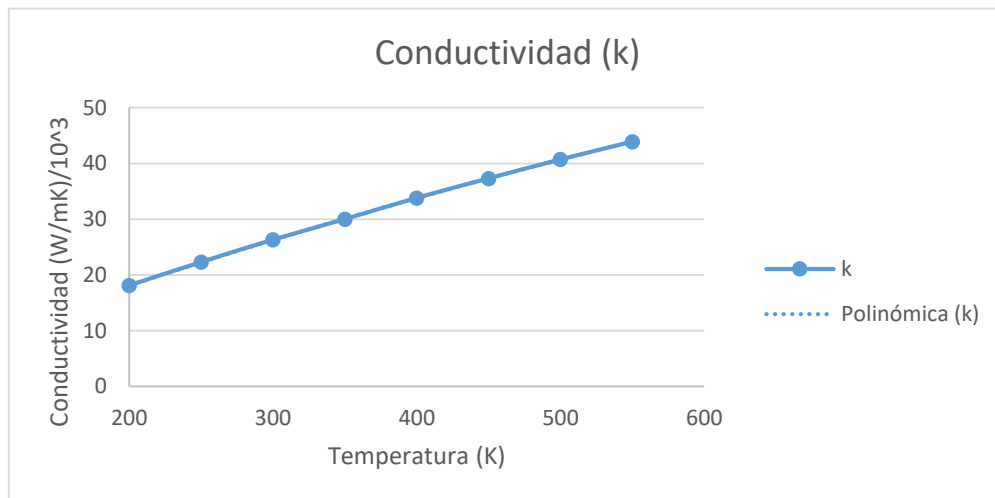


Ilustración 57 - Conductividad térmica (k) respecto a la temperatura a presión atmosférica

Y ahora se calculará el calor refrigerado en las zonas laterales consideradas como planas:

1. Calcular la temperatura de película, siendo esta la media entre la temperatura del aire de entrada (valor de la tabla) y temperatura del motor en esa iteración, que en la primera será el valor de la tabla.
2. Calcular Pr con la ecuación linealizada, explicadas previamente.

3. Según el Re se sabrá si está en régimen laminar, turbulenta o mixta, y en función de esto, escogerá su correspondiente ecuación.
4. Calcula el Nusselt (Nu) con la ecuación de placa plana según valor de Re.
5. Calcula el coeficiente de conductividad térmica (k) según la ecuación anterior con la temperatura de película.

Calcula el coeficiente de convección, h, con la ecuación:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{D}$$

6. Calor refrigerado como $Q_{r\ plana} = h_{plana} \cdot A \cdot (T_{motor} - T_{aire})$

Las diferencias entre el motor de la edición 17/18 y el actual 19/20, solo es en el ancho de este, por lo que se puede utilizar todo lo mostrado anteriormente. Las nuevas áreas serán:

$$Area_{aletas} = 0'5372\ m^2$$

$$Area_{cara\ plana} = 0'1351\ m^2$$

3.6.6 Calor almacenado e incremento de temperatura

En este apartado se desarrollará el proceso de cálculo del calor almacenado en el motor y, por consiguiente, su aumento de temperatura. Para simplificar los cálculos, se tomará como que todo el motor se calienta a un ritmo uniforme y que el aire pasa por igual por todas sus zonas, haciendo que la refrigeración sea homogénea. Se partirá de todos los datos mencionados previamente:

- 1) Cálculo del calor generado en función de su rendimiento
- 2) Cálculo de su refrigeración en función de la velocidad del paso del aire, la temperatura del motor y temperatura del aire
- 3) Siendo conocida una estimación de la masa de los materiales de los que está compuesto el motor, se podrá conocer su calentamiento a través de su calor específico. Son datos estimados debido a que el fabricante no lo proporciona y no es posible abrir el motor para realizar un estudio de su interior.

Se partirá igual que en los dos casos anteriores, se calcula el calor almacenado como la diferencia entre el calor generado menos el refrigerado:

$$Q_{almacenada} = Q_{generado} - Q_{refrigerado}$$

Habiendo sido calculado el calor generado como:

$$Q_{generado} = P_{mecánica} * \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)$$

Y el calor refrigerado como:

$$Q_{refrigerado} = 2 \cdot Q_{parte plana} + Q_{aletas}$$

$$Q_{parte plana} = h * A_{cara plana} * (T_{motor} - T_{aire})$$

$$Q_{parte plana} = h_{ANSYS} * A_{aletas} * (T_{motor} - T_{aire})$$

Y para hallar el calor almacenado será necesario conocer las masas y calores específicos de los materiales del motor:

Material	Masa (kg)	Calor específico (kJ/kg K)
<i>Cobre</i>	6	385
<i>Aluminio</i>	8	890
<i>Hierro</i>	6	440

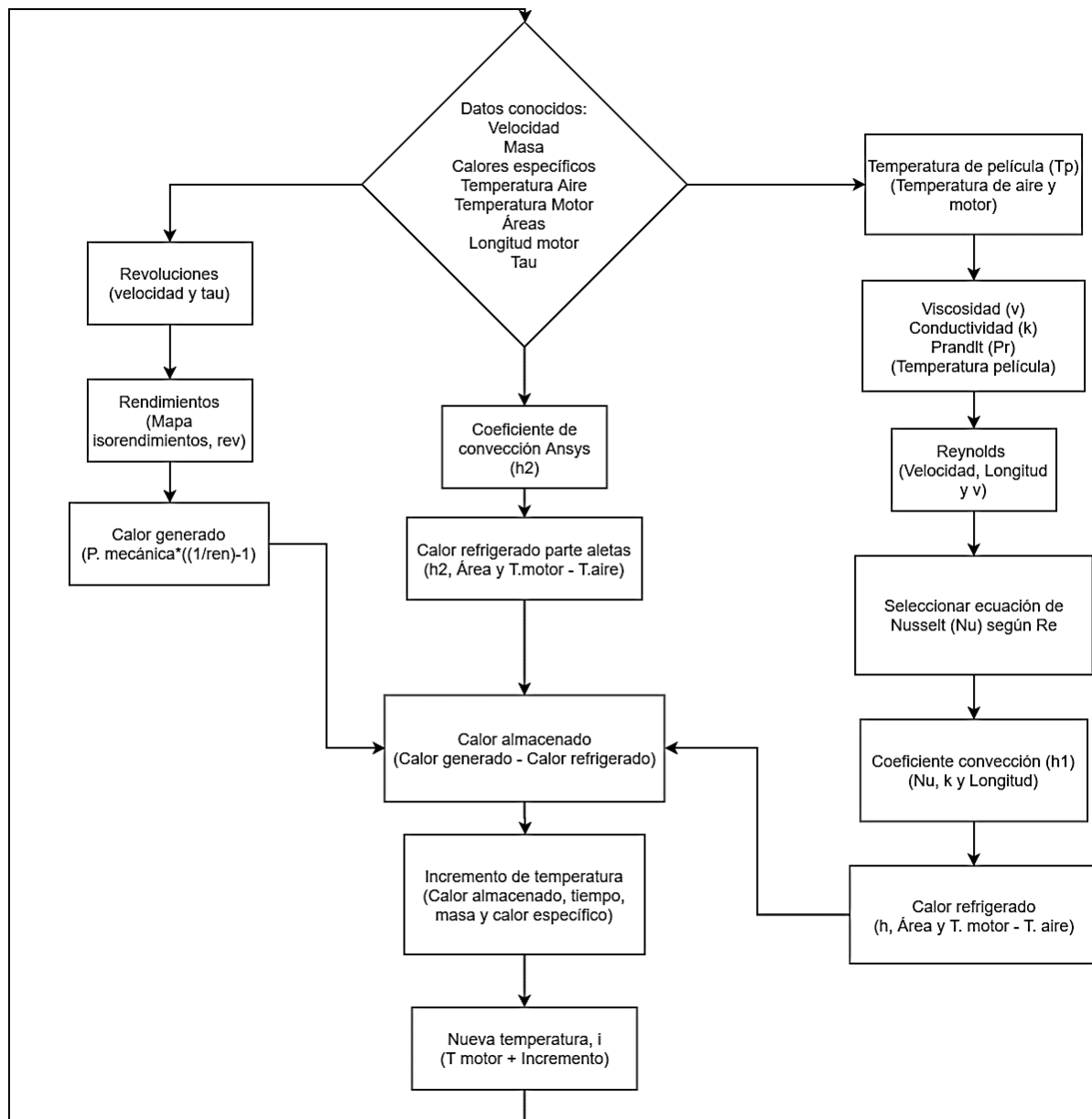
Tabla 9 - Masas y calores específicos consideradas del motor Engiro 19/20

Para sustituirlos en la siguiente ecuación y obtener su temperatura tras pasado un periodo de tiempo.

$$T_{motor} = \frac{Q_{almacenada} * t}{m_{Cu} * c_{p,Cu} + m_{Fe} * c_{p,Fe} + m_{Al} * c_{p,Al}} + T_{motor-1}$$

3.6.7 Esquema resumen del cálculo del incremento de temperatura en el motor

Se presentará, como se realizó en el apartado anterior, otro esquema resumen de todos los pasos seguidos para el cálculo del incremento de temperatura en el motor. Para ello, se parte de una serie de datos iniciales o de la iteración anterior y se siguen diferentes ramas según el dato buscado. Entre paréntesis se presentan qué datos son necesarios para calcular cada paso.



3.7 Otras pérdidas (contactor y conductores)

Además de las pérdidas en el tren motriz, como son el motor, inversor y las propias baterías, se estimará la pérdida de potencia en el contactor de la motocicleta y las conexiones en el contenedor de baterías.

El contactor utilizado es el "KILOVAC EV200 Series Contactor With 1 Form X. Según su Datasheet, su resistencia típica es de 0'2 mΩ. Por lo que se podrá estimar sus pérdidas como:

$$P_{\text{contactor}} = 0'2(\text{m}\Omega) \cdot I^2(\text{A})$$

Por otra parte, la pérdida de potencia en los conductores que transportan la energía eléctrica será proporcional a la resistencia del material y de la longitud del cable, e inversamente proporcional a la sección.

$$R_{\text{conductor}} = \rho \frac{l}{s} = 0'0171 \left(\Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \right) \cdot \frac{2(\text{m})}{35 (\text{mm}^2)} \cdot 10^3 \left(\frac{\text{m}\Omega}{\Omega} \right) = 0'977 \text{ m}\Omega$$

$$P_{\text{conductor}} = 0'977(\text{m}\Omega) \cdot I^2(\text{A})$$

3.8 Cálculo de intensidad demandada

Una vez conocido cómo funcionan todos los sistemas integrados en el prototipo, siendo estos: motor, controlador y baterías, podemos hallar cuanta es la demanda de intensidad que se requiere. Este se basará en un equilibrio de potencias eléctricas demandadas con la potencia eléctrica suministrada. También se puede hacer un símil con un circuito eléctrico monofásico para ilustrar el cálculo realizado.

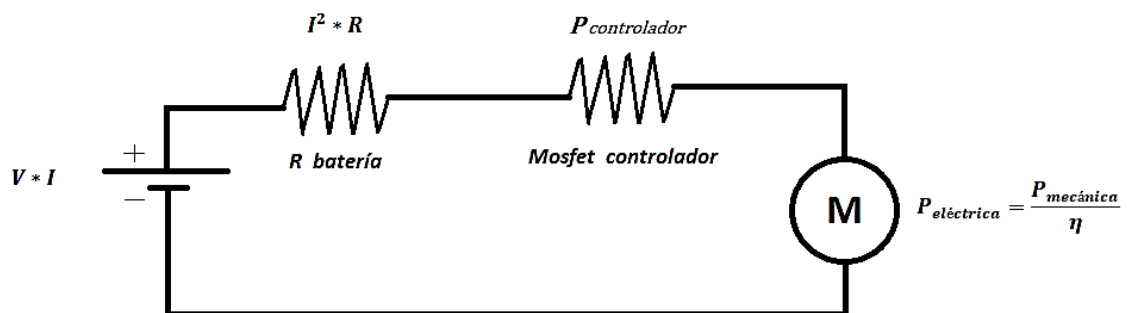


Ilustración 58 - Simplificación a esquema monofásico para el estudio de la demanda de intensidad de baterías

La potencia suministrada por baterías será representada como:

$$P_{suministrada} = V * I$$

El resto serán las potencias demandadas, siendo:

- La de baterías:

$$P_{baterías} = I^2 \cdot (R_{batería} + R_{contactor} + R_{conductor}) = I^2 \cdot R$$

- La pérdida en los transistores de potencia del controlador con:

$$P_{controlador} = P_{transistor} + P_{diodo} + P_{conmutación}$$

- La potencia eléctrica en el motor como:

$$P_{eléctrica} = \frac{P_{mecánica}}{\eta}$$

Obtenemos haciendo la sumatoria de potencias:

$$V * I = I^2 * R + P_{controlador} + \frac{P_{mecánica}}{\eta}$$

$$0 = I^2 R - V * I + P_{controlador} + \frac{P_{mecánica}}{\eta}$$

Y conociendo la resolución de una ecuación de segundo grado como:

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

Y tomando siempre la solución del menos (-):

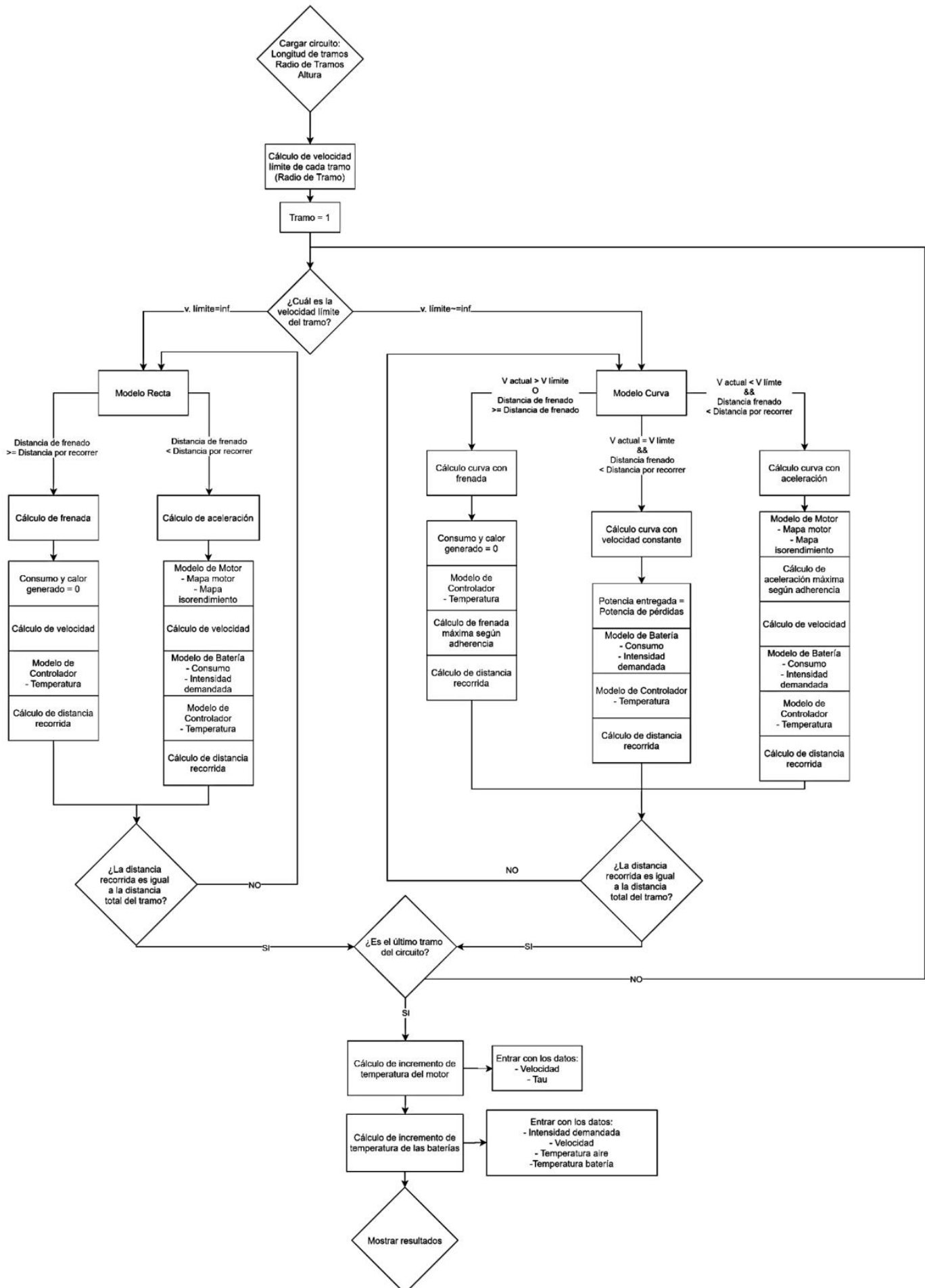
$$I_{demandada} = \frac{V - \sqrt{V^2 - 4 \cdot R \cdot \left(P_{controlador} + \frac{P_{mecánica}}{\eta} \right)}}{2 \cdot R}$$

Con esta intensidad, podremos conocer la intensidad que se suministra desde las baterías para cubrir la demanda en función de la potencia mecánica que desarrolla el motor, el

rendimiento del motor a ese régimen de giro, las pérdidas en los mosfets en función de la temperatura, de la resistencia interna de baterías y de la tensión a la que están dichas baterías.

3.9 Esquema de interacción entre los diferentes modelos

Una vez explicados cómo se ha realizado cada uno de los modelos y las propiedades físicas que intervienen en cada uno de ellos, se pasará a explicar brevemente cómo interactúan los diferentes modelos entre sí. Con todo esto se espera esclarecer cómo funciona el programa que se ha realizado, cómo el hecho de estudiar una recta, una curva, una frenada o una aceleración, es totalmente diferente de un solo vistazo. Se puede explicar en estos diferentes pasos: En él se parte de los vectores de longitud, radio de curvatura y altura tal y como se explicó en el modelo de circuito. Después calcula la velocidad límite de cada uno de los tramos con la ecuación de la fuerza centrífuga. Después, va recorriendo los diferentes tramos según se consideren rectas o curvas por la velocidad límite a la que se puede pasar por dicha curva. En cada uno de ellos realizará un cálculo específico según las condiciones, de estar acelerando, frenando o manteniendo velocidad. Por último, realiza los cálculos térmicos del motor y baterías. Tras esto, muestra los resultados.



Capítulo IV: VALIDACIÓN DEL MODELO TEÓRICO



4 Validación del modelo teórico

4.1 Introducción

En este apartado se desarrollarán la validación del funcionamiento de los distintos modelos planteados. Para ello, se desarrollarán una serie de ensayos en laboratorio y circuito para ver las similitudes y posibles desviaciones entre el planteamiento teórico y los datos obtenidos.

Se dividirán en varios apartados que serán: validación de modelo de baterías, validación de modelo de controlador, validación de modelo de motor y validación de comportamiento en circuito.

4.2 Validación de modelo de baterías

A la fecha actual de entrega de este trabajo no se ha llegado a concluir el montaje del contenedor de baterías ni realizado pruebas de descarga, por lo que este apartado no será presentado en este documento. A pesar de ello, se realizará más adelante.

4.3 Validación de modelo de controlador

En este apartado se comparará el comportamiento del controlador, o inversor, del equipo EPS-UJATEAM. Para conseguir dicho objetivo, se partirán de los datos obtenidos en los laboratorios del banco de motores donde se realizan los ensayos. Se tratarán estos datos y se realizará una simulación con dichos datos para ver la correlación entre el modelo teórico y los datos experimentales.

Durante los ensayos se obtienen muchísimos datos quedando registrados en un Excel. En él aparecen en cada intervalo de tiempo las velocidades de giro del motor, la intensidad de batería, intensidad del motor, temperatura del controlador y motor... los cuales hay que tratar para obtener conclusiones. En el caso del controlador se partirá de tres datos fundamentales de toda la lista de datos: Intensidad de salida al motor, tiempo y temperatura en cada intervalo

de tiempo. Con ellos podremos ver cómo se calienta el controlador con el paso del tiempo. Por otro lado, tendremos la intensidad y el tiempo que circula por el controlador, por lo que se pueden calcular el calor generado y su incremento de temperatura, tal y como se explicó en el apartado 3.3) *Modelo de controlador*.

Se tomarán las siguientes consideraciones:

- En cuanto a la refrigeración, se consideró una resistencia térmica de 0,5 K/W, valor para el caso de no tener disipador térmico y sin flujo de aire forzado.
- La intensidad dada en esos datos se considerará intensidad RMS, por lo que no habrá que dividir entre $\sqrt{3}$ y solo incluirla en la ecuación de calor generado.
- El valor del tiempo será variable, ya que las medidas realizadas por Sevcon no son cada un cierto valor fijo de tiempo. A pesar de eso, se tomará como constante todas las medidas durante el intervalo medido y el paso de tiempo será la resta entre dos intervalos consecutivos.

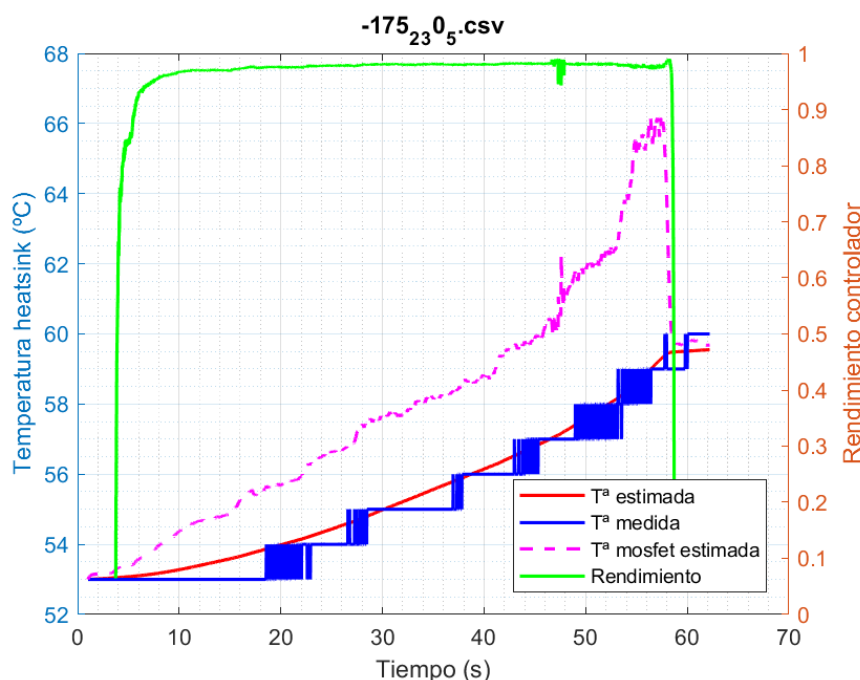


Ilustración 59 - Variación de temperatura del controlador respecto del tiempo en el inversor

La temperatura medida por el controlador (azul) varía de grado en grado, por lo que no tenemos datos intermedios, de ahí los saltos que se observan. Además, hasta que no incrementa la temperatura un grado fluctúa entre ambas temperaturas.

En cuanto a la línea roja, es la curva estimada de calentamiento con las ecuaciones expuestas en el apartado 3.3. Se puede observar la buena relación entre el ensayo y los datos. La mayor variabilidad se forma en torno a los 35°C ya que se produce un calentamiento más rápido de lo estimado y que el resto de intervalos. A pesar de esto, se puede confirmar el buen funcionamiento de este modelo y considerarlo válido.

En los anexos se incluirán un conjunto de otros ensayos realizados y validados con el mismo proceso, donde se muestran resultados similares al ejemplo.

4.4 Validación del motor

Con el objetivo de comprobar que las estimaciones realizadas sean ciertas, se comprobará que las pérdidas teóricas en el motor se corresponden con las pérdidas reales. Estas pérdidas, como ya se mencionó, no solo generan pérdidas de energía, sino también un aumento de la temperatura. Por tanto, se estudiará el rendimiento que proporciona el motor en una serie de ensayos y compararlo con el rendimiento teórico usando las ecuaciones del apartado 3.6.3) *Mapa isorendimiento*.

En los ensayos, el controlador da una serie de datos medidos por él, ya sea de manera directa o indirecta. Entre ellos nos dan: voltaje de entrada, intensidad de entrada, intensidad de salida, par motor y velocidad de giro del motor. Trabajando con esos valores se puede calcular la potencia de entrada y la de salida.

$$P_{entrada} = V_{in} \cdot I_{in}$$

$$P_{salida} = T \cdot \omega = T \cdot \frac{rpm}{9'55}$$

Por consiguiente, se puede calcular el rendimiento experimental como:

$$\eta_{motor} = \frac{P_{salida}}{P_{entrada} - P_{controlador}}$$

De forma similar se puede trabajar con el rendimiento teórico. Se estimarán las pérdidas del motor en función de la intensidad de salida y las revoluciones, tal y como se explicó en 3.6.3 *Mapa Isorendimientos*. Y se calculará el rendimiento teórico como:

$$\eta_{teórico} = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + P_{pérdidas}}$$

De esta manera, se presentarán los resultados obtenidos del tratamiento de estos ensayos.

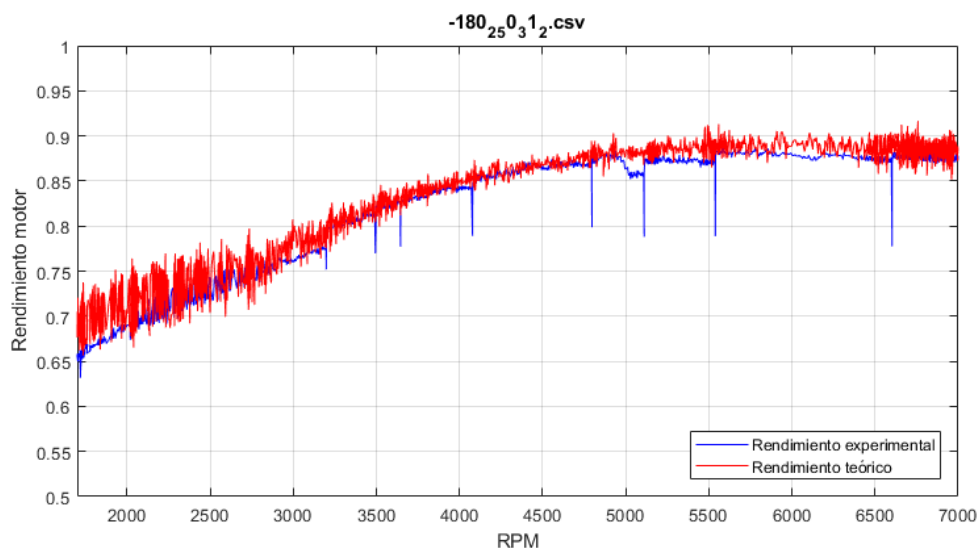


Ilustración 60 - Comparación del rendimiento del motor teórico (rojo) con el experimental (azul) frente a las revoluciones

En general, se puede concluir que los resultados son muy similares obteniendo un error medio entre el valor estimado y el medido de aproximadamente de un 1%, por lo que se dará por válido.

4.5 Validación de circuito

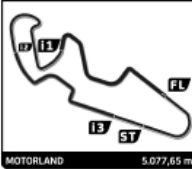
En este apartado se compararán los datos obtenidos en circuito con las estimaciones conseguidas con el programa en cuanto a tiempos por vuelta y velocidades máximas alcanzadas. Para ello se partirán de dos casos distintos: las pruebas cronometradas en Motorland (Alcañiz) en 2018 y las pruebas realizadas en el circuito de Jarama en agosto de 2020.

4.5.1 Pruebas circuito de Motorland 2018

En este año se desarrollaron las diferentes pruebas de MotoStudent 17/18. Durante las pruebas se tomaron datos de vuelta rápida, velocidad punta y tiempo de carrera. Todos estos datos fueron recogidos y proporcionados por la organización de la competición, los cuales se muestran en la ilustración 61. Se nos presentan todos los datos de los diferentes entrenamientos libres, clasificación y carrera. De entre todos los datos se tomará el dato de la clasificación, debido a que esta era la prueba de vuelta rápida al circuito.







MOTOSTUDENT - ELECTRIC

MOTOSTUDENT

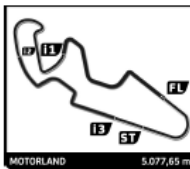
MS2 Qualifying Practice

Classification

Nr.	Rider	Nat	Team	Bike	Tyres	Time	Lap	Total	Gap	Kph
1	5	Manuel García Troya	ESP	UMA RACING TEAM	DUNLOP	2:23.599	2	6	-	127.3
2	6	Sergio Rodrigo Poveda	ESP	UCO ELECTRIC RACING	DUNLOP	2:28.935	3	5	+5.336	122.7
3	10	Juan Bultó Sagnier	ESP	EEBE ePowered Racing	DUNLOP	2:31.382	2	3	+7.783	120.7
4	32	Pablo Esparza Ibáñez	ESP	UPM Motostudent Electric	DUNLOP	2:32.790	6	7	+9.191	119.6
5	9	Aritz Jimenez Iriarte	ESP	MS UNIZAR ELECTRIC	DUNLOP	2:32.937	2	4	+9.338	119.5
6	77	Vendel Templom	HUN	Kenji Racing Team	DUNLOP	2:35.332	3	4	+11.733	117.7
7	15	Sergio Quílez Tapia	ESP	EPS Jaén ujaenteam	DUNLOP	2:35.818	5	6	+12.219	117.3
8	50	Josep Cerdà González	ESP	EUPLA Racing Team	DUNLOP	2:40.240	2	3	+16.641	114.1
9	2	Joaquim Perera Zancada	ESP	MotoSpirit UPC	DUNLOP	2:41.673	2	5	+18.074	113.1
10	17	Johannes Müller	DEU	eLaketric – UAS Constance	DUNLOP	2:42.678	3	5	+19.079	112.4
11	88	Alessandro Berardi	ITA	UniBo Motorsport	DUNLOP	2:49.569	2	3	+25.970	107.8
12	25	Juliá Olivé Márquez	ESP	URVoltage Racing	DUNLOP	2:50.528	2	3	+26.929	107.2
13	11	Nicola Di Rago	ITA	Impulse Modena Racing	DUNLOP	2:55.729	3	3	+32.130	104.0
14	7	Manuel Hernández Sánchez	ESP	Unirioja MotoStudent	DUNLOP	3:02.016	2	3	+38.417	100.4
15	96	Toman P?emysl	CZE	CTULions-E	DUNLOP	3:04.885	3	5	+41.286	98.9
16	53	Daniel Navarro Sanmamed	ESP	e-Ride ETSEIB	DUNLOP					







MOTOSTUDENT - ELECTRIC

MOTOSTUDENT

MS2 Qualifying Practice

Best Top Speeds

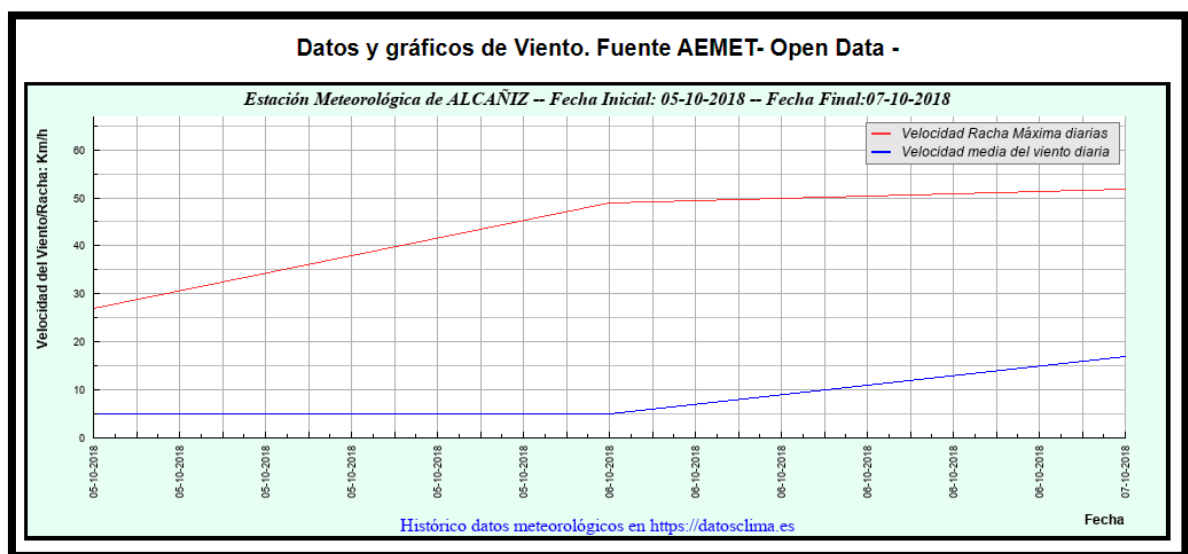
Rider	Team	Top 1 Kph	Top 2 Kph	Top 3 Kph	Top 4 Kph	Top 5 Kph	Avg
5 Manuel García Troya	UMA RACING TEAM	185.6	2 174.5	3 172.5	5 170.3	6 108.9	1 162.4
77 Vendel Templom	Kenji Racing Team	180.3	3 121.8	2 111.2	4 106.7	1	130.0
6 Sergio Rodrigo Poveda	UCO ELECTRIC RACING	180.0	2 168.0	3 161.0	4 97.1	1 64.2	5 134.1
32 Pablo Esparza Ibáñez	UPM Motostudent Electric	176.8	2 174.5	6 172.0	3 125.1	7 121.1	5 153.9
96 Toman P?emysl	CTULions-E	172.8	1 171.2	2 168.5	3 150.4	4 104.5	5 153.5
17 Johannes Müller	eLaketric □ UAS Constance	172.5	2 169.3	3 168.0	4 144.6	1 130.6	5 157.0
10 Juan Bultó Sagnier	EEBE ePowered Racing	170.6	2 87.5	1 82.0	3		113.4
15 Sergio Quílez Tapia	EPS Jaén ujaenteam	170.1	2 161.4	5 156.1	4 120.7	1 109.6	3 143.6
2 Joaquim Perera Zancada	MotoSpirit UPC	169.8	1 165.9	2 161.4	4 151.0	3 144.8	5 158.6
9 Aritz Jimenez Iriarte	MS UNIZAR ELECTRIC	169.5	2 166.2	3 159.1	1 72.8	4	141.9
7 Manuel Hernández Sánchez	Unirioja MotoStudent	168.7	2 147.3	3 127.7	1		147.9
50 Josep Cerdà González	EUPLA Racing Team	165.6	2 145.2	1 95.4	3		135.4
25 Juliá Olivé Márquez	URVoltage Racing	160.7	2 97.1	1 79.3	3		112.4
11 Nicola Di Rago	Impulse Modena Racing	159.5	3 154.1	2			156.8
88 Alessandro Berardi	UniBo Motorsport	150.0	2 145.6	3 110.5	1		135.4
53 Daniel Navarro Sanmamed	e-Ride ETSEIB						

Ilustración 61 - Tiempos realizados en la competición MotoStudent Electric 2018

Partiremos, por tanto, considerando que el tiempo por vuelta debe de ser próximo a 2:35:818 y que la velocidad punta debe de estar en torno a 170 km/h.

Otro dato importante de ese día fue el viento, el cual estuvo presente todo el fin de semana, en especial el domingo día 7 de Octubre de 2018. Se ha tomado de dato el que proporciona la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), que nos dice que ese día hizo una velocidad media de viento de 4,7 m/s con dirección Oeste – Este. Por tanto, se considerará que:

- Viento en contra: Recta principal, recta entre T2 y T3, recta entre T3 y T4 y recta entre T7 y T8
- Viento a favor: recta entre T10 y T12, y recta de atrás (T15 y T16)



Resumen de Valores de Viento a lo largo del Periodo seleccionado:

CARACTERISTICA / VALOR	(Velocidad m/s)	(Velocidad Km/h)	FECHA	HORA
Racha de Viento más alta Registrada:	14.4	51.84	07-10-2018	09:50
Velocidad Media más alta Registrada:	4.7	16.92	07-10-2018	

VALORES POR AÑOS PARA LA ESTACION METEOROLÓGICA: ALCANIZ

AÑO: 2018

FECHA	Racha Max (Km/h)	Hora Racha	Veloc. Media (Km/h)	FECHA	Racha Max (Km/h)	Hora Racha	Veloc. Media (Km/h)	FECHA	Racha Max (Km/h)	Hora Racha	Veloc. Media (Km/h)
05-10-2018	27	15:50	5.04	06-10-2018	48.96	21:20	5.04	07-10-2018	51.84	09:50	16.92

Ilustración 62 – Datos de viento en Alcañiz del 5/10/18 al 7/10/18 medido por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

Link: <https://datosclima.es/Aemethistorico/Vientostad.php>

En cuanto a datos del prototipo, se conocía que el peso de motocicleta más piloto era de en torno a 200 kg y que la potencia mecánica máxima fue de 18 kW, según la siguiente curva del mapa motor.

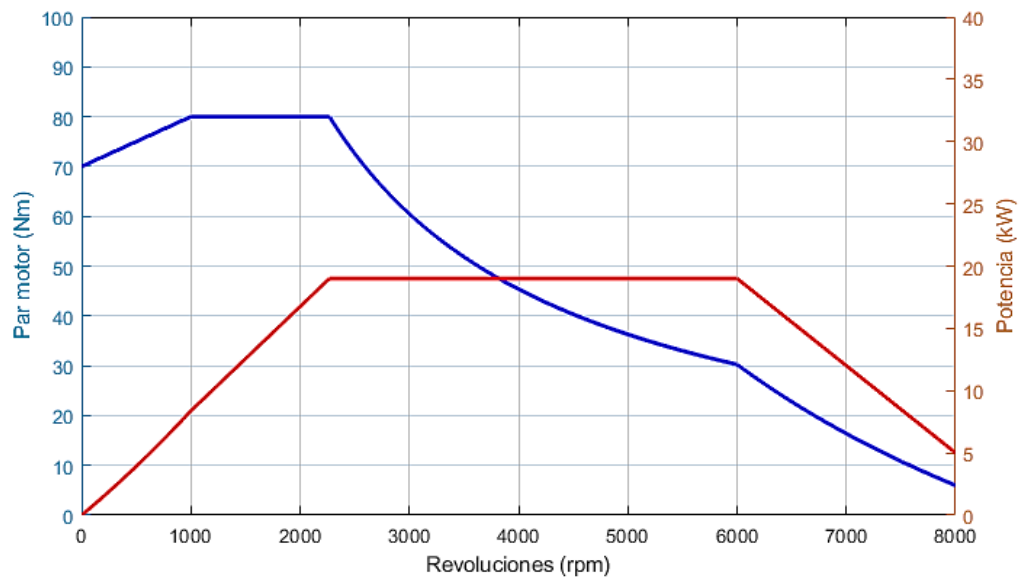


Ilustración 63 - Mapa motor usado en clasificación Motorland 2018

Procesando todos estos datos con el programa creado nos da los siguientes resultados:

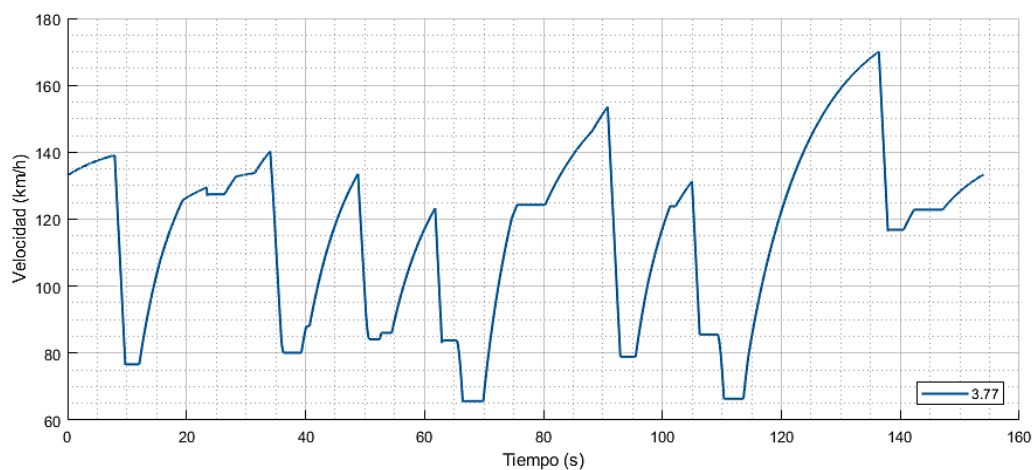


Ilustración 64 - Velocidad frente a tiempo de simulación de vuelta rápida en Motorland 2018

```
La potencia mecanica es (kW): 19.00
Bateria restante (porcentaje): 88.79
Bateria gastada por vuelta (Ah): 6.28
La tension final es 107.46
Bateria gastada por vuelta (Wh) 685.7
Nº vueltas estimadas: 8.9
Tiempo de vuelta (3.77) : 2:33:137
Velocidad máxima (km/h) (3.77) : 171.38
```

- Comparando los tiempos por vuelta:
 - 2:35:818 el tiempo de vuelta rápida del piloto
 - 2:33:137 el tiempo más rápido estimado para esas condiciones
- Comparando la velocidad máxima:
 - 170,1 km/h la velocidad máxima dada en esa vuelta
 - 171,38 km/h la velocidad máxima estimada para esas condiciones

Con los datos mostrados se puede dar por satisfactorio la relación entre lo calculado con el programa creado. Esta muestra poca diferencia en el cálculo de velocidad máxima, pero una diferencia notable en los tiempos por vuelta. Esto se debe a que el piloto no es una máquina sino una persona, la cual, puede cometer errores a la hora de pilotar, realizando así unos tiempos peores que la vuelta perfecta estimada. Factores como el viento y la temperatura de pista también afectan al pilotaje, dificultando realizar una vuelta perfecta. A pesar de eso, el error es relativamente pequeño entre el estimado y el real dada las circunstancias de viento y baja temperatura en pista, por lo que se puede dar por válido el cálculo de tiempo por vuelta.

4.5.2 Pruebas circuito de Jarama 2020

Se realizaron diferentes pruebas en el circuito del Jarama (Madrid) el 8 de agosto de 2020. Entre ellas, se realizó una simulación de carrera de 6 vueltas para obtener datos y funcionamiento del prototipo. Los datos que se obtuvieron, debido a la falta de un sistema de adquisición de datos, fueron los que mostraban la DashBoard al comenzar y terminar la sesión. Por tanto, se tienen como datos: la temperatura ambiente de ese día, la temperatura de motor

y controlador al llegar al box y la velocidad máxima mencionada por el piloto. Con esos pocos datos se intentará contrastar con las simulaciones.

Para realizar la simulación, se ha estimado una vuelta de formación y de vuelta a boxes a una velocidad de 50 km/h.

Dato obtenido	Valor
Temperatura ambiente (°C)	30
Temperatura motor final (°C)	76
Temperatura controlador final (°C)	53
Velocidad máxima (km/h)	168
Potencia mecánica (kW)	20

Tabla 10 - Datos obtenidos de pruebas en el Jarama en agosto de 2020

Los datos obtenidos de introducir estos datos en las simulaciones son las siguientes:

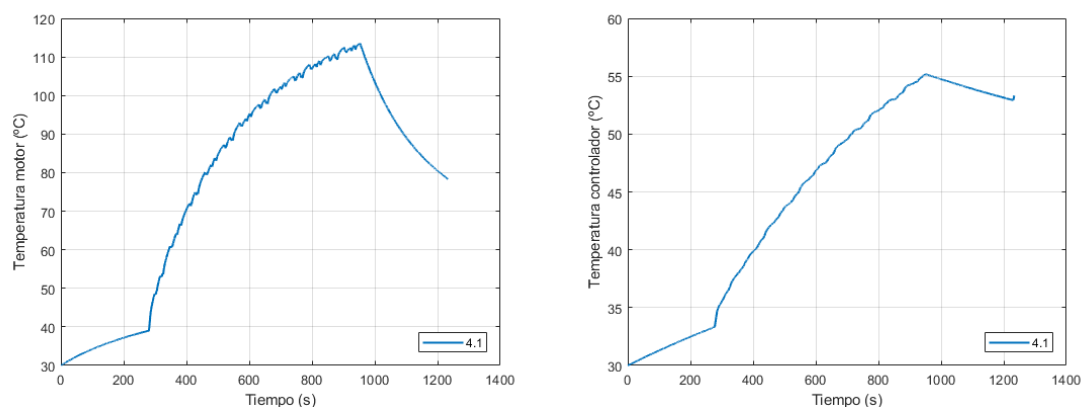


Ilustración 65 -Simulación del circuito del Jarama en carrera de 5 vueltas. La primera tablas representa la temperatura del motor, la segunda tabla la temperatura del controlador.

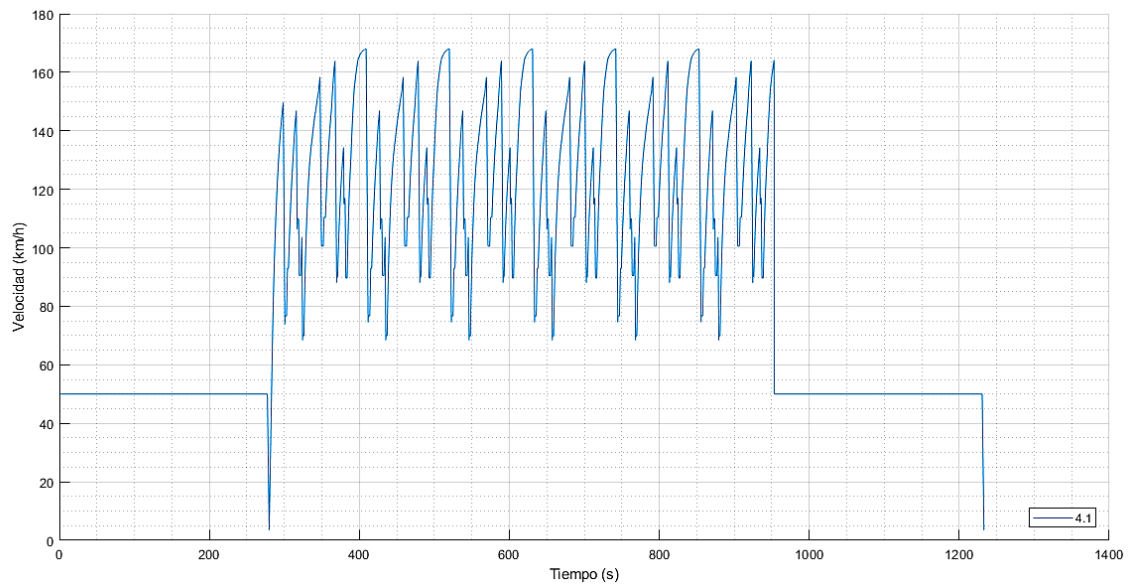


Ilustración 66 - Simulación del circuito del Jarama en carrera de 5 vueltas. Siendo: primera tabla temperatura del motor, segunda tabla temperatura del controlador y la tercera de la velocidad respecto del tiempo.

Si observamos la tabla velocidad tiempo, se observa que la velocidad máxima es de 167 km/h, muy próxima a la que menciona el piloto. Se puede decir que la velocidad del circuito puede ser válida.

Respecto a las otras dos gráficas, las temperaturas de llegada al box coinciden con los valores medidos nada más llegar el prototipo a los boxes, por lo que se pueden dar por válidos los coeficientes de velocidades de aire y de calor refrigerado.

Capítulo V:

RESULTADOS



5 Resultados

Tras validar el modelo, obtendremos los resultados de la simulación de las diferentes pruebas a estudiar que son:

- Prueba de aceleración
- Prueba de velocidad máxima
- Prueba de vuelta rápida
- Carrera

Para cada una de ellas, se introducirán diferentes relaciones de transmisión y se estudiará cómo varían los tiempos. En el caso especial de la carrera, se estudiarán además los consumos y las temperaturas del tren motriz. Con todos los datos, se obtendrá una relación óptima para cada prueba que será la elegida para la prueba en circuito.

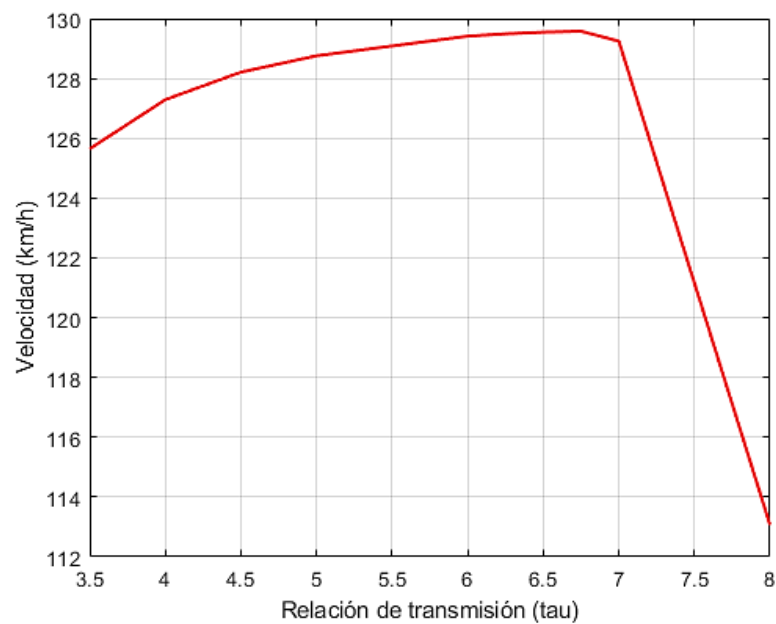
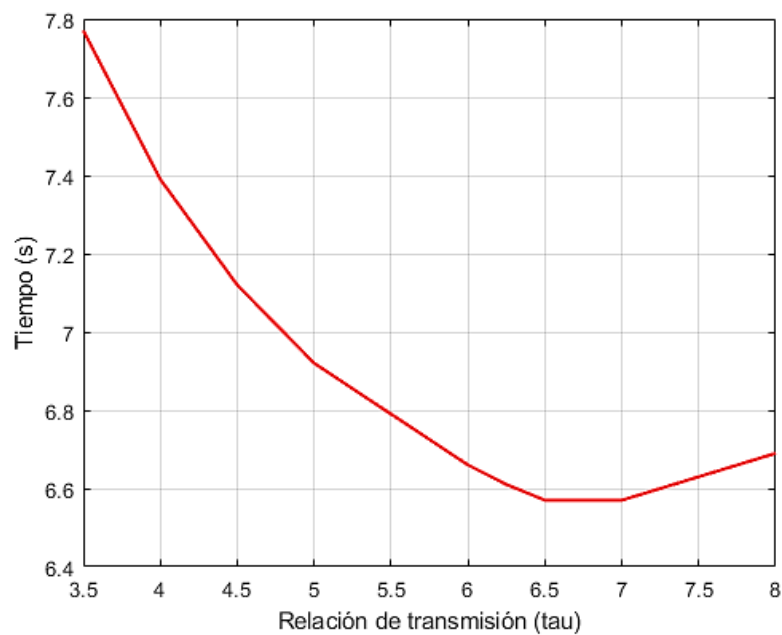
5.1 Prueba de aceleración

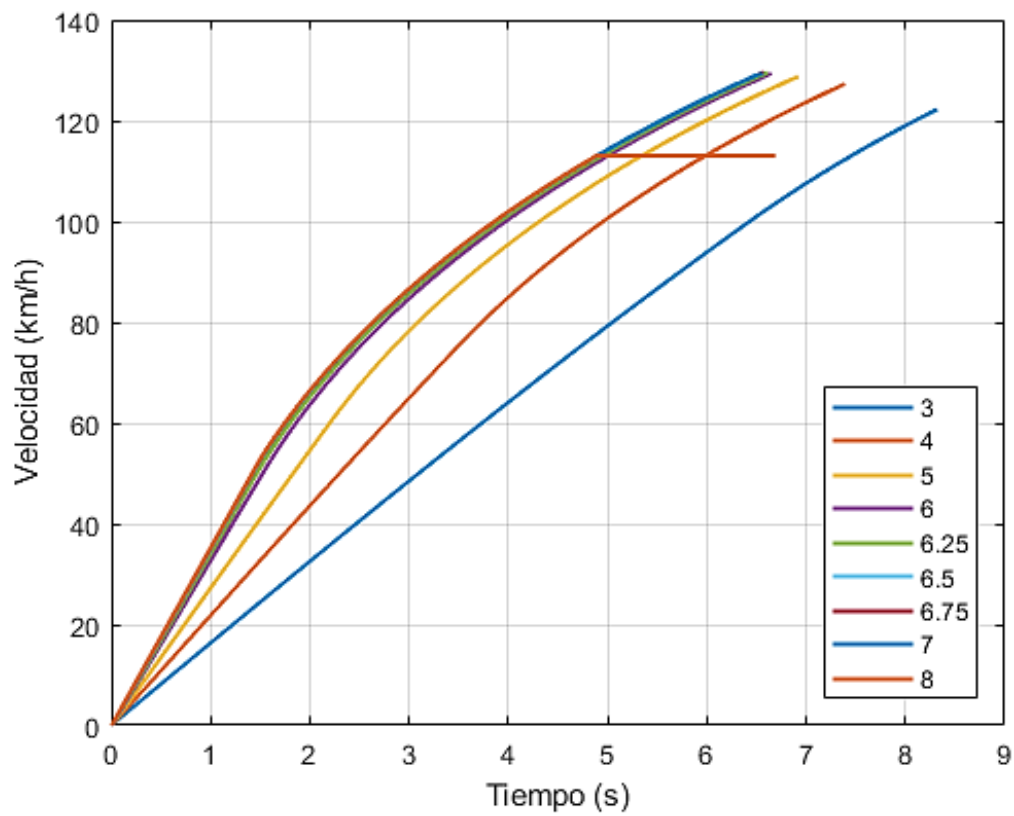
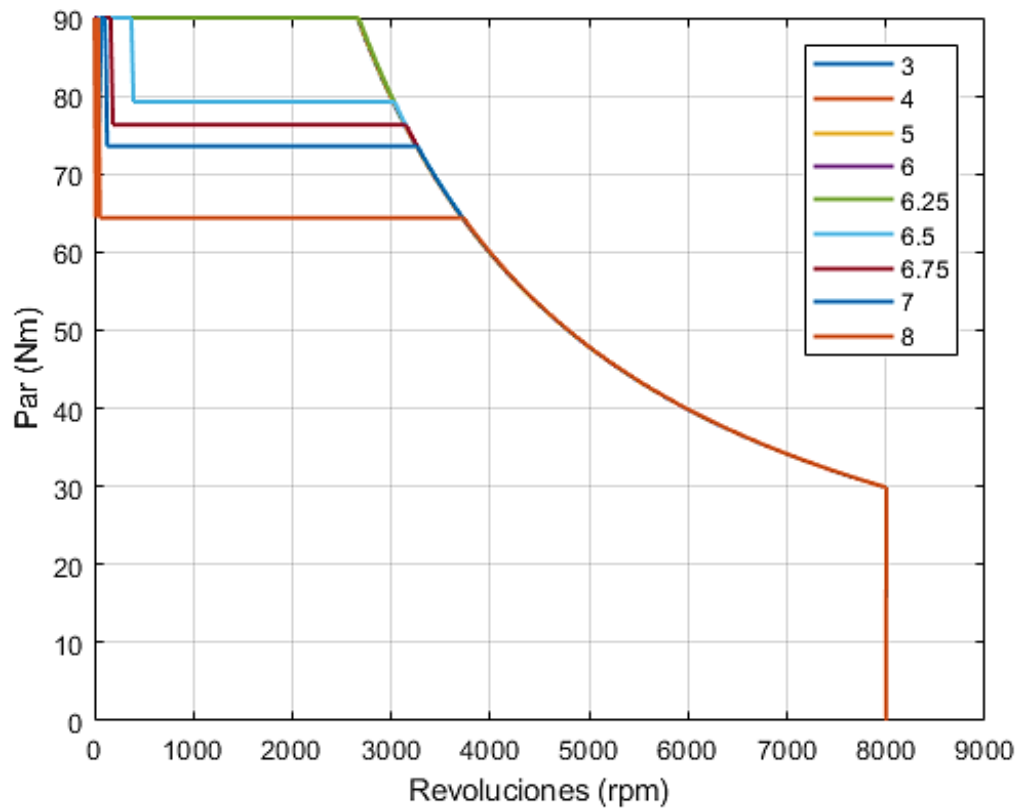
En esta prueba se medirá la aceleración máxima del prototipo desde parado en una recta de 150 m tratando de realizarla en el menor tiempo posible. La Organización tomará el tiempo total desde la salida del prototipo hasta su paso por el punto final del recorrido.

Para realizar esta prueba correctamente se deberá tener en cuenta que el par máximo, y por tanto la aceleración que provoca, no supere la aceleración de vuelco ni el límite de adherencia del neumático. En base a esto, se elegirá un mapa motor de máxima potencia que no supere dichos valores de par, después, se realizará el cálculo de la relación de transmisión óptima. La manera de actuar será exactamente igual que como se explicó en 3.6.2) *Cálculo de aceleración*, calculando la aceleración que proporciona el motor, la aceleración límite de adherencia y la de límite de vuelco, escogiendo la menor de ellas. Debido a que, si la aceleración menor no es la aceleración proporcionada por el motor, calcularemos el par asociado a esa aceleración en el motor y desarrollaremos el mapa Par – Velocidad óptimo para ese caso. De esta manera, el piloto no sufrirá derrapes ni vuelcos que controlar pudiendo realizar la prueba sin problemas y perdiendo el mínimo tiempo posible.

Considerando:

- Masa de la motocicleta más piloto de: 175 kg
- Potencia mecánica: 25 kW
- Par máximo: 90 Nm
- Coeficiente de adherencia (μ): 1
- Velocidad de inicio: 0 km/h
- Masa inercial o equivalente estimada: 5kg





Analizando estas gráficas podemos observar que la mejor relación de transmisión para esta prueba se trata de una relación de entre 6,5 a 7, consiguiendo completar los 150 m en menos de 6,6 segundos, llegando a los casi 130 km/h.

Si se observa la gráfica de par velocidad, todas las relaciones de transmisión menores de 6,25 cumplen la curva de isopotencia típica de los motores eléctricos. Sin embargo, relaciones de transmisión más cortas, mayores de 6,25, producen un efecto de derrape o vuelco, por lo que sería necesario reducir el par en sus curvas para evitar dichos efectos durante la prueba.

Por último, la gráfica de velocidades respecto del tiempo, deja ver que la relación de transmisión más corta, la de 8, llega al límite de las 8000 rpm y por tanto es incapaz de aumentar su velocidad. Por otro lado, relaciones mucho más largas, como la 3, tardan mucho tiempo en coger velocidad por lo que su velocidad final es baja respecto al resto y su tiempo es muy alto, y, por tanto, malo. Relaciones entre 6,25 y 7 son casi indistinguibles debido a que se encuentran próximas al óptimo.

Para concluir este apartado, mostraremos el mismo ensayo, pero para el caso de que exista viento a favor y viento en contra de 2, 4 y 8 m/s.

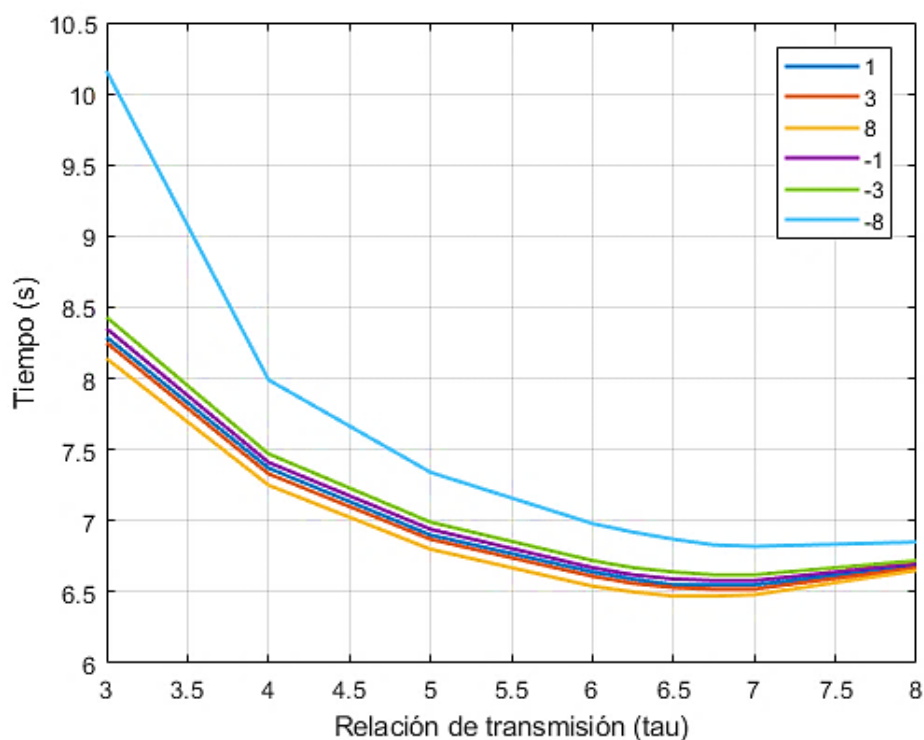


Ilustración 67 - Tiempo frente a relaciones de transmisión en función de la velocidad del viento, tanto a favor (positivo) como en contra (negativo)

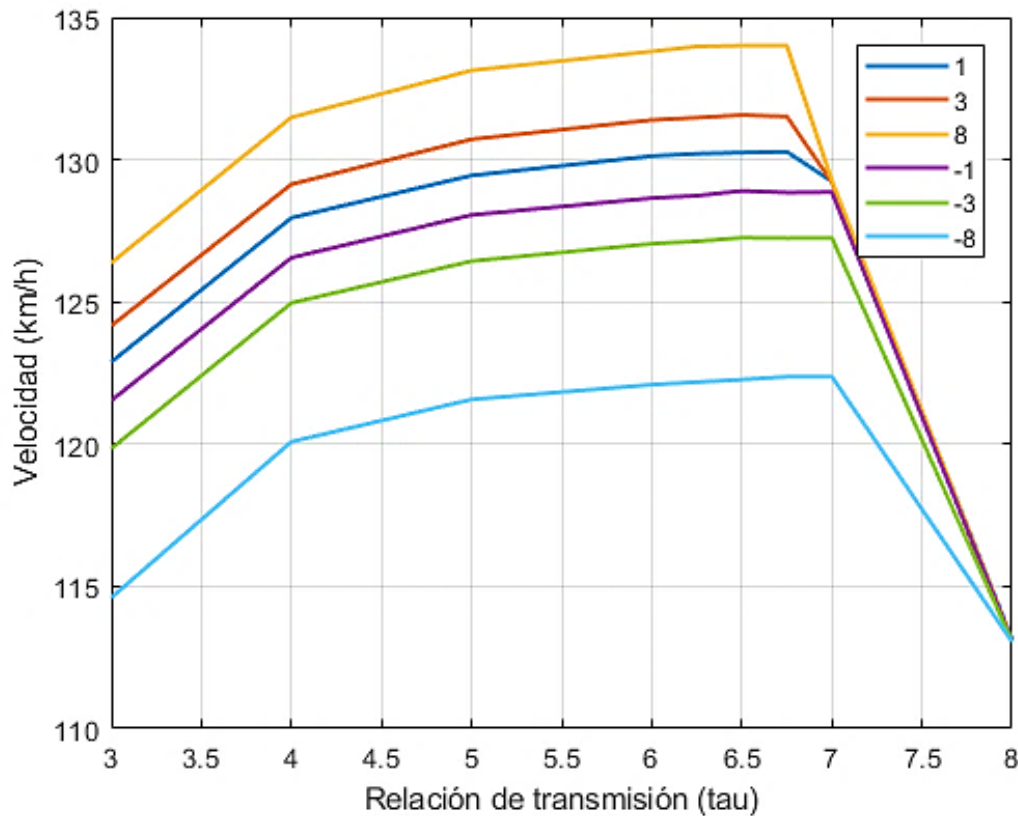


Ilustración 68 – Velocidad máxima frente a relaciones de transmisión en función de la velocidad del viento, tanto a favor (positivo) como en contra (negativo)

Las conclusiones que se pueden obtener son muy parecidas a las del caso anterior, pero variando levemente según el viento. Si nos fijamos en los casos extremos, en el caso de viento en contra de 8 m/s el óptimo es una relación de transmisión de 7, mientras que con viento a favor de 8 m/s es de 6,5.

5.2 Prueba de velocidad máxima

Esta prueba consistirá en obtener la máxima velocidad en un punto determinado del Circuito durante la sesión “Free Practice 1”.

La Organización comenta en el reglamento:

- El punto dónde se ubica la SpeedTrap la Organización colocará un medidor de velocidad. La ubicación del SpeedTrap será comunicada a los equipos durante el Evento Final.

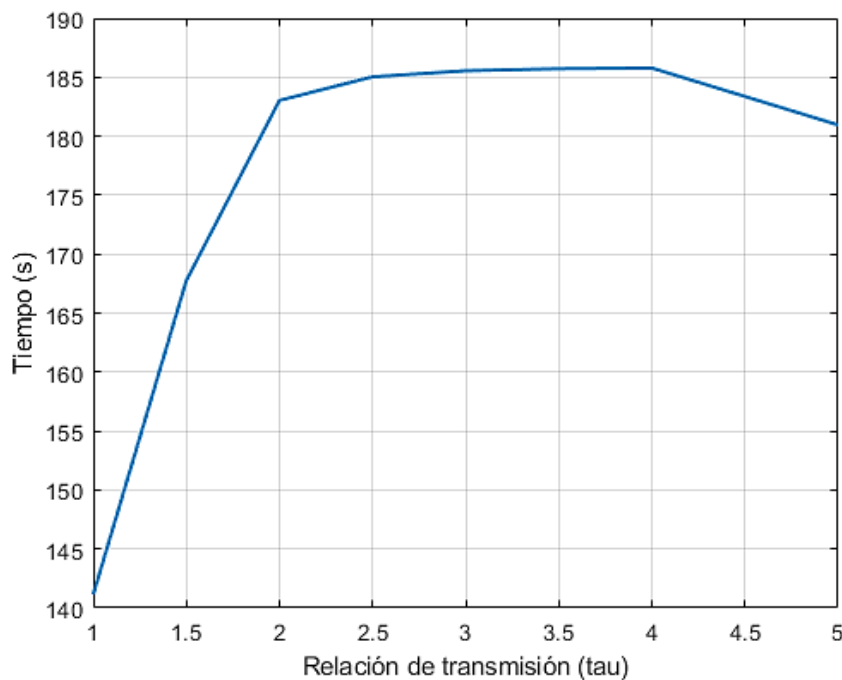
- Se considerará apto para el resultado de esta prueba cualquier paso por el punto de SpeedTrap durante la sesión completa “Free Practice 1”, incluyendo las vueltas sin paso por línea de meta (con entrada y/o salida desde PitLane).

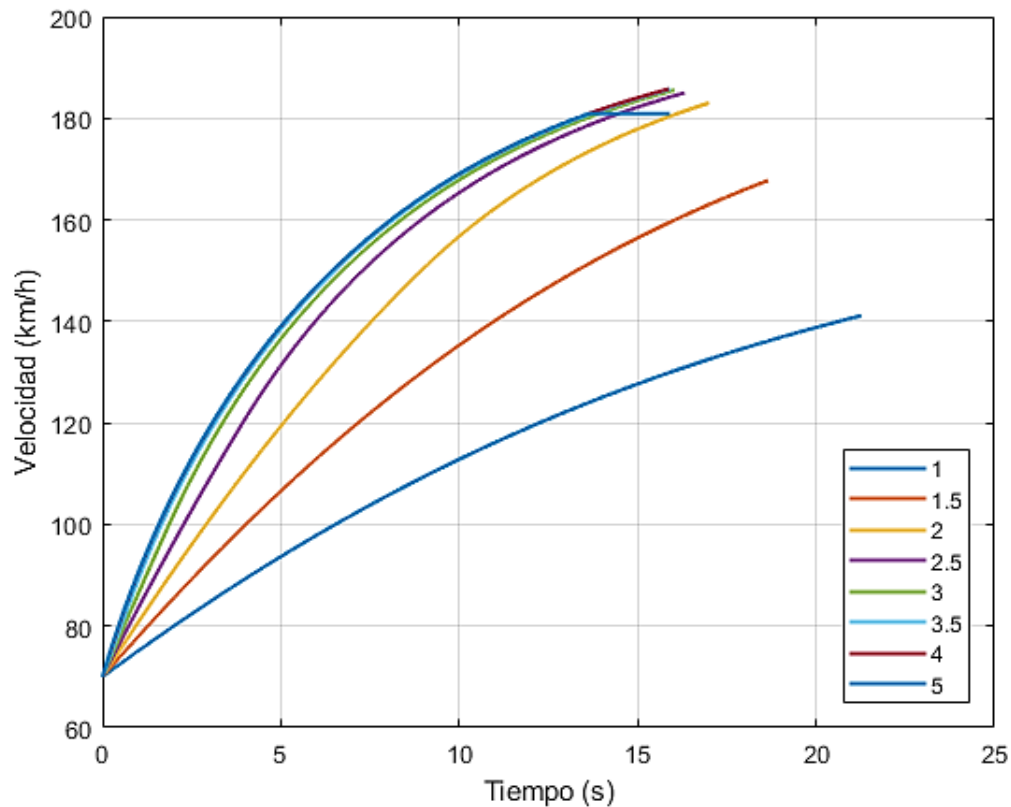
Por experiencia de otros años, se conoce que la posición de ese SpeedTrap se encuentra a 660 m de la salida de la curva T15, en la recta trasera del circuito. Es por ello, que se marca como objetivo conseguir la mayor velocidad posible en 660, conociendo que la velocidad de salida de dicha curva, y, por tanto, velocidad de inicio, es de 70 km/h.

Para el estudio de esta prueba, se realizará de una manera similar a la de aceleración, usando lo explicado en 3.6.2) *Cálculo de aceleración*.

Considerando:

- Masa de la motocicleta más piloto de: 175 kg
- Potencia mecánica: 25 kW
- Par máximo: 90 Nm
- Coeficiente de adherencia (μ): 1
- Velocidad de inicio: 70 km/h
- Masa inercial o equivalente estimada: 5 kg





Analizando estas gráficas observamos que existe un óptimo entre una relación de 3 y 4, con una velocidad máxima de 186 km/h. Debido a que en esa zona se trabajará en la zona de isopotencia no existen variaciones muy grandes entre diferentes relaciones de transmisión, aunque en las zonas de menor velocidad máxima, como son las menores de 2 y mayores de 4, se trabajan fuera de estas zonas. Las menores de 2 pasan un tiempo en zona de par constante, por lo que la potencia no será la máxima y necesitarían una recta mayor. Por el contrario, las mayores de 4, llegan a las 8000 rpm y no pueden continuar acelerando, por lo que se ve limitada su velocidad máxima.

Analizaremos ahora los mismos casos que en la aceleración, que son el hecho de que exista viento a favor y en contra de: 1, 3 y 8 m/s.

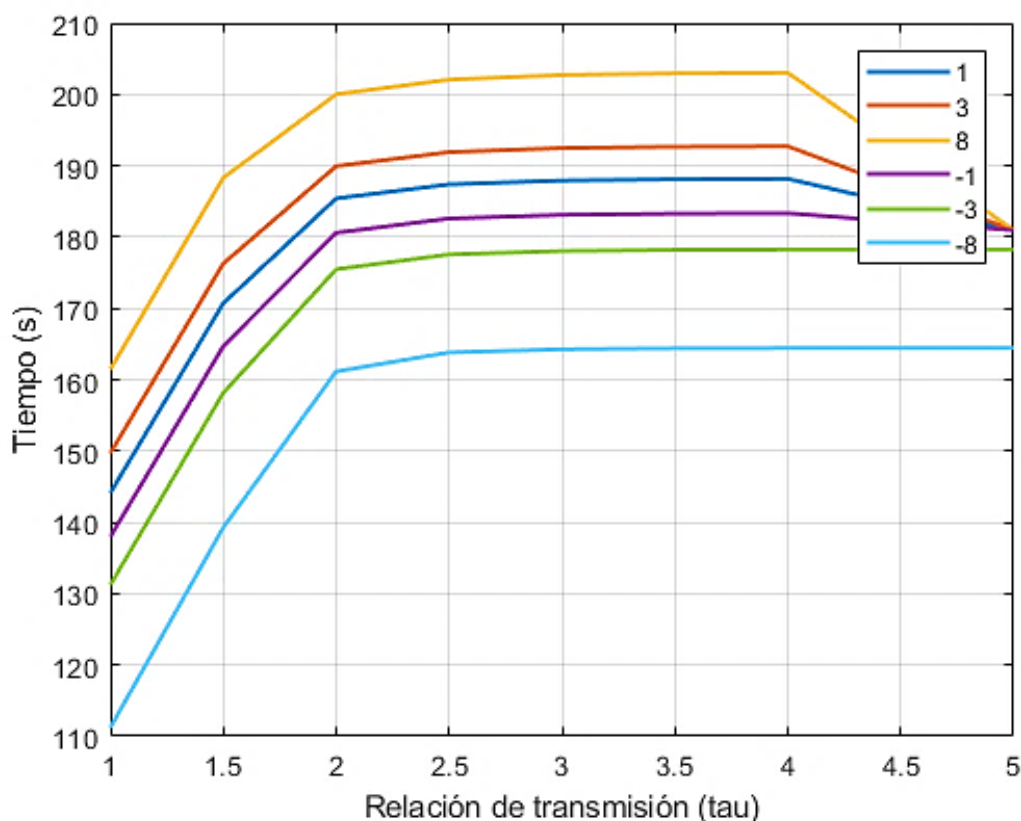


Ilustración 69 - Tiempo frente a relaciones de transmisión en función de la velocidad del viento, tanto a favor (positivo) como en contra (negativo)

Para el caso de vientos a favor, las relaciones de transmisión óptimas se siguen manteniendo en los mismos valores anteriores. Sin embargo, para vientos en contra, estas relaciones óptimas se amplían por la zona de relaciones más cortas. Esto es debido a que el viento limita la velocidad máxima y relaciones más cortas consiguen llegar a dicha velocidad en el mismo tiempo. Para el caso de relaciones más cortas, seguirían necesitando rectas más largas para conseguir dicha velocidad máxima.

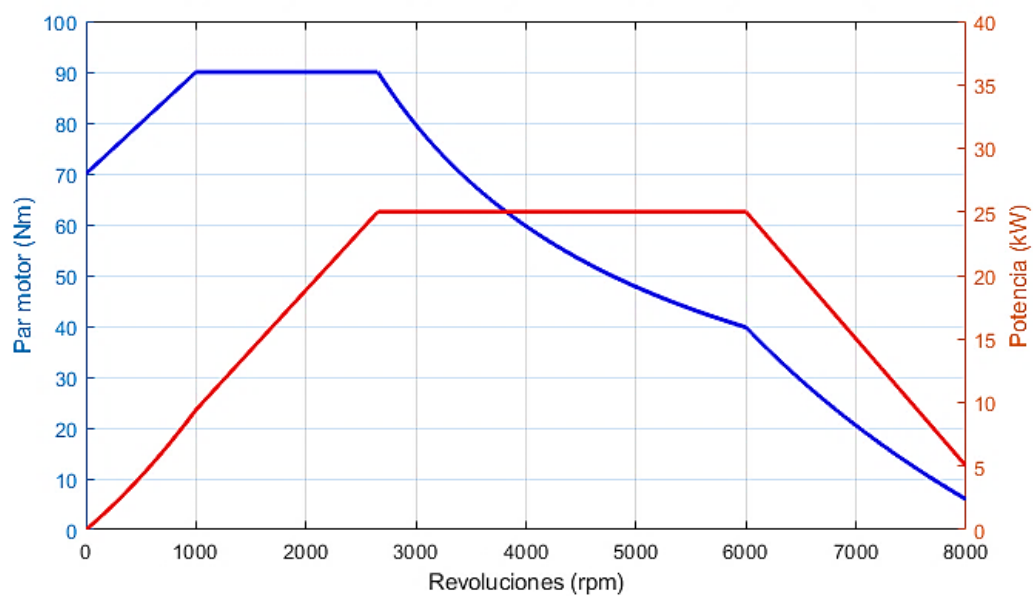
5.3 Prueba de vuelta rápida (Clasificación)

Esta prueba consiste en obtener el tiempo más rápido en dar una vuelta al circuito de velocidad. Se dará un número de puntos igual a la posición conseguida y ordenará la parrilla de salida para la carrera.

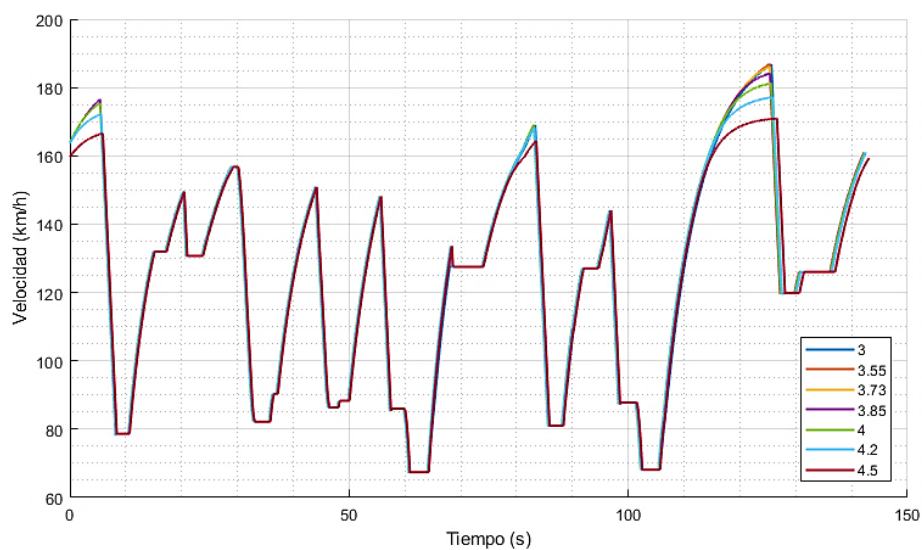
La realización de esto será simulando las diferentes rectas y curvas en las que se ha dividido el trazado, y aplicando en cada una de ellas las diferentes ecuaciones y restricciones explicada en 3.6) *Modelo de rectas* y 3.7) *Modelo de curvas*. Estudiaremos diferentes

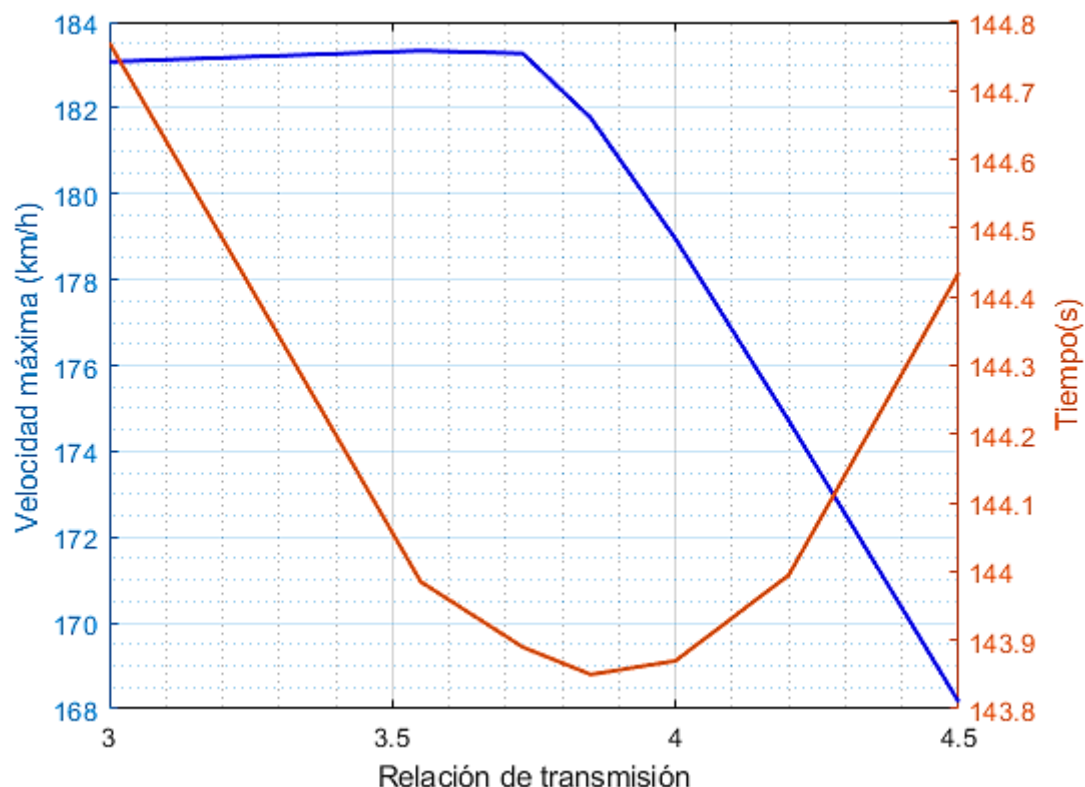
relaciones de transmisión y se escogerá la óptima para esta prueba. Como parámetros para la simulación tendremos:

- Masa de la motocicleta más piloto de: 175 kg
- Potencia mecánica: 25 kW
- Par máximo: 90 Nm
- Coeficiente de adherencia (μ): 1
- Masa inercial o equivalente estimada: 5kg
- Mapa motor:



Como resultado de este análisis con estos parámetros de entrada, se nos muestran los siguientes resultados.





```

Tiempo de vuelta (3) : 2:24:461
Velocidad máxima (km/h) (3) : 183.07
Tiempo de vuelta (3.55) : 2:23:590
Velocidad máxima (km/h) (3.55) : 183.33
Tiempo de vuelta (3.73) : 2:23:533
Velocidad máxima (km/h) (3.73) : 183.27
Tiempo de vuelta (3.85) : 2:23:509
Velocidad máxima (km/h) (3.85) : 181.77
Tiempo de vuelta (4) : 2:23:521
Velocidad máxima (km/h) (4) : 178.94
Tiempo de vuelta (4.2) : 2:23:596
Velocidad máxima (km/h) (4.2) : 174.71
Tiempo de vuelta (4.5) : 2:24:260
Velocidad máxima (km/h) (4.5) : 168.16
  
```

Entre todas las relaciones de transmisión estudiadas, la más rápida es 3,73 realizando un tiempo de vuelta de 2:23:509 y una velocidad máxima de 183'3 km/h. Como se puede observar, no se corresponde con la velocidad máxima, ya que en este caso no es solo el estudio de una recta, sino que las diferentes curvas y rectas modifican el punto óptimo. Es por ello, que esta relación de transmisión es óptima para este circuito, cosa que no será en otros circuitos diferentes.

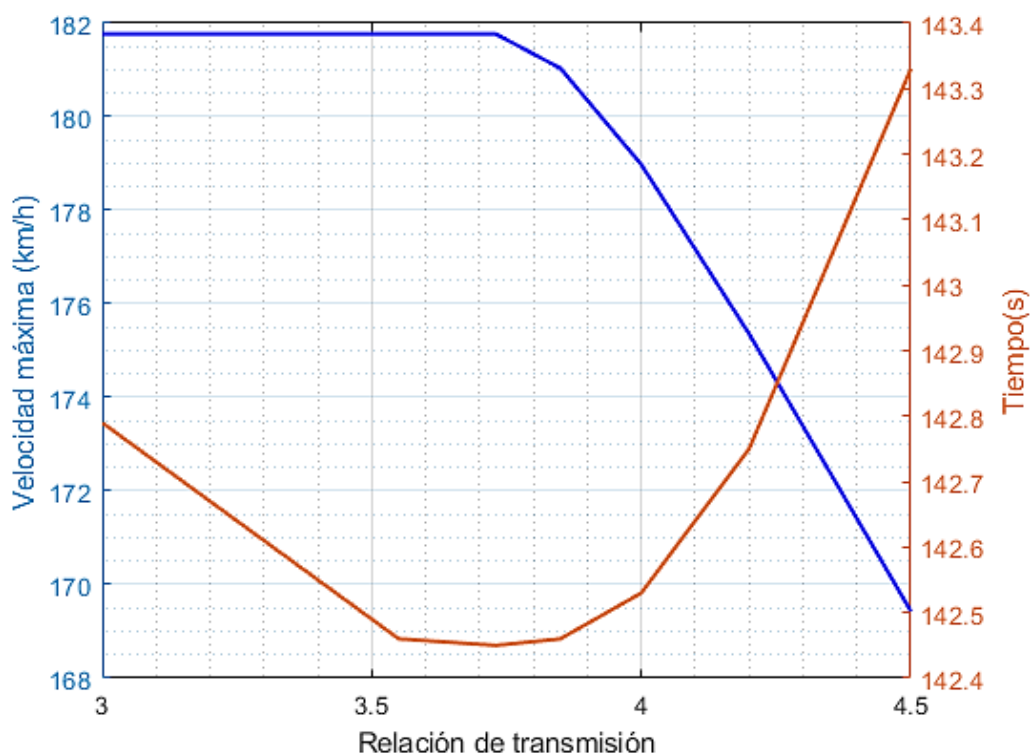
El mapa motor introducido para esta prueba limita la potencia que entrega a altas revoluciones, que, a diferencia del introducido en la prueba de velocidad máxima, compuesta de zona de par constante y zona de potencia constante hasta las 8000 rpm. Por este motivo las relaciones de transmisión superiores a 3,55 comienzan a tener una velocidad punta menor comparadas con la prueba de velocidad máxima.

Para concluir este apartado, se incluirán varias gráficas relación de transmisión – velocidad máxima – tiempos dónde se incluirá el efecto del viento. Para ello se tomarán dos casos: viento a favor o viento en contra en recta de meta. En función de esta, se definirá el efecto del viento en las otras rectas.

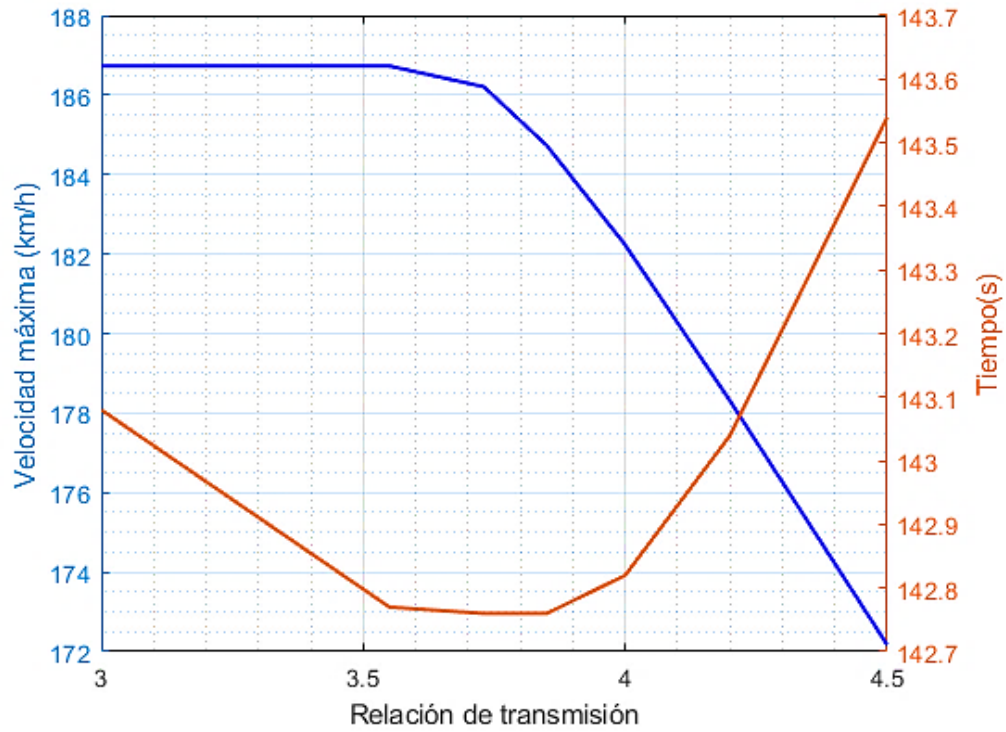
1. Caso 1: Viento a favor en recta de meta

- Viento a favor: Recta principal, recta entre T2 y T3, recta entre T3 y T4 y recta entre T7 y T8
- Viento en contra: recta entre T10 y T12, y recta de atrás (T15 y T16)

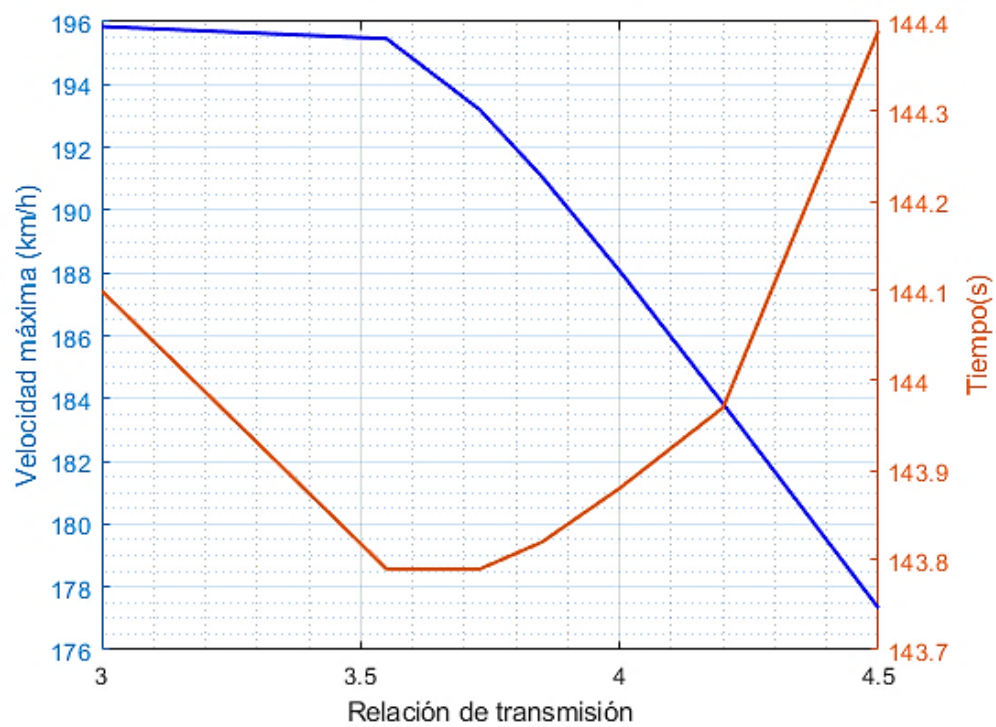
➤ Viento de valor 2 m/s:



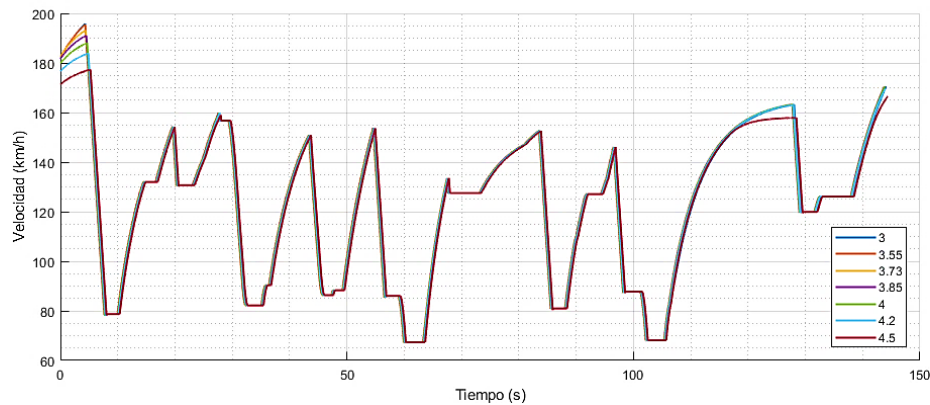
➤ Viento de 4 m/s



➤ Velocidad de 8m/s



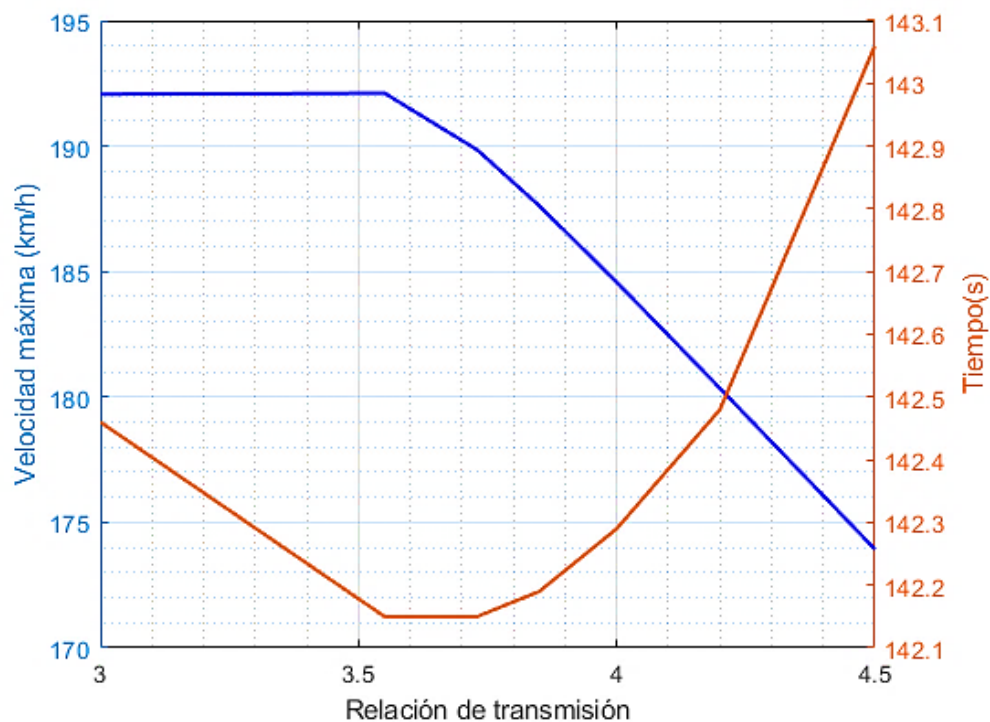
La diferencia entre las diferentes gráficas es la caída del tiempo por vuelta y el aumento de la velocidad máxima. Esta velocidad no se da en la recta larga de atrás, sino en la propia recta principal gracias a la ayuda del viento. A pesar de esto, la relación de transmisión óptima sigue siendo la de 3,7.



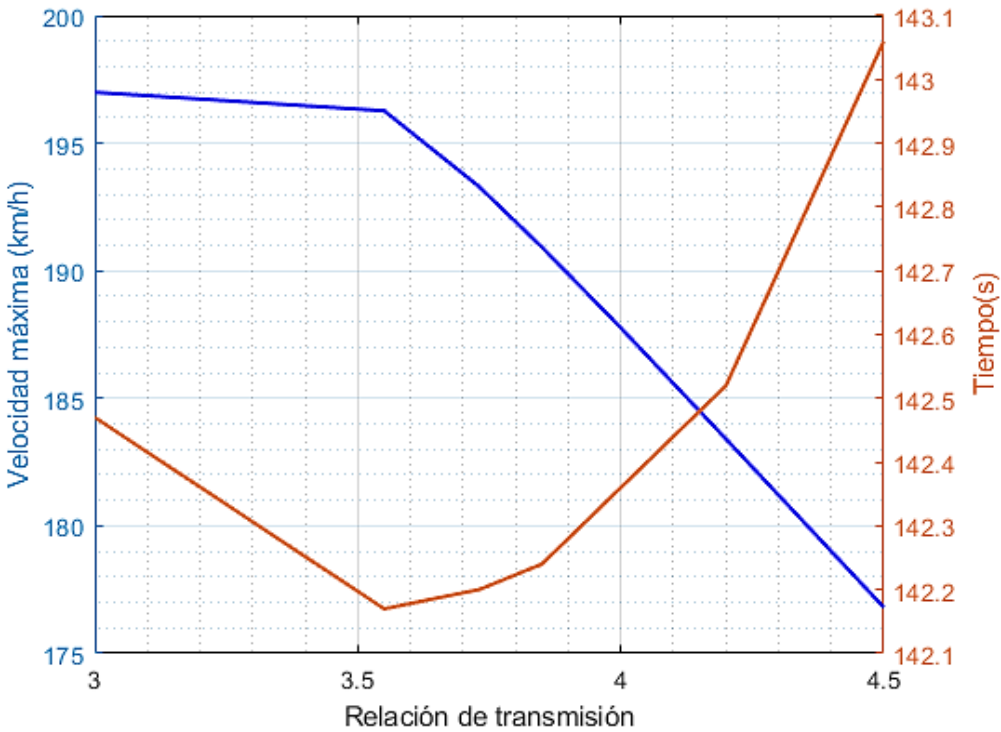
○ Caso 2: Viento en contra en recta de meta:

- Viento en contra: Recta principal, recta entre T2 y T3, recta entre T3 y T4 y recta entre T7 y T8
- Viento a favor: recta entre T10 y T12, y recta de atrás (T15 y T16)

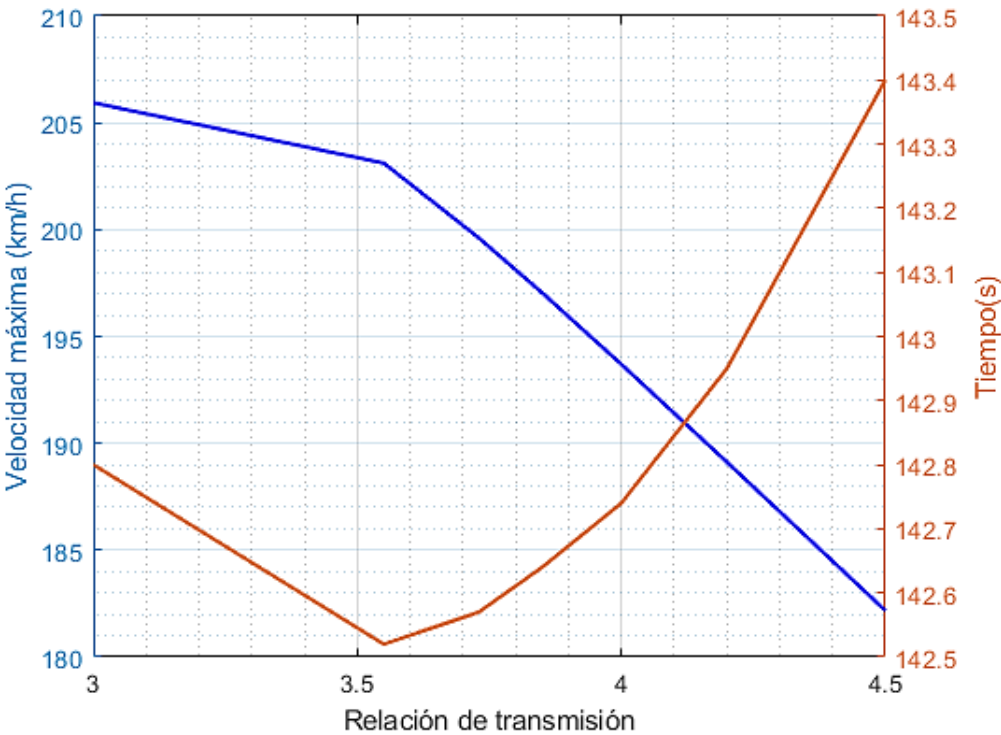
➤ Viento de 2 m/s



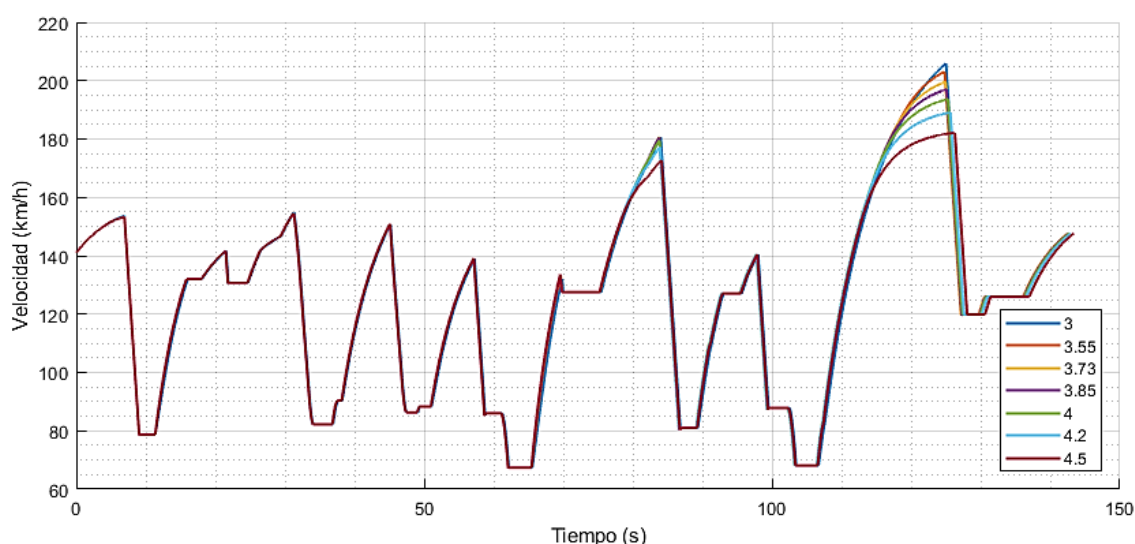
➤ Viento de 4 m/s



➤ Viento de 8 m/s



La diferencia entre las diferentes gráficas es la caída del tiempo por vuelta y el aumento de la velocidad máxima. Esta velocidad se da en la recta larga de atrás gracias a la ayuda del viento. La relación de transmisión óptima se alarga levemente hasta 3.55 para aprovechar ese viento a favor en la recta de atrás.



5.4 Carrera

La carrera será la prueba final en la que el vencedor será el primero en completar 6 vueltas al trazado de Motorland. Pero no solo habrá que realizar esas 6 vueltas, sino también habrá que tener en cuenta la vuelta de formación y de honor. Durante todas las vueltas, habrá que conseguir que la temperatura de los componentes del tren motriz no supere sus límites o que la batería llegue a cero. Es por ello, que habrá que hacer una simulación de la carrera completa para obtener la máxima potencia a desarrollar sin terminar sin batería disponible y que la temperatura no supere dichos límites.

Para realizar esta simulación, se emplearán todos los contenidos anteriores. Se estudiarán un rango de relaciones de transmisión, comprendidas entre $\tau=3$ y $\tau=5$. Se seguirá el siguiente procedimiento:

1. Estimación de la potencia máxima sin llegar a batería nula, siendo esta un consumo inferior a 5750 kWh

2. Reducción de potencia hasta que el calentamiento de motor/controlador/baterías esté por debajo de sus respectivos límites
3. Escoger la relación de transmisión que complete la carrera en menor tiempo

Se comenzará estimando una potencia máxima de 26 kW de potencia mecánica demandada en el motor. A partir de esta, y realizando la simulación de una carrera completa, se obtienen los siguientes resultados respecto a consumo de batería y temperaturas del tren motriz en función de la relación de transmisión. No será considerado viento de ningún tipo. En cuanto al mapa motor introducido es el de la siguiente imagen.

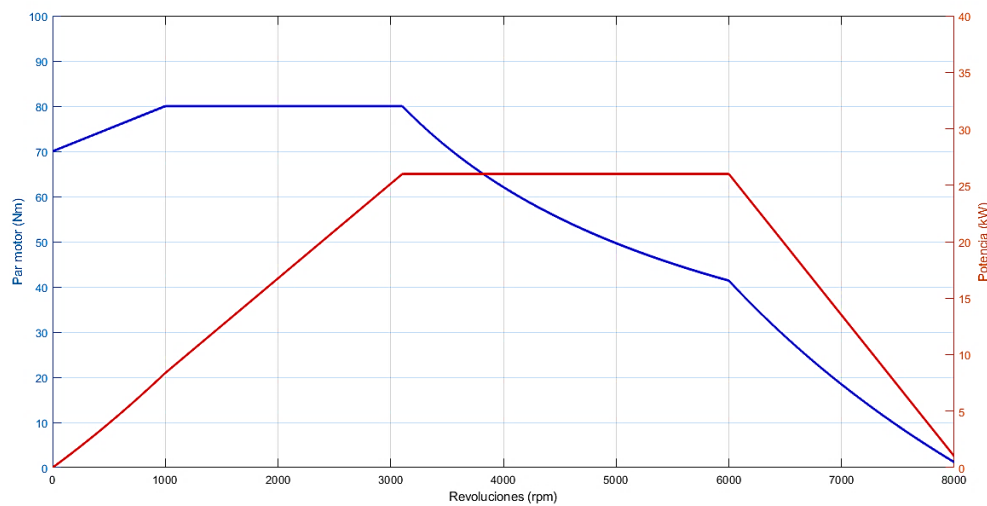
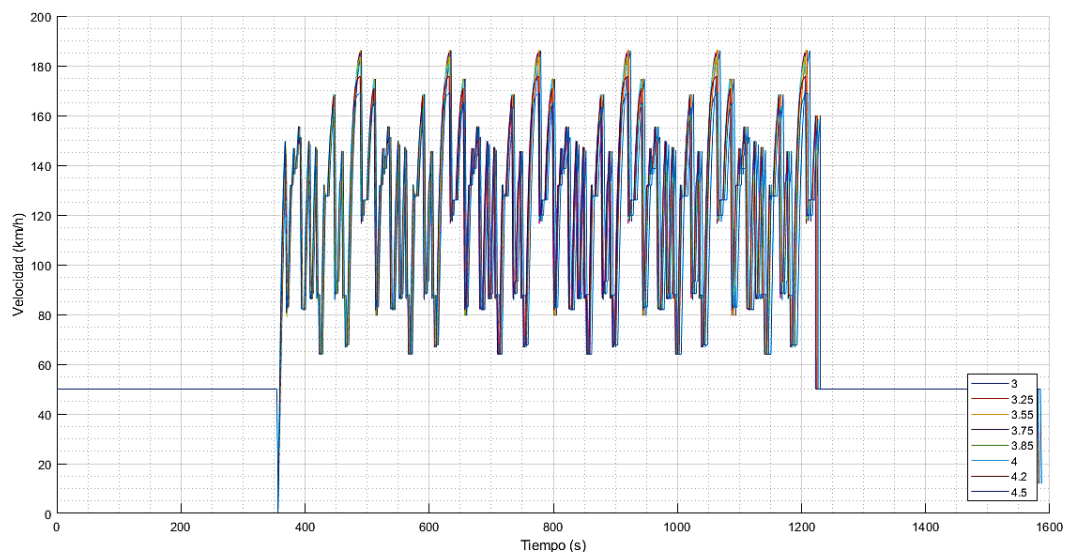
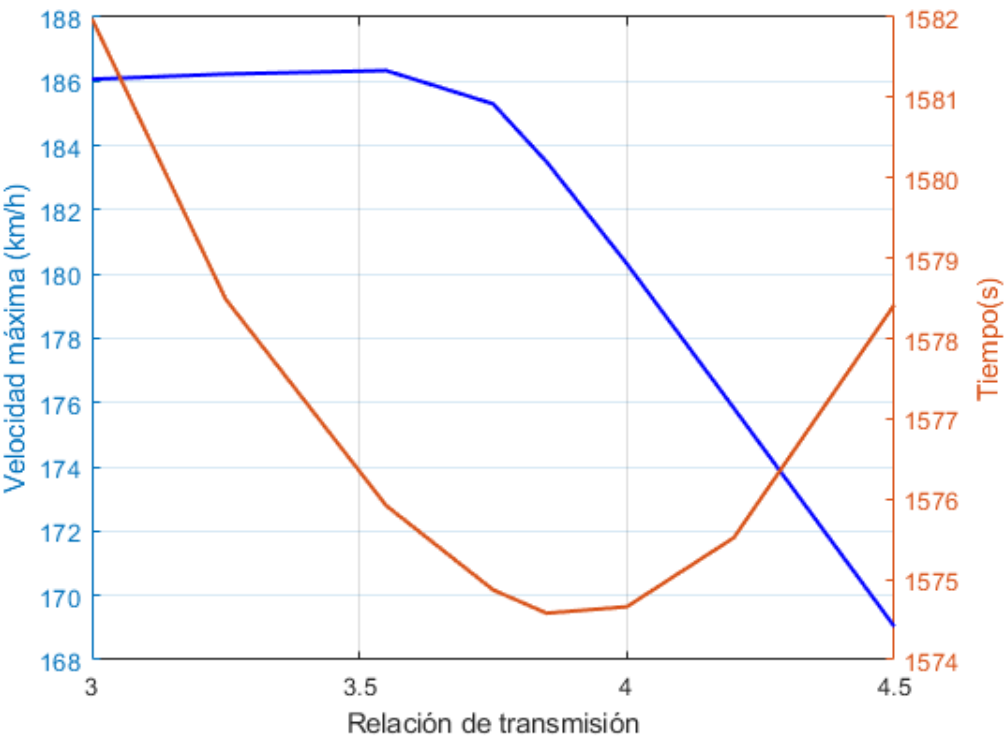
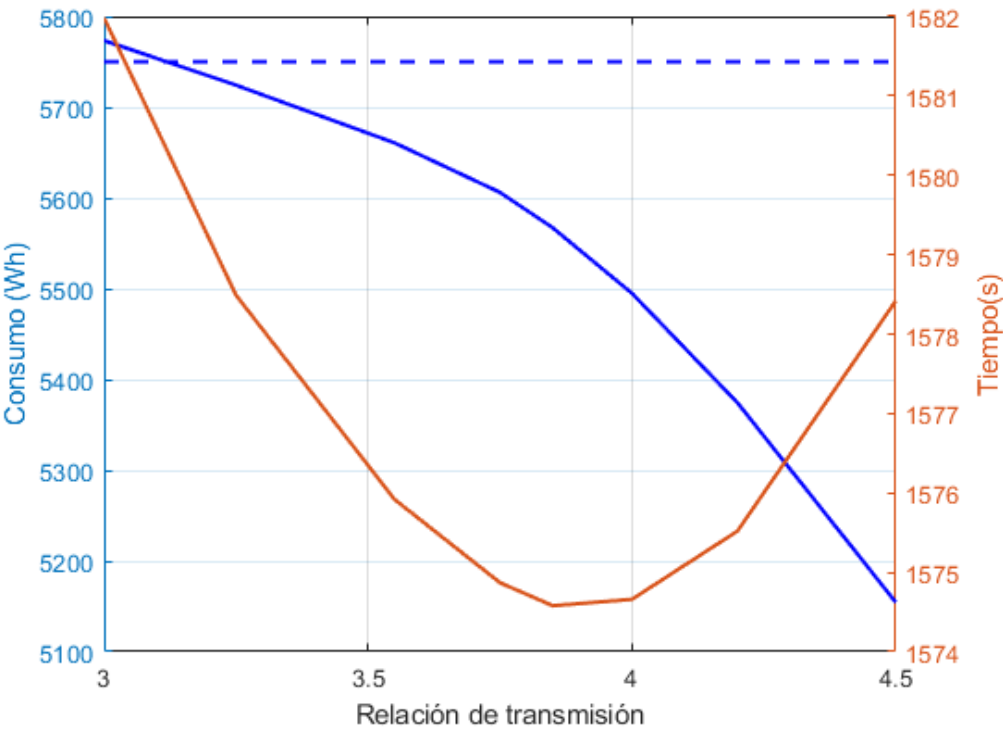


Ilustración 70 - Curva Par –Velocidad (azul) y Potencia – Velocidad (rojo) para la simulación de carrera de 26 kW

Los resultados obtenidos para esta simulación son las siguientes.



La estimación de la vuelta de formación y de honor, se considerará una vuelta completa a velocidad constante de 50 km/h, estimando su pérdida de batería y variaciones de temperatura en dicho tiempo.



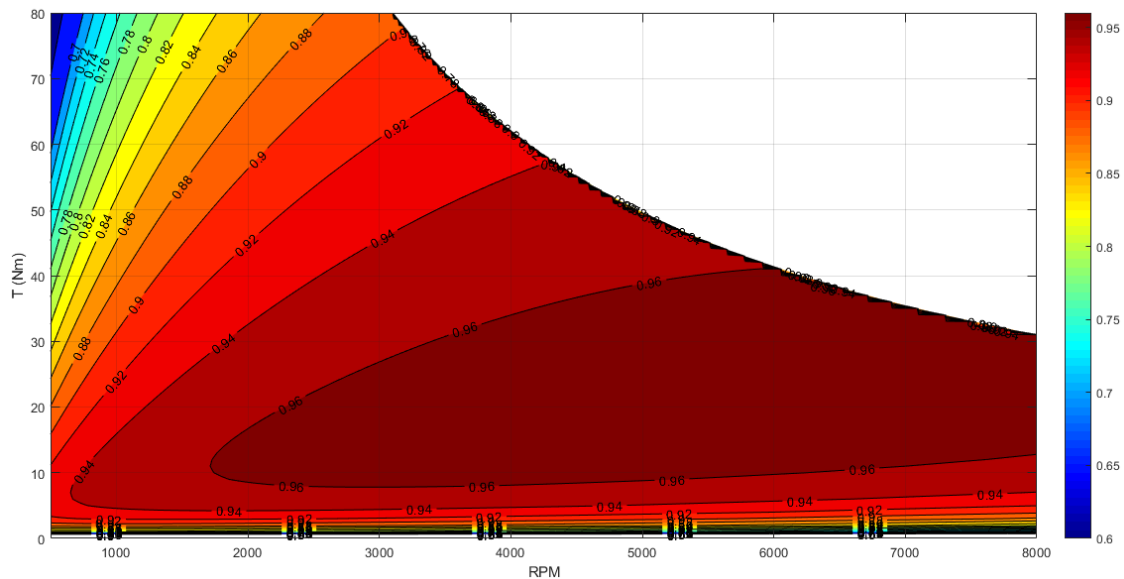
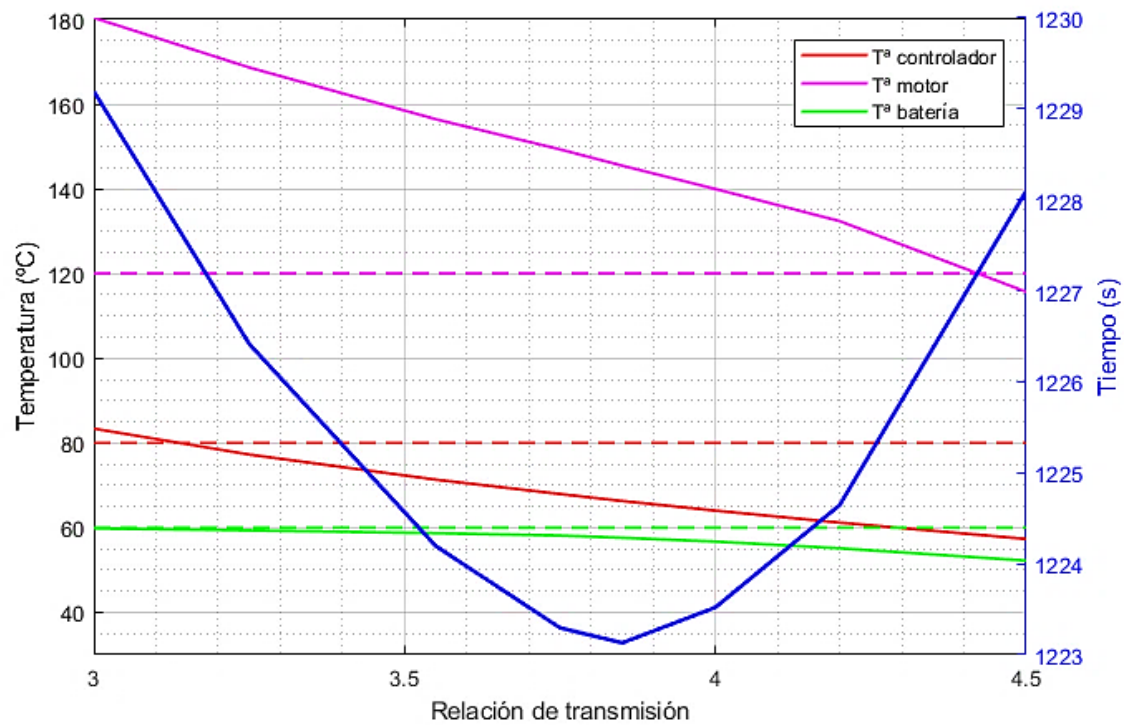
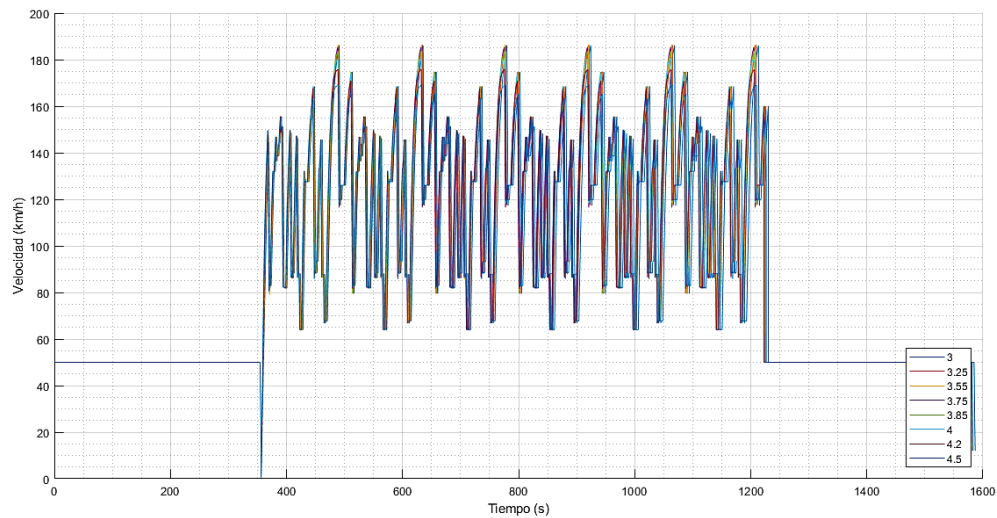


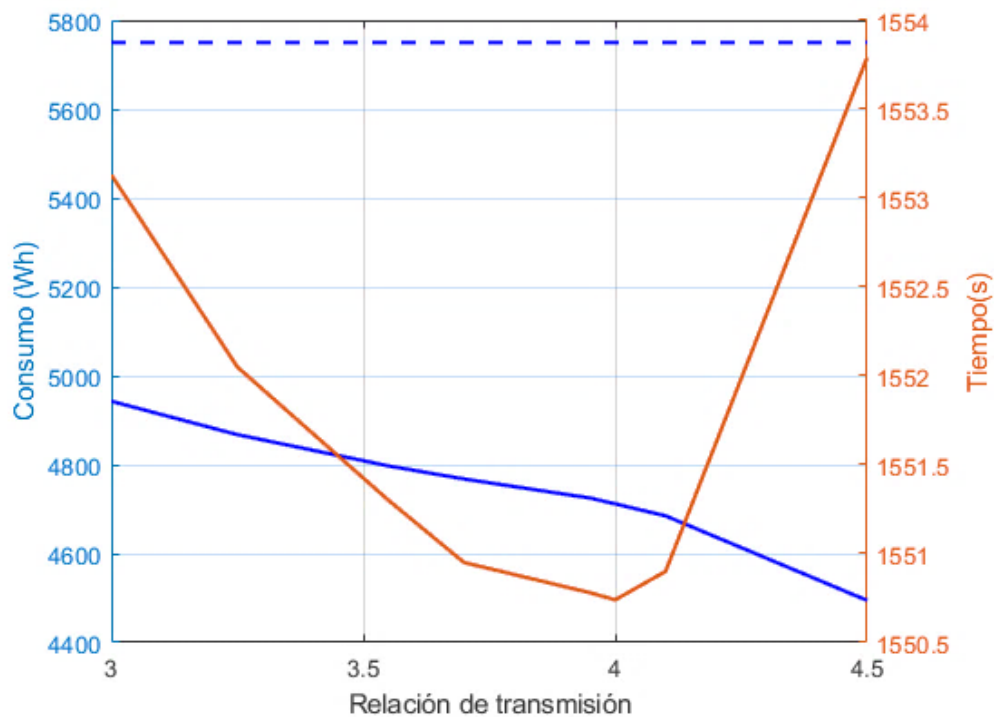
Ilustración 71 - Mapa isorendimientos para el mapa motor de 26 kW

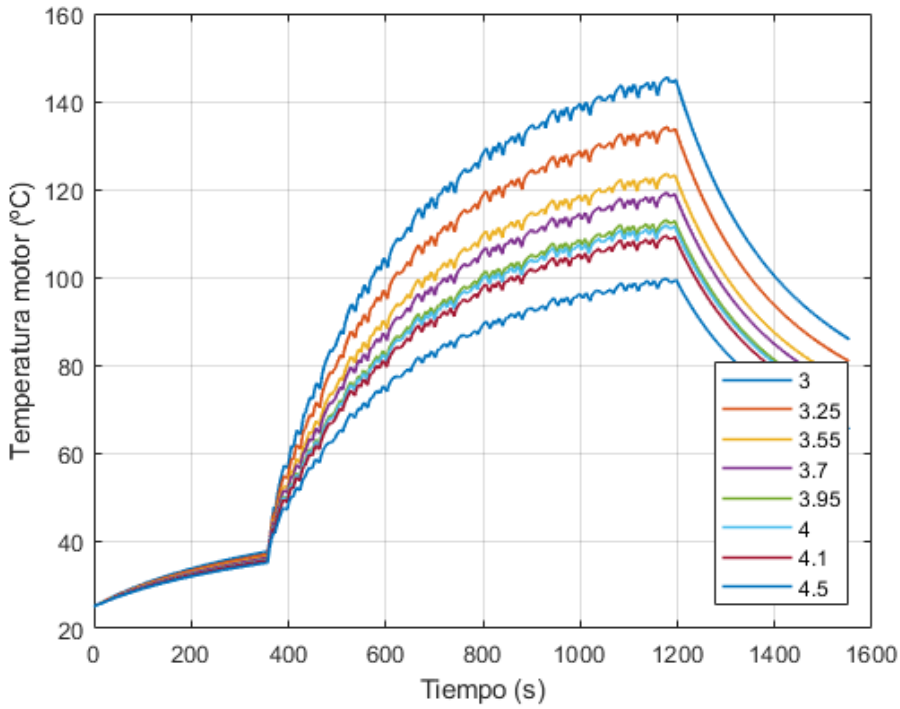
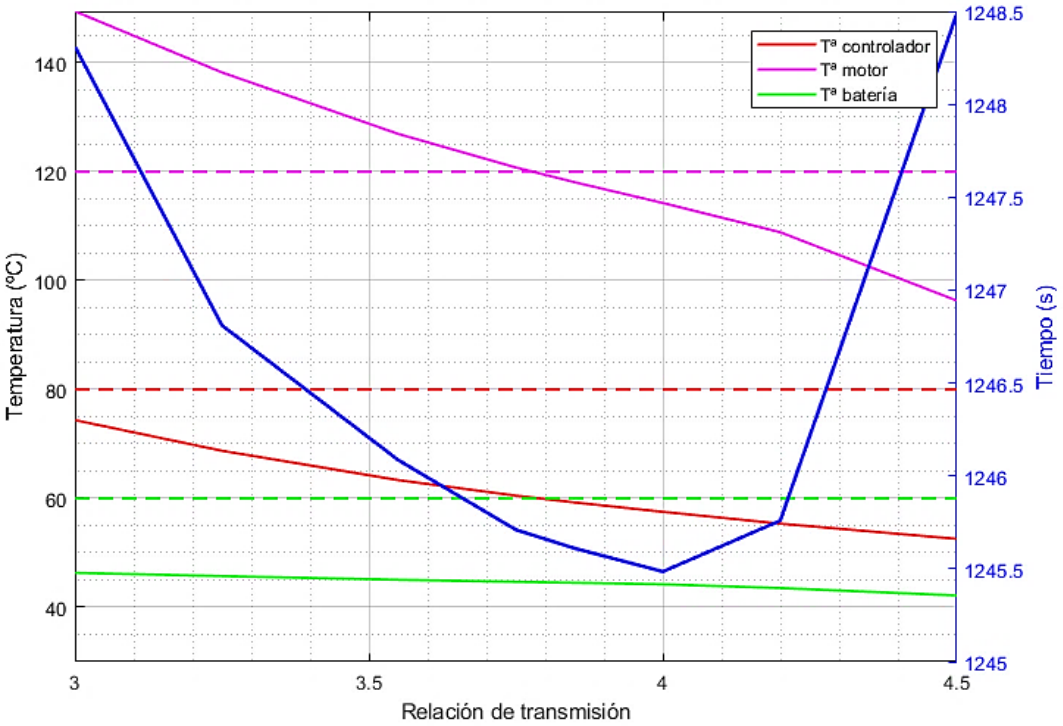
Si se observa la primera gráfica, vemos que cumple nuestra primera restricción de consumo de batería, ya que solo la de 3 de todas las relaciones de transmisión supera los 5750 Wh de consumo de energía, por lo que podría darse por válido. Sin embargo, si se observan las temperaturas de los componentes del tren motriz, el motor supera el valor límite de

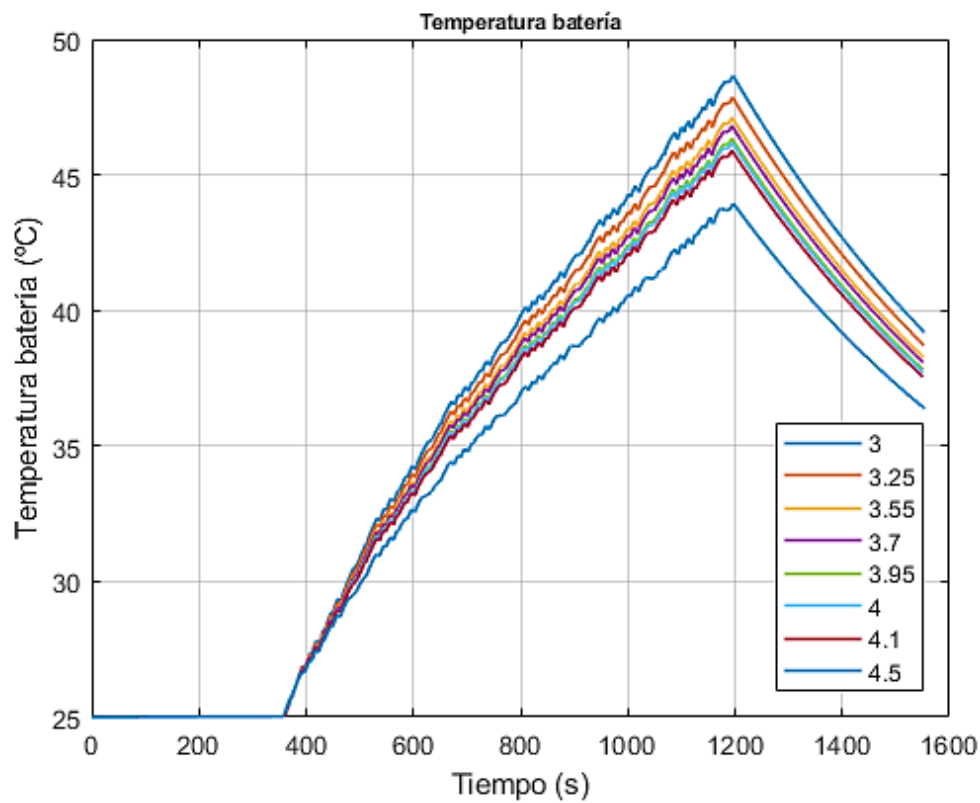
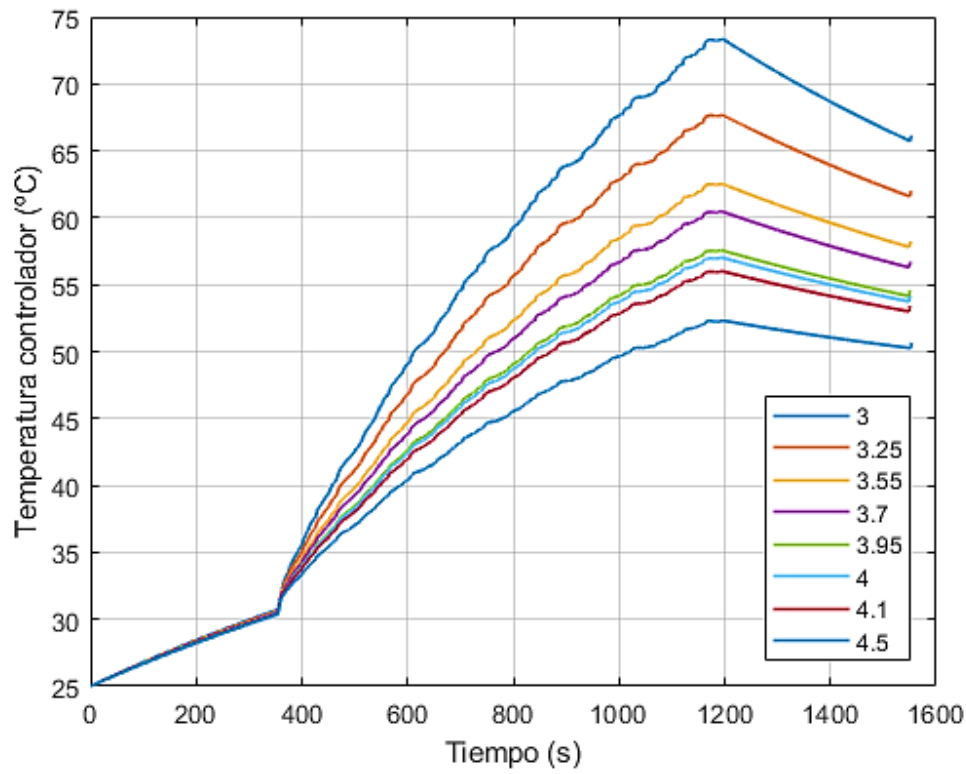
temperatura sienta este de 120°C. Por ello, se continuará reduciendo la potencia a entregar hasta disminuir su temperatura.



Reduciendo la potencia a 21 kW de potencia mecánica y ajustando el mapa motor a dicha potencia, se obtienen los siguientes resultados de consumo de batería, temperatura y velocidad máxima.







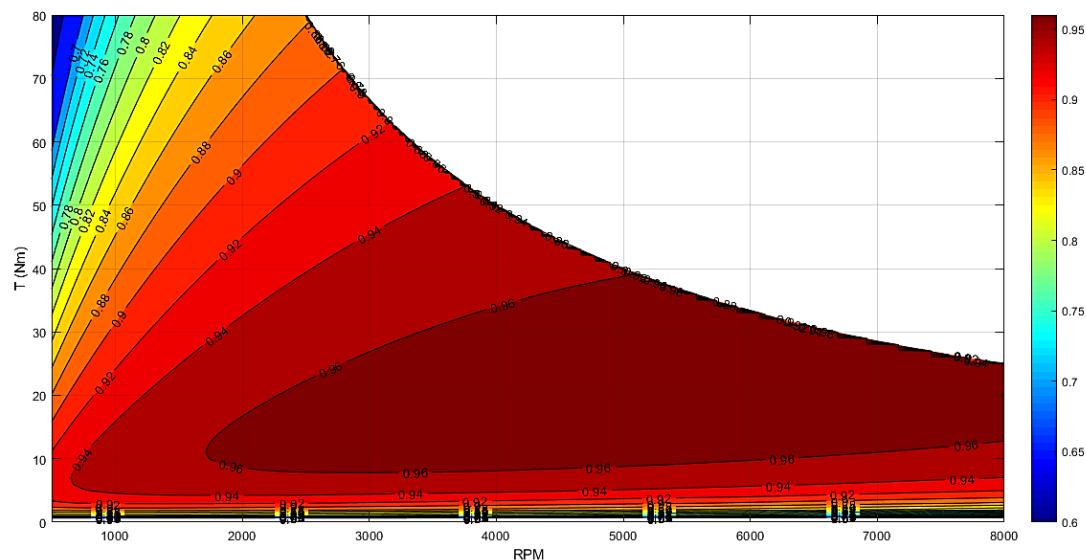
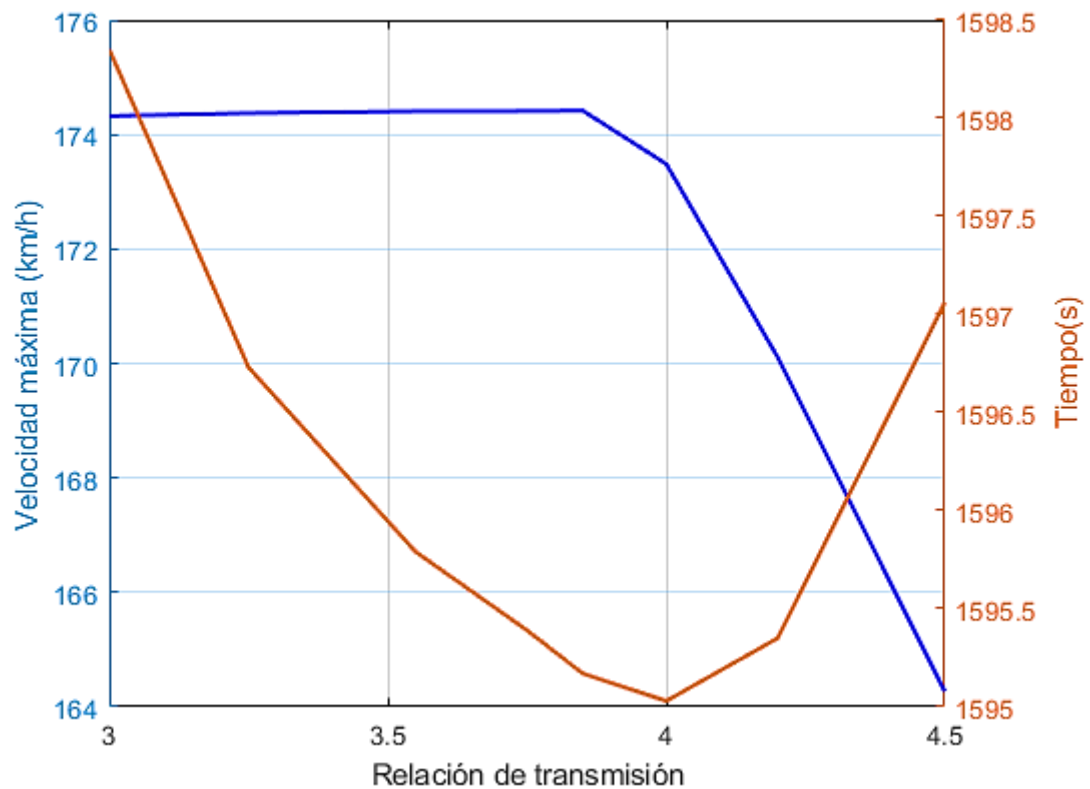


Ilustración 72 - Mapa rendimientos para el mapa usado de 21 kW

El consumo en esta es mucho menor que en el caso anterior, estando todas bastante por debajo del límite de 5750 Wh, por lo que se cumple respecto al consumo como se estimaba. Por otra parte, las temperaturas se reducen hasta encontrarse por debajo de sus respectivos límites, siendo estas $T_{motor} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{controlador} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_{batería} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con estos datos podemos dar por concluida la parte de simulación.

Cumpliendo los dos primeros requisitos, pasaremos al tercer punto, siendo este la elección de una relación de transmisión para la prueba de carrera. Observando el tiempo de carrera de cada una de las relaciones, no hay duda de que la óptima es la relación de 4, con un tiempo de 1550'75 s de carrera completa. Las temperaturas finales estimadas son de $T_{motor} = 115\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{controlador} = 57\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_{batería} = 46\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Esta relación es más corta que las de vuelta rápida por el hecho de que la potencia mecánica no es la misma. Se puede observar en la curva relación de transmisión frente al tiempo, que la curva de 26 kW es ligeramente diferente de la curva de 21 kW. Esto quiere decir, que a mayor potencia conviene una relación de transmisión más larga para que el rango de revoluciones en el que trabaja sea más constante. También influye, aunque más levemente, el hecho de que no empieza en vuelta lanzada, sino que empieza desde velocidad 0 al comienzo de la carrera.

Capítulo VI: Conclusiones



6 Conclusiones

En el presente trabajo, se ha estudiado cada parte del tren motriz, siendo estos: acumulador de energía en baterías, inversor, motor eléctrico y relación de transmisión. Por otra parte, de cada uno de estos elementos, se han estimado sus pérdidas en forma de calor y el calor refrigerado en función de la temperatura del componente, temperatura del aire y velocidad del aire utilizado en la refrigeración.

También se ha estudiado el comportamiento dinámico de una motocicleta en un circuito de velocidad, tanto en rectas como en curvas. Para este propósito, también fue necesario realizar un análisis de los circuitos en los que se participaría, obteniendo datos de otros años y cómo las particularidades de cada circuito afectan a tiempos, consumos y temperaturas.

Finalmente, se han estudiado varias relaciones de transmisión para estimar cual tiene un comportamiento óptimo, refiriéndonos a ofrecer un menor tiempo por vuelta, menor consumo de batería y no superar las temperaturas críticas de los elementos del tren motriz.

Tras tratar toda esta información, se exponen un listado de conclusiones finales:

1. Las relaciones de transmisión óptimas para cada una de las pruebas son las proporcionadas en la tabla 11.
2. Conforme la relación de transmisión se vuelve más corta, es decir, un valor de τ mayor, tanto los consumos como las temperaturas disminuyen, debido a que el motor trabaja en una zona de mejor rendimiento.
3. Los valores de tiempo por vuelta disminuyen conforme se hace esta relación más corta hasta la relación óptima, a partir de la cual, comienzan a empeorar los tiempos. Esto se debe a que el motor trabaja en la zona de altas revoluciones y disminuye la potencia que puede entregar.
4. El peso del piloto se hace muy importante en una moto ligera. Por ejemplo, en una simulación a 1 vuelta, entre 2 pilotos de 15 kg de peso de diferencia, genera en pista una diferencia de 1'8 s a favor del piloto más ligero
5. El factor humano crea las diferencias entre las simulaciones y los datos en pista, recordando que el piloto no es una máquina y comete errores
6. La importancia de una buena aerodinámica, ya que un valor alto del coeficiente aerodinámico, $C_d A$, incrementa las pérdidas de potencia impidiendo, además, tener una velocidad punta mayor.

PRUEBA	SIN VIENTO	VIENTO A FAVOR	VIENTO EN CONTRA	POTENCIA (KW)
ACELERACIÓN	6'75	6'5	7	25
VELOCIDAD MÁXIMA	4	4	3 - 5	25
CLASIFICACIÓN	3'75	3'65	3'55	25
CARRERA	4	-	-	21

Tabla 11- Resumen de relaciones de transmisión óptimas según simulación de tiempos finitos

Capítulo VII: BIBLIOGRAFÍA



7 Bibliografía

Foale, T. (1984). *Comportamiento dinámico y diseño de chasis*.

Fraile Mora, J. (2003). Máquinas eléctricas. En *Máquinas eléctricas*.

Frank P. Incropera, D. P. (1998). *Fundamentos de transferencia de calor*.

Hakewill, J. (2000). *Lap Time Simulation*.

Vera, M., Iglesias, I., Sánchez, A., & Martínez, C. (2012). *Ingeniería fluidomecánica*.

Xiao, B., Wang, G., Wang, Q., Maniruzzaman, M., & Rong, Y. (2009). *An Experimental Study of Heat Transfer During*. Worcester Polytechnic Institute.

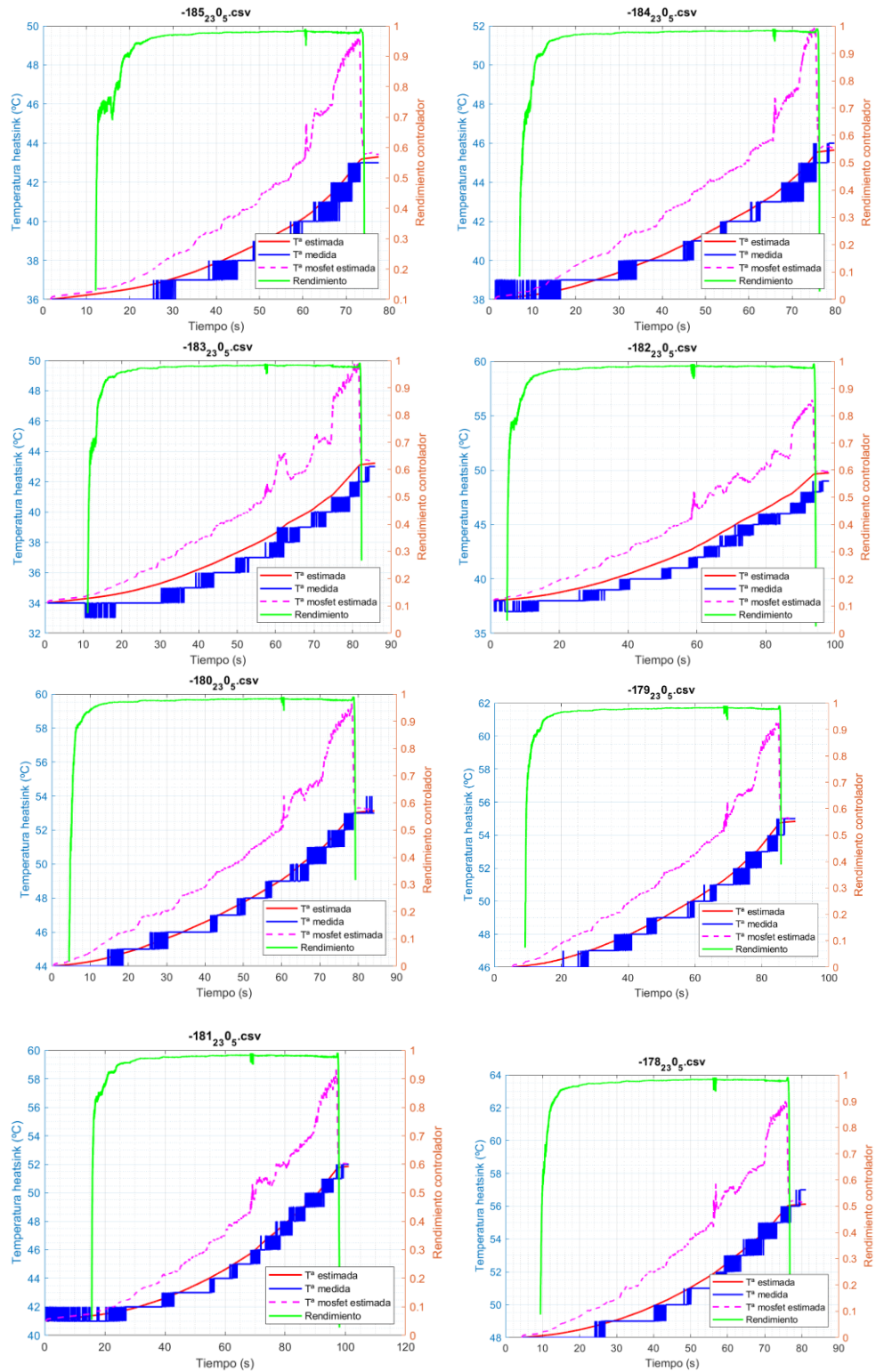
Capítulo VIII:

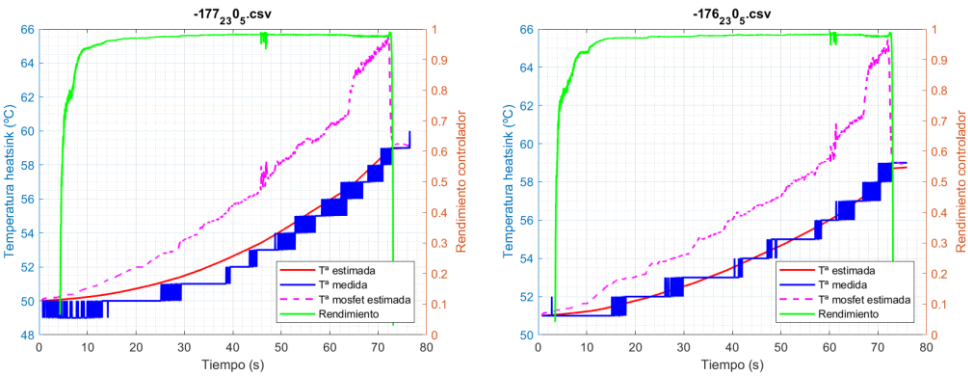
Anexos



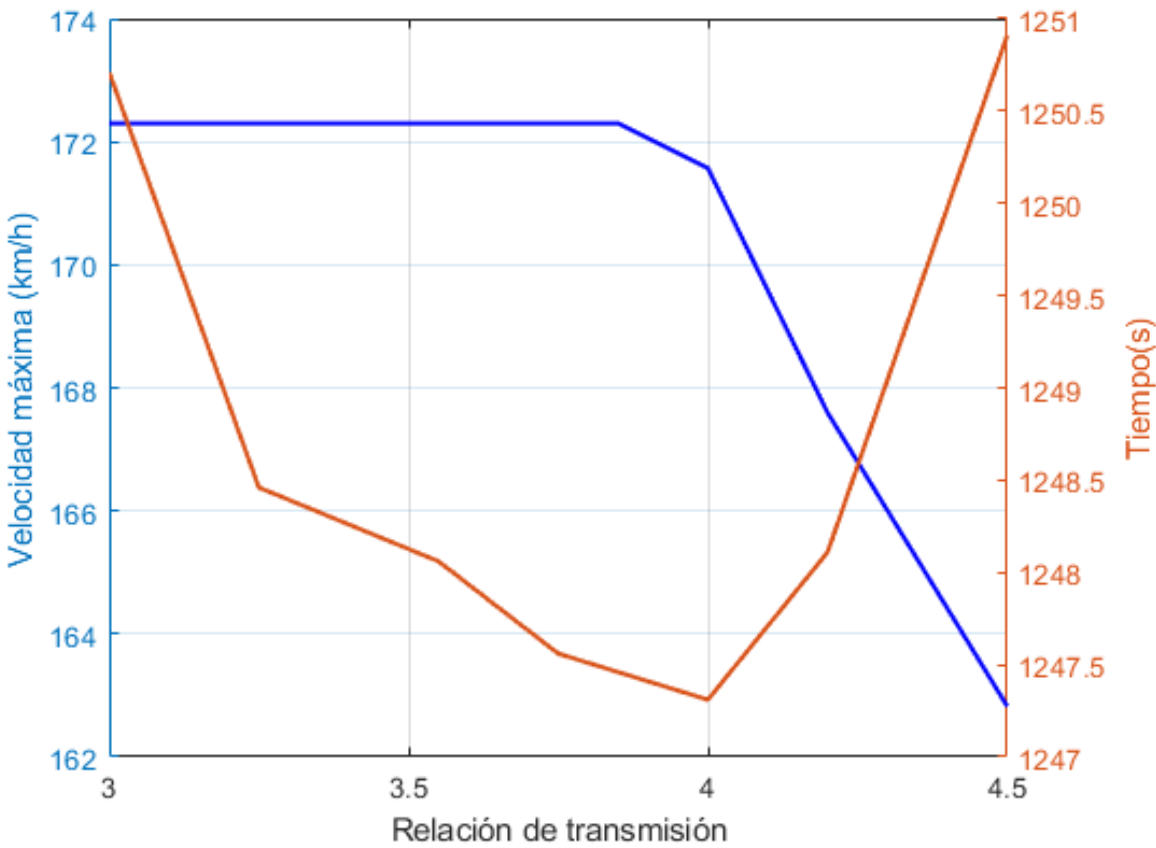
8 Anexos

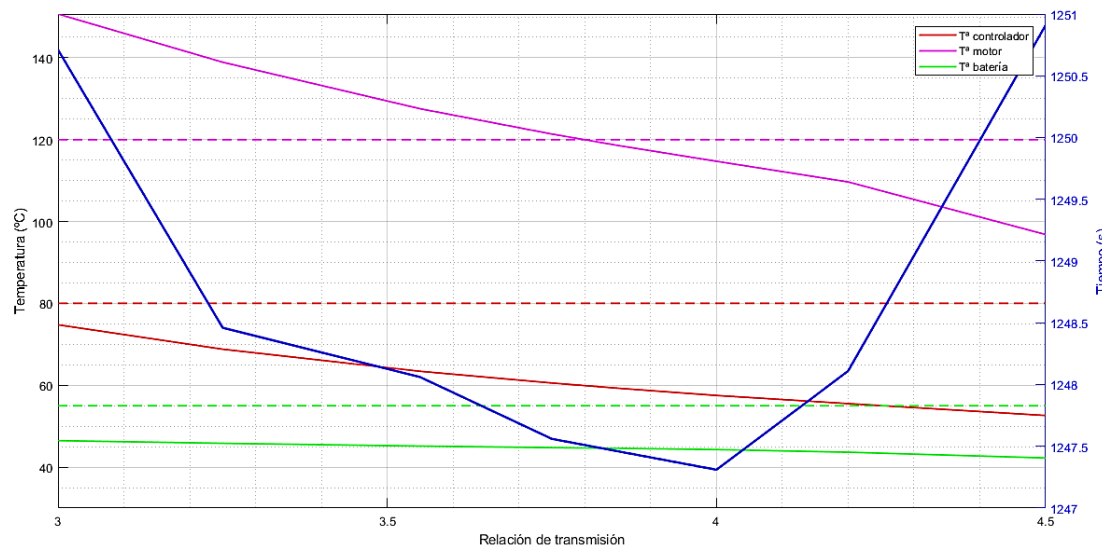
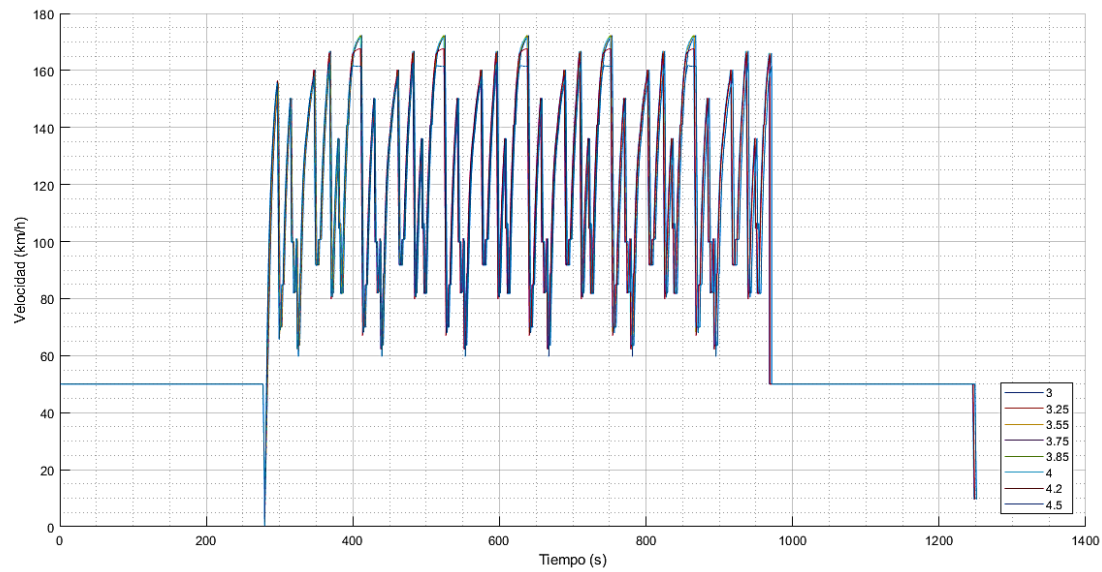
8.1 Otros ensayos del controlador

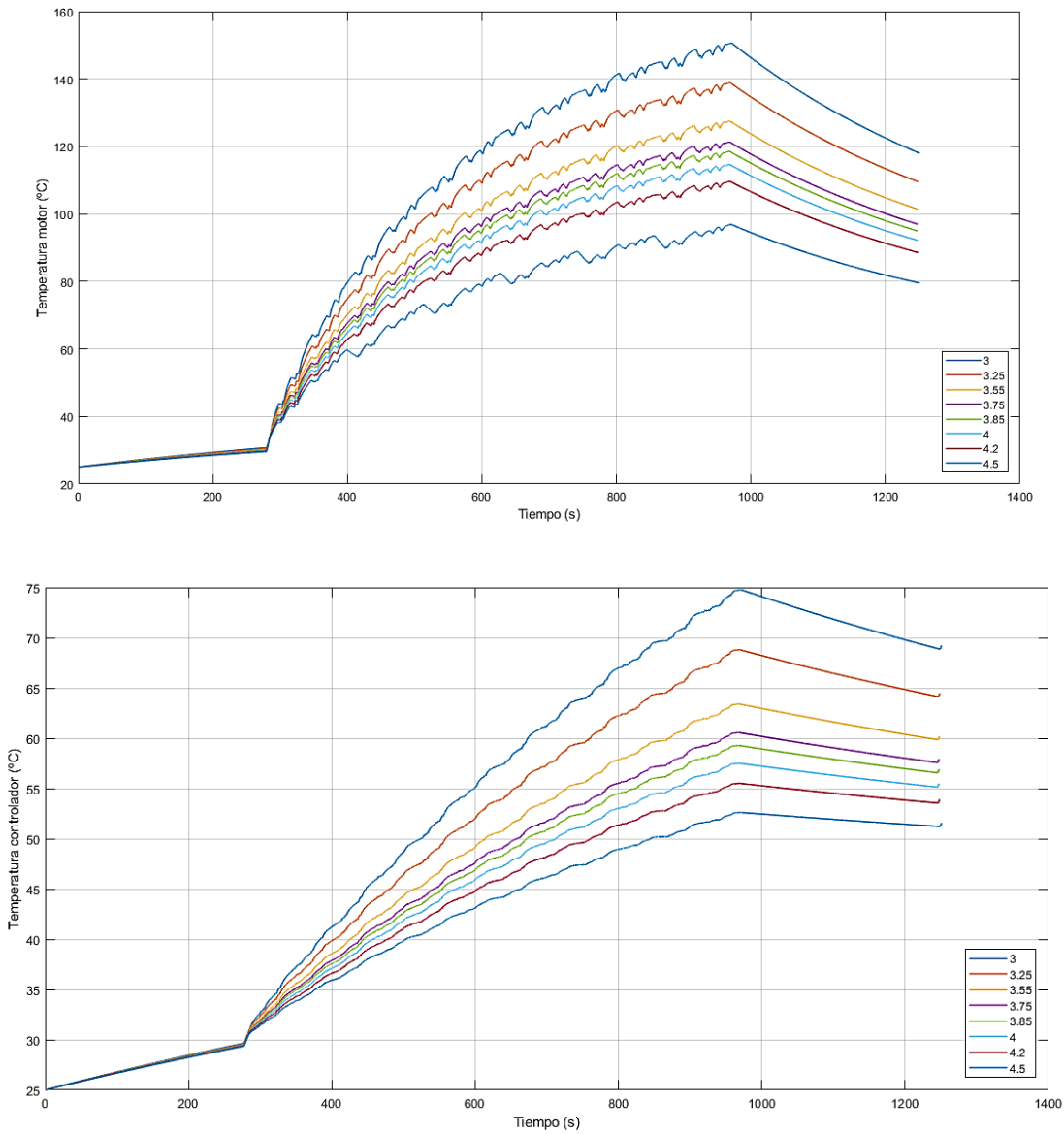


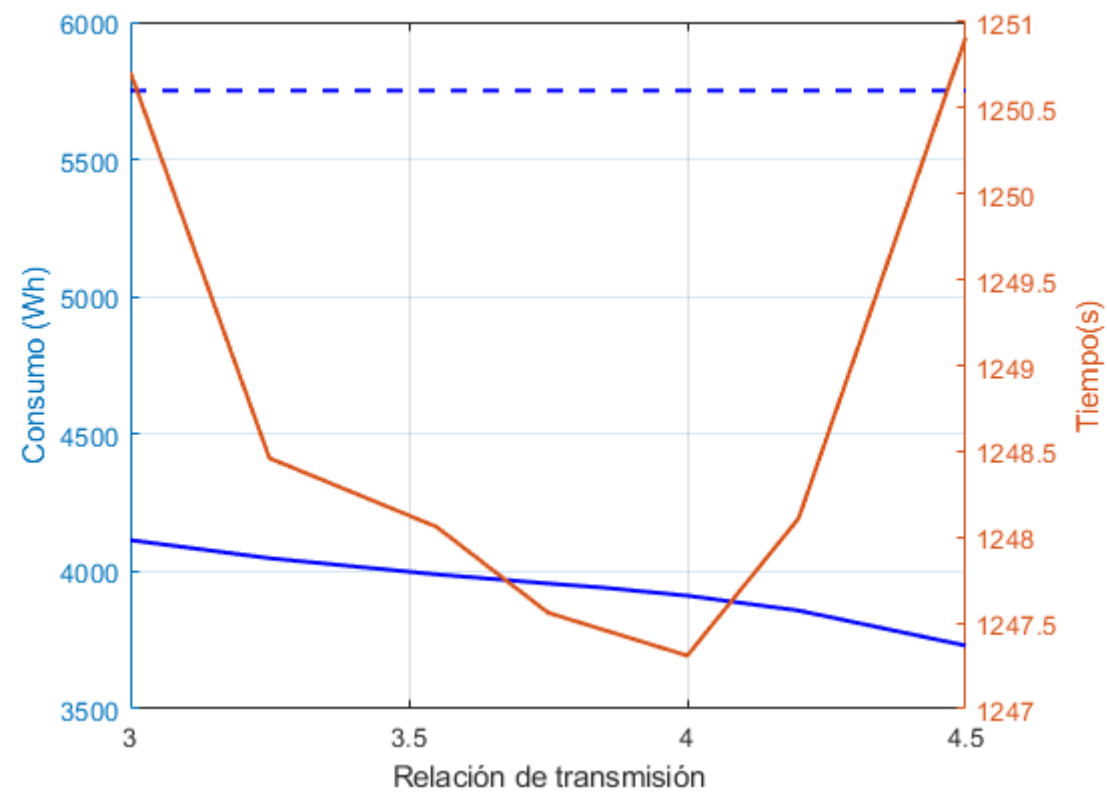
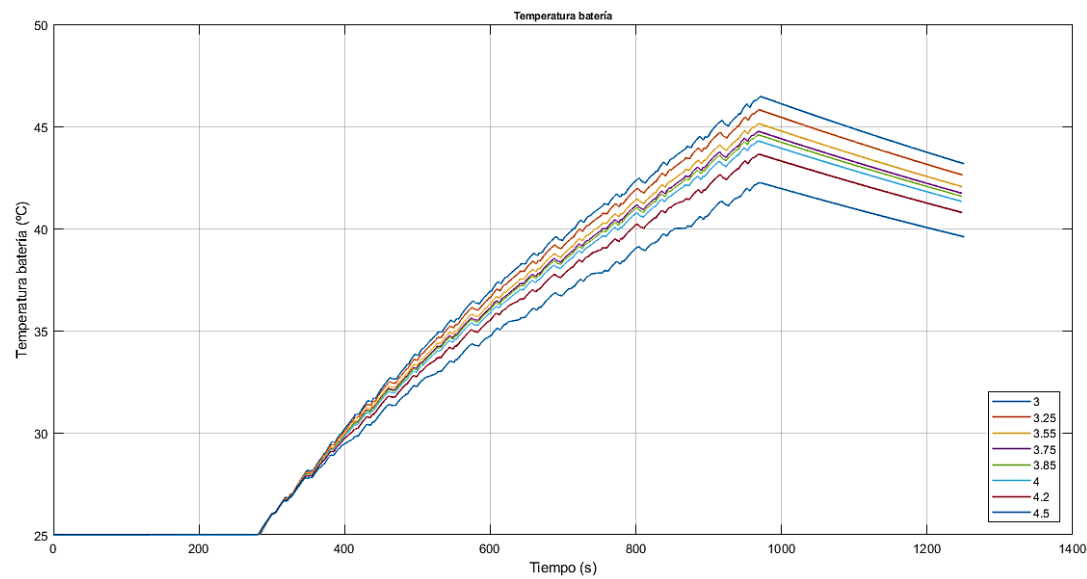


8.2 Resultados Jarama para 21 kW









8.3 Estudio de calor generado

8.3.1 Estudio basado en una geometría cilíndrica

Como primera aproximación, tomaremos que el aire pasa por un cilindro de diámetro el del motor ($D = 250 \text{ mm}$) y de ancho el de este ($L = 149 \text{ mm}$). Quedaría similar a la forma de la imagen.

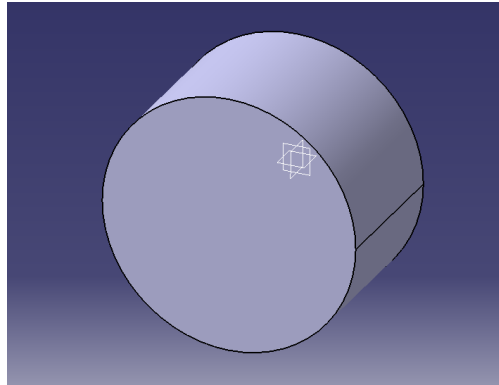


Ilustración 73 - Forma simplificada del motor como primera aproximación

En este se verá el paso del aire a través de él, las propiedades del aire y su capacidad de refrigeración, al igual que la temperatura alcanzada en el tiempo. La dirección que se supondrá el aire será la de la dirección transversal al cilindro, pasando alrededor de este. Para mayor claridad de este asunto se añadirá la siguiente imagen.

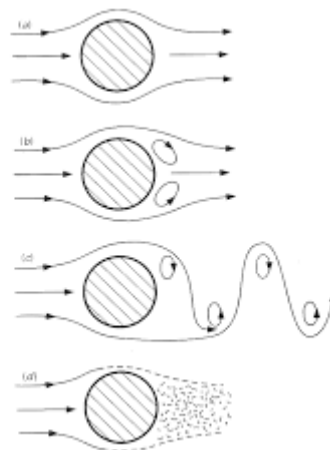


Ilustración 74 - Paso de un fluido alrededor de un cilindro

En la imagen se representa cómo pasa el fluido alrededor de un cilindro como el de nuestro estudio, a diferentes velocidades del fluido. Arriba a una velocidad más baja y abajo

una velocidad más alta. De la imagen también podemos ver que, en función de la velocidad de entrada, se desprende la capa límite o no. Ese desprendimiento va totalmente influenciado del número de Reynolds y por tanto las propiedades para refrigerar del fluido.

Con todos los datos se creará un programa en MatLab, en el cual programar las propiedades del fluido con el paso del tiempo para ver su calentamiento, según los valores de temperatura de entrada de aire, temperatura del motor, temperatura de película, número de Reynolds... y demás propiedades que influyen en este estudio. Lo realmente importante es obtener el número de Nusselt (Nu), que va directamente ligado con el factor de convección, h .

Para realizar este estudio, se ha partido de propiedades de tablas de aire a presión atmosférica a diferentes temperaturas. Con esos datos, se ha obtenido una ecuación que represente la variación de esas propiedades con la temperatura. Así, en el caso de tener una temperatura en concreto, se tendrá el valor correcto de esa propiedad para ese momento en concreto, en vez de un número o una suposición media.

En el caso de la variable de Prandtl, se han graficado sus datos en Excel, se ha incluido su línea de tendencia, siendo esta de tercer grado. Con un alto grado podemos asegurarnos una buena aproximación a los valores, pero tampoco será necesario más de un grado 3, ya que no aporta más información. Se ha analizado su variación de temperatura porque se analizará los valores de Pr y Pr_s . El primero de ellos se refiere a la temperatura del aire. El segundo se refiere a la temperatura sobre la superficie del motor, la cual tendrá un valor distinto al primero. Como ambas temperaturas son distintas y variarán con el tiempo, es importante poder obtener sus valores en cada rango de tiempo.

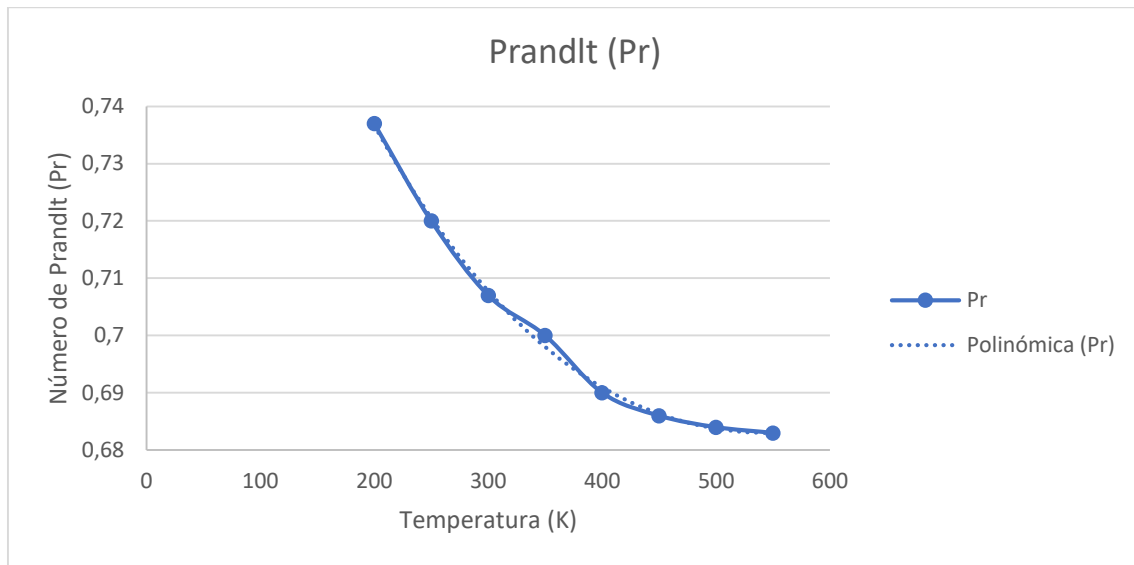


Ilustración 75 - Gráfica de la variación de Pr con la temperatura a presión atmosférica

Otra propiedad que se considerará que variará con la temperatura, es el parámetro de conductividad térmica (k), que tiene unas unidades de $W/m \text{ K}$. Este valor se analizará a temperatura de película, por ello, conforme se caliente el motor, irá cambiando. Su gráfica ha sido obtenida como la anterior.

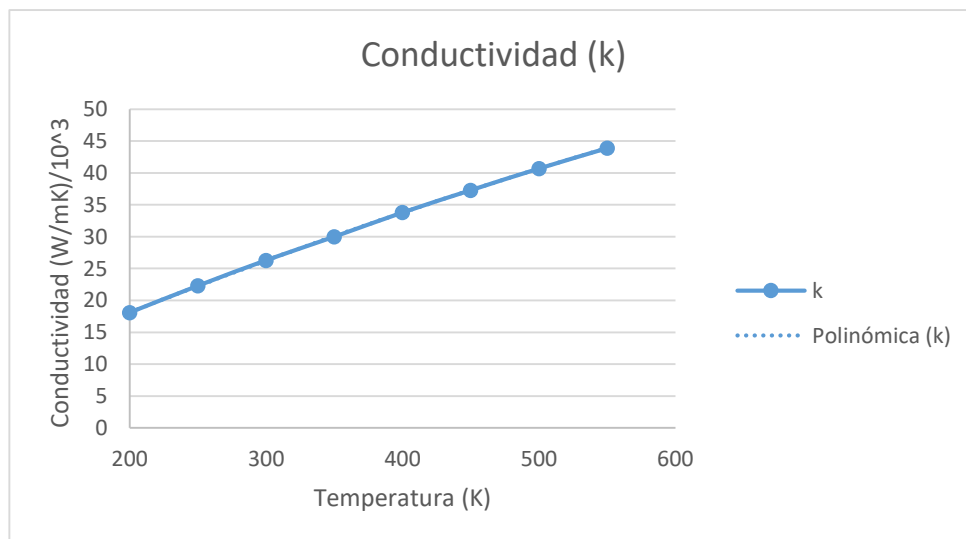


Ilustración 76 - Conductividad térmica (k) respecto a la temperatura a presión atmosférica

Hay que tener en cuenta que los valores obtenidos y su ecuación representativa, habrán de ser multiplicada por 10^{-3} , debido a que, al ser valores pequeños, sus valores en la gráfica están multiplicados por 10^3 .

Por otra parte, aunque se podría considerar constante, se considerará variable el calor específico del aluminio y el cobre que está compuesto el motor. La manera en la que se han conseguido su variación respecto de la temperatura es la misma de la anterior, con una gráfica y línea de tendencia en Excel.

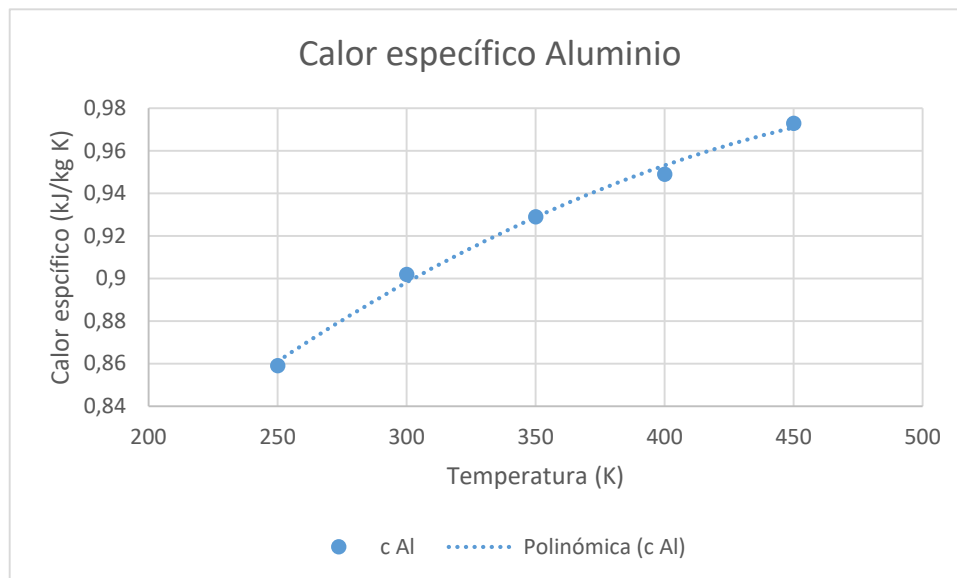


Ilustración 77 - Variación del calor específico del aluminio respecto de la temperatura

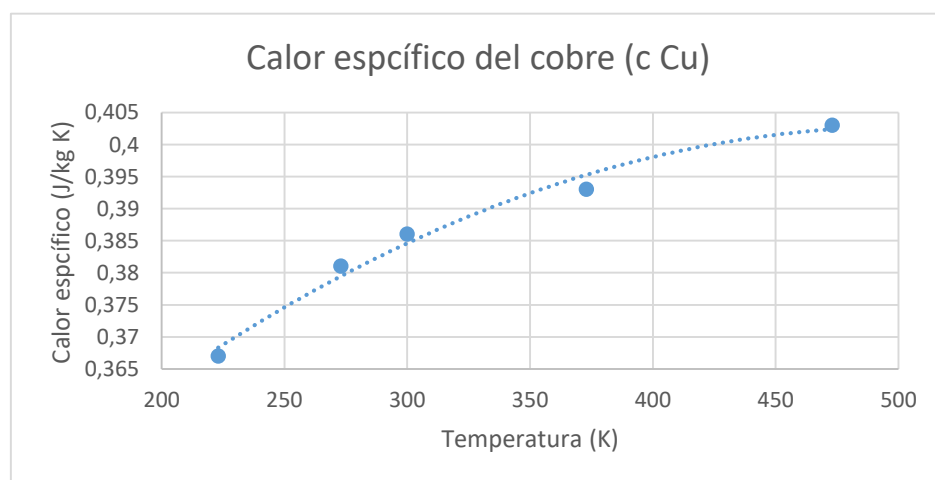


Ilustración 78 - Variación del calor específico del cobre respecto de la temperatura

Al contrario que en el caso anterior, estas ecuaciones habrá que multiplicarlas por 10^3 , debido a que se representan en las unidades de $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ en vez de $\text{J/kg} \cdot \text{K}$, que serán las unidades utilizadas.

Después de la linealización de esos parámetros, nos meteremos en la descripción del Matlab con el cual se realizarán los cálculos.

Como parámetros conocidos se considerarán los siguientes:

Parámetro	Valor
<i>Calor específico del hierro (c_{Fe})</i>	440 kJ/ kg K
<i>Masa de cobre</i>	5 kg
<i>Masa de hierro</i>	9'5 kg
<i>Masa de aluminio</i>	6'9 kg
<i>Temperatura del aire</i>	20°C
<i>Temperatura del motor (inicial)</i>	20°C
<i>Velocidad del viento de entrada</i>	-
<i>Diámetro del cilindro</i>	0'25 m
<i>Área de contacto cilíndrica</i>	0'3819 m^2
<i>Área de contacto plana</i>	0'1351 m^2
<i>Potencia de entrada</i>	-
<i>Rendimiento</i>	-
<i>Paso de tiempo</i>	-
<i>Viscosidad dinámica (ν)</i>	15'27 ($\cdot 10^{-6}$)

Tabla 12 - Parámetros estimados del motor

Para los valores que tienen un guion, son parámetros que se irán modificando según la simulación, pero que sin ellos no se podrán obtener resultados.

En el programa se realizará una serie de ciclos, los cuales se repetirán para un paso de tiempo dado, calculando los nuevos datos. Con esto se busca calcular el incremento de temperatura del motor, considerando ese paso de tiempo como un estado estable, ver cuánto calor se ha generado en ese paso de tiempo, cuanto es posible refrigerar y cuantos grados se incrementa por la diferencia entre esos dos calores.

Antes de iniciar el ciclo se realizan unos cálculos iniciales los cuales no se consideran que cambian con el tiempo:

- Valor del número de Reynolds (Re).
- Calor generado como la $(1 - \eta) \cdot P$, siendo P la potencia eléctrica de entrada y η el rendimiento.

El ciclo que sigue es el siguiente, el cual empezamos con los pasos seguidos para la zona **cilíndrica**:

1. Calcular la temperatura de película, siendo esta la media entre la temperatura del aire de entrada (valor de la tabla) y temperatura del motor en esa iteración, que en la primera será el valor de la tabla.
2. Calcular Pr y Prs con las ecuaciones linealizadas, explicadas anteriormente.
3. Según el Re, escoge los parámetros m y C de la tabla de Zhukauskas.
4. Calcula el Nusselt (Nu) con la ecuación de Zhukauskas para un cilindro.
5. Calcula el coeficiente de conductividad térmica (k) según la ecuación anterior con la temperatura de película.

Calcula el coeficiente de convección, h, con la ecuación:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{D}$$

6. Calor refrigerado como $Q_{r,cilindro} = h \cdot \text{Área} \cdot (Temperatura_{motor} - Temperatura_{aire})$

A través de estos pasos se ha obtenido el calor refrigerado para la zona cilíndrica, pasamos ahora a calcular las caras **planas**:

1. Calcular la temperatura de película, siendo esta la media entre la temperatura del aire de entrada (valor de la tabla) y temperatura del motor en esa iteración, que en la primera será el valor de la tabla.
2. Calcular Pr con la ecuación linealizada, explicadas anteriormente.
3. Según el Re se sabrá si está en régimen laminar, turbulenta o mixta, y en función de esto, escogerá su correspondiente ecuación.
4. Calcular el Nusselt (Nu) con la ecuación de placa plana según valor de Re.
5. Calcular el coeficiente de conductividad térmica (k) según la ecuación anterior con la temperatura de película.

Calcular el coeficiente de convección, h, con la ecuación:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{D}$$

6. Calor refrigerado como $Q_{r \text{ plana}} = h \cdot \text{Área} \cdot (T_{\text{motor}} - T_{\text{aire}})$

Después de obtener los calores que se refrigera en cada una de las zonas de interés, se pasará a obtener la temperatura tras este paso de tiempo o iteración.

7. Calor almacenado como la diferencia entre calor generado y calor refrigerado, en unidades de calor dividido por tiempo (W/s).
8. Multiplicación del calor almacenado por el paso de tiempo, para obtener el calor total almacenado en ese periodo de tiempo.
9. Se obtendrá el calor específico para la temperatura del motor anterior, tanto del cobre como para el aluminio, siendo estos los introducidos en el cálculo de la temperatura nueva del motor.
10. Obtención de la temperatura del motor, siendo esta la división del calor almacenado en ese periodo de tiempo entre el calor específico del motor.

$$T_{\text{motor}, i} = T_{\text{motor}, i-1} + \frac{Q_{\text{almacenado}}}{(c_{Cu} \cdot m_{Cu}) + (c_{Fe} \cdot m_{Fe}) + (c_{Al} \cdot m_{Al})}$$

Tras estos diez pasos, se consigue la temperatura tras el paso de tiempo establecido. Después, vuelve a empezar con la temperatura de entrada del motor la obtenida en el último paso. Ahora calcula de nuevo la temperatura de película, la cual cambiará, y, con ella, todos los

parámetros referidos a esta temperatura. Así se irá obteniendo el calentamiento del motor hasta el término del ciclo.

8.3.2 Estudio basado en la geometría real con ANSYS

Para el estudio con AnsysFluent solo se realizará la malla 2D de la zona “cilíndrica”. Esto se hará debido a que las aletas provocan una variación de la estela del fluido y no pasará por esa zona como en un cilindro, como el estudiado anteriormente. También se realizará en 2D para ahorrar coste computacional, porque con una malla 3D se podría llegar a los 3 millones de nodos y el conseguir una estimación del calor sería inviable.

Esta malla, en definitiva, seguirá los pasos de la anterior malla, es decir, se realizará una malla fina alrededor de la zona del motor, para obtener unos datos precisos del movimiento del aire. Por el contrario, la zona alejada del motor, debido a que no habrá gradientes de velocidades/presión/temperatura se realizará una malla más “basta”.

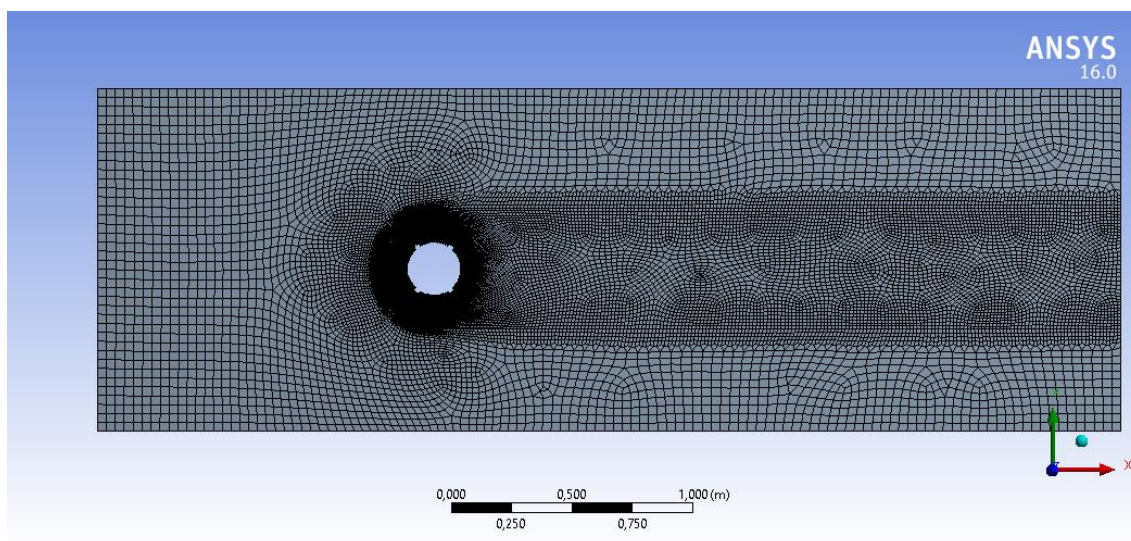


Ilustración 79 - Vista general de la malla 2D realizada del motor en ANSYS

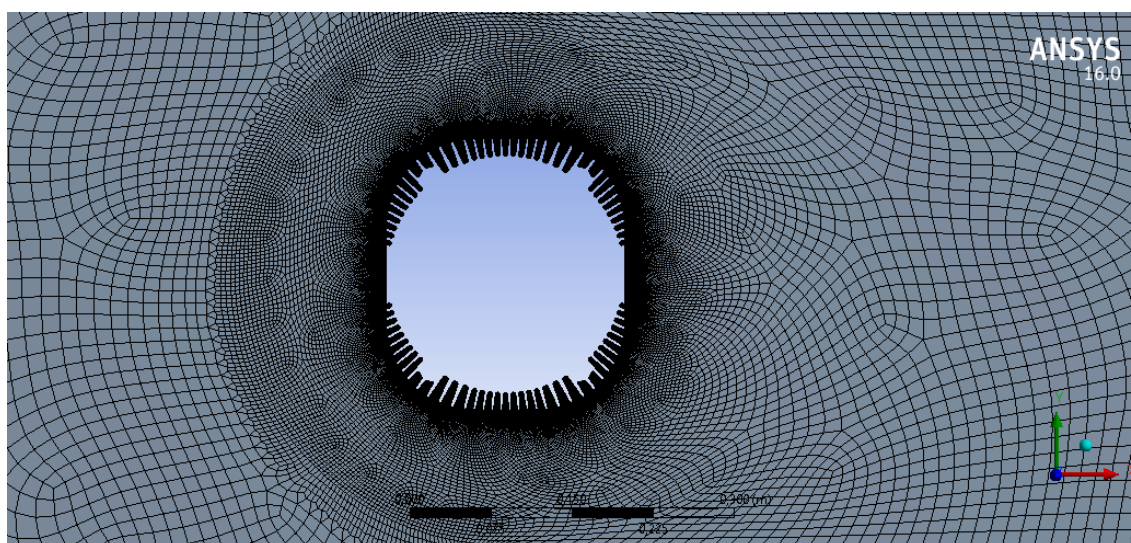


Ilustración 80 - Vista localizada de la malla 2D realizada del motor en ANSYS

Condiciones de contorno y modelo escogido para transferencia de calor:

La temperatura del motor será un parámetro cambiante, el cual, a diferentes temperaturas, obtendremos el calor evacuado para una misma velocidad de aire. Con esto, obtendremos una gráfica de calor refrigerado – temperatura como las anteriores gráficas, pero con distinta pendiente. Se analizará esa pendiente y se hará un programa MatLab igual que el presentado en el caso del cilindro, pero incluyendo un parámetro que será esa diferencia de pendientes en cuanto a refrigeración. Con ello se espera conseguir un resultado más fino de la refrigeración del motor.

Como otras condiciones impuestas son el no deslizamiento en las paredes del motor y temperatura constante en el motor, el cual, nos dará el calor evacuado a esa temperatura con las condiciones anteriormente citadas.

En cuanto al modelo utilizado, es el k- ω SST, por el mismo motivo descrito en la anterior simulación. Además, se tendrá activada la ecuación de la energía, para poder tener en cuenta la transferencia de calor.

Los resultados que se han obtenido de las diferentes simulaciones se muestran en la siguiente tabla:

ANSYS transitorio							
T aire= 293 K	T motor (K)	413	373	350	330	310	300
v aire= 10 m/s	Heat (W/m)	5896,1	3989,6	2854,4	1847,9	841,4	346,9
	Calor refri (W)	884,415	598,44	428,16	277,185	126,21	52,035

ANSYS transitorio							
T aire= 293 K	T motor (K)	413	373	350	330	310	300
v aire= 20 m/s	Heat (W/m)	9693,1	6434	4617,3	3005,9	1368,2	563,3
	Calor refri (W)	1453,965	965,1	692,595	450,885	205,23	84,495

Tabla 13 - Datos obtenidos para distintas simulaciones de calor evacuado en ANSYS

Hay que mencionar que el criterio de que la simulación tiene una convergencia apropiada hará que los residuales menores a 10^{-4} . También, se comprobó que la masa de entrada y salida son iguales, debido a la condición de *outflow*.

8.3.3 Comparación entre los dos estudios de refrigeración

Para obtener la diferencia de las rectas de calor refrigerado frente a temperatura, se ha introducido en Excel los valores de temperatura y calor extraídos de Ansys, y también los resultados obtenidos en MatLab con las mismas condiciones.

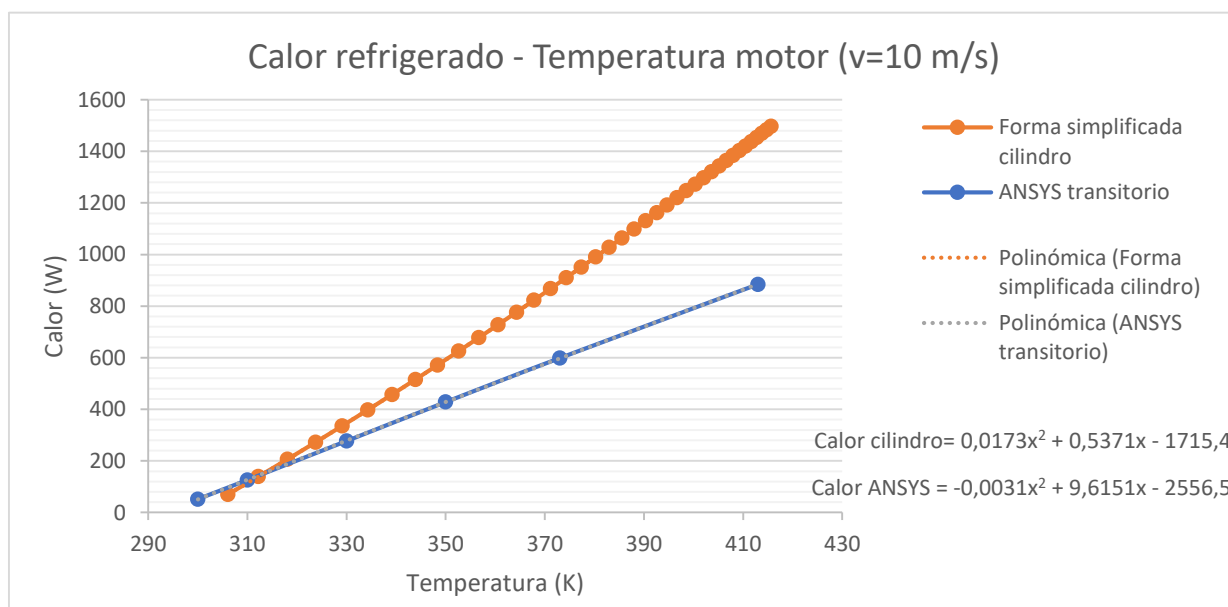
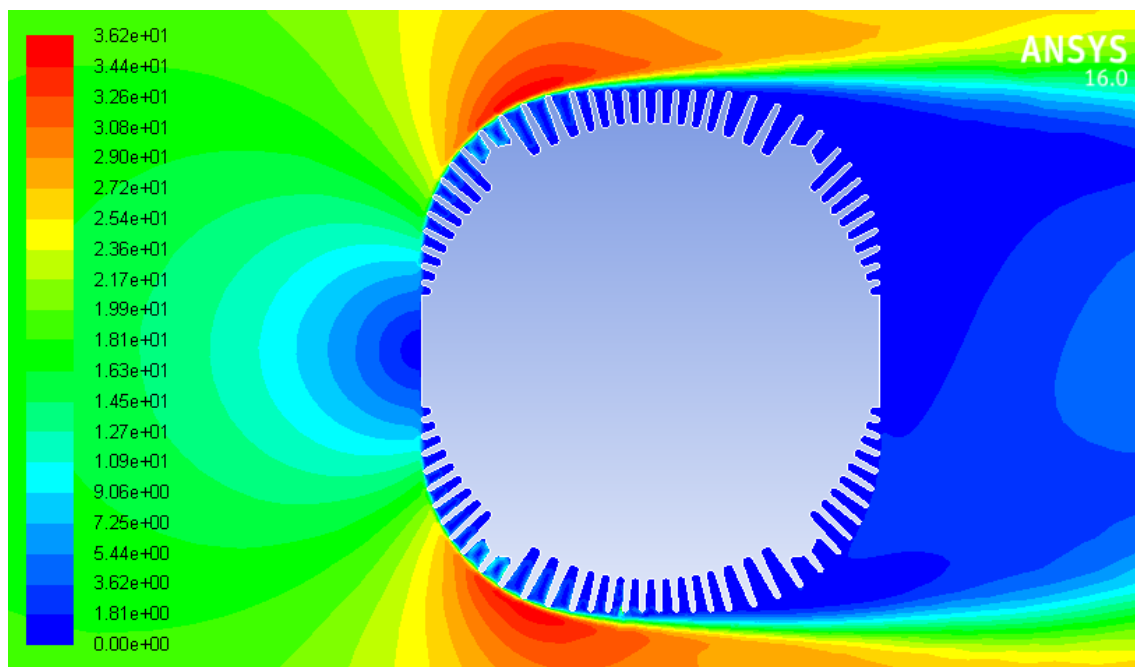
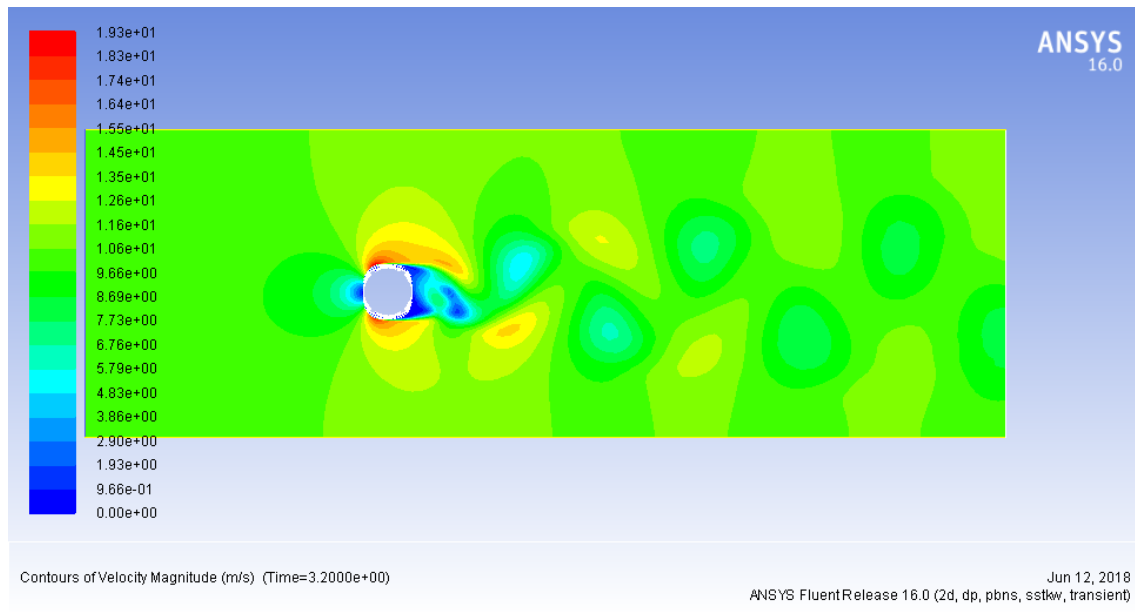
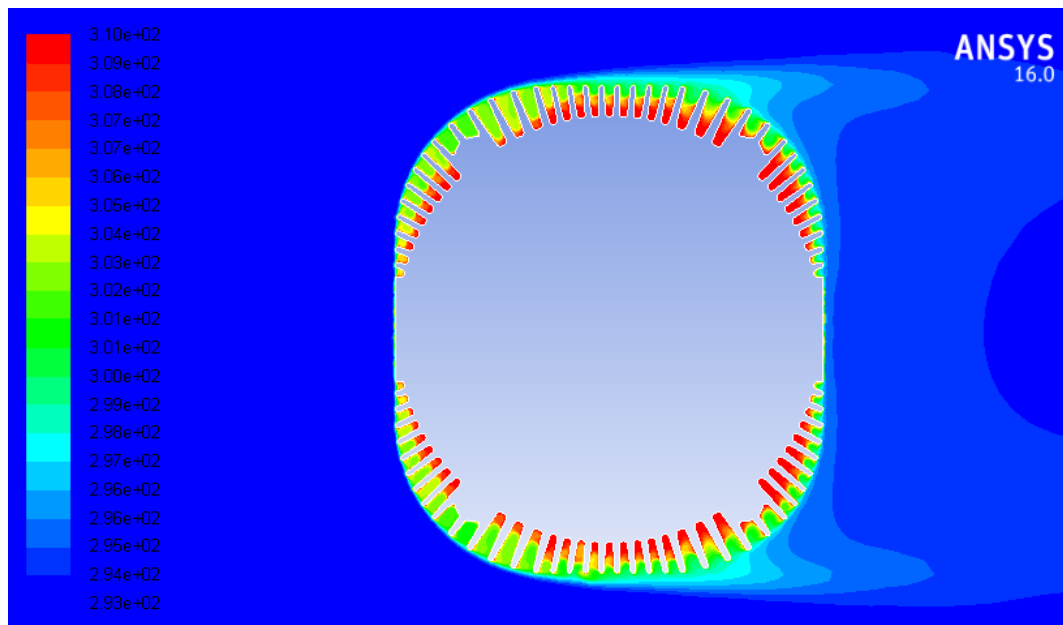


Ilustración 81 - Calor refrigerado como cilindro usando ecuaciones experimentales y calor refrigerado usando simulaciones de ANSYS para la forma del motor

Como se puede observar, a valores pequeños de temperatura son ambas similares, pero con el aumento de temperatura comienzan a divergir. Esto se debe a la estela que forma, siendo mayor la del motor real que la del caso de un cilindro. Al ser mayor, la velocidad del aire es menor y disminuye el coeficiente de convección local, disminuyendo por consiguiente la refrigeración.





Para poder obtener un código en MatLab con los resultados obtenidos en Ansys, se procederá a dividir los calores refrigerados en el caso de MatLab como cilindro y el caso de Ansys. Con esto se puede obtener como varía el coeficiente h con la diferencia de temperaturas entre el fluido y el motor.

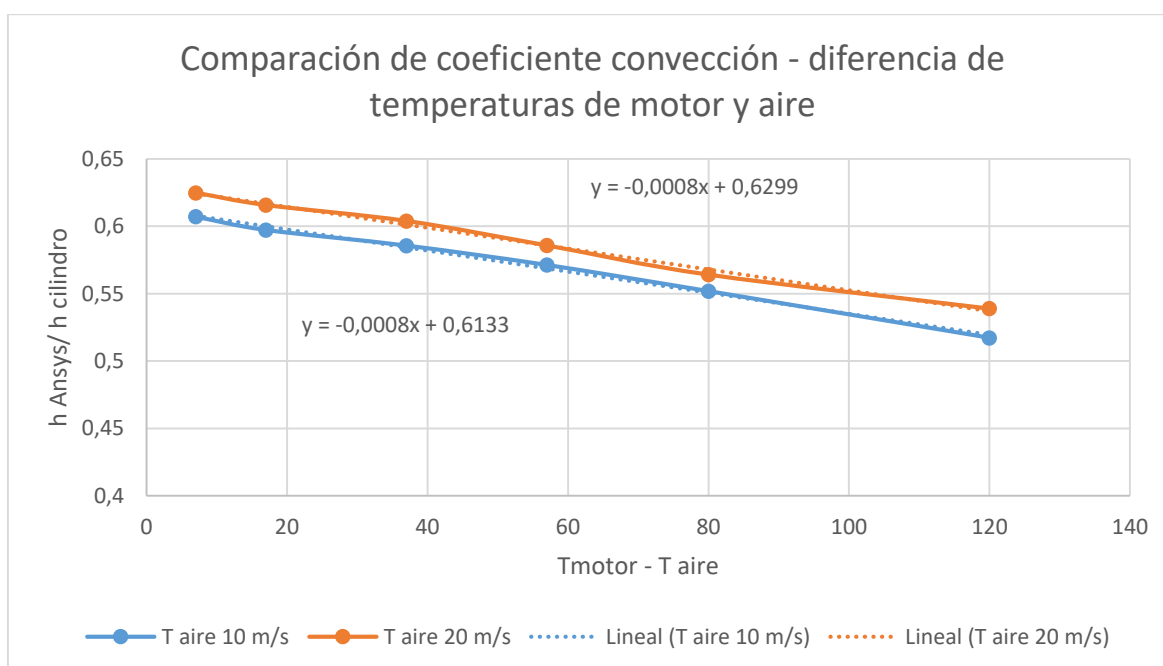


Ilustración 82 - Relación del coeficiente de convección obtenido con ANSYS y geometría del motor respecto del coeficiente obtenido como cilindro, comparado a la diferencia de temperaturas entre el motor y el aire.

También se puede ver como en el caso de 10 m/s y el de 20 m/s no hay apenas cambios en la pendiente, pero si en la constante que los acompaña al linealizar los puntos. Aunque se podría despreciar, se tendrá en cuenta el cambio de esa constante, suponiendo una variación lineal.

Por tanto, se tendrá un factor “f” que definirá esa variación del coeficiente de convección entre un cilindro y el caso de nuestro motor. Esa modificación será la única introducida a la ecuación del calor refrigerado anteriormente expuesta.

$$Q_{refrigerado} = h \cdot A \cdot (T_{motor} - T_{aire})$$

Pasará a ser:

$$Q_{refrigerado} = f \cdot h \cdot A \cdot (T_{motor} - T_{aire})$$

La cual, el valor f, tendrá una forma tal que:

$$f = -0'0008 \cdot (T_{motor} - T_{aire}) + 0'0017 \cdot V_{aire} + 0,5967$$

Siendo:

- T_{motor} la temperatura del motor.
- T_{aire} la temperatura del aire.
- V_{aire} la velocidad del aire de entrada.

8.4 Tablas y Datasheet

Se mostrarán en las siguientes páginas los datos y datasheet utilizados siendo estos:

- Datasheet de transistores de potencia de tipo MOSFET
- Datasheet del motor
- Datos del circuito de Motorland
- Peraltes en el circuito del Jarama

OptiMOS™ 3 Power-Transistor

Features

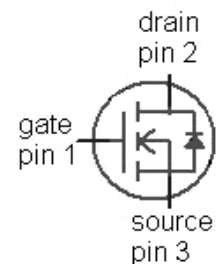
- N-channel, normal level
- Excellent gate charge x $R_{DS(on)}$ product (FOM)
- Very low on-resistance $R_{DS(on)}$
- 175 °C operating temperature
- Pb-free lead plating; RoHS compliant
- Qualified according to JEDEC¹⁾ for target application
- Ideal for high-frequency switching and synchronous rectification
- Halogen-free according to IEC61249-2-21

Product Summary

V_{DS}	150	V
$R_{DS(on),max}$ (TO263)	7.2	mΩ
I_D	100	A



Type	IPB072N15N3 G	IPP075N15N3 G	IPI075N15N3 G
Package	PG-TO263-3	PG-TO220-3	PG-TO262-3
Marking	072N15N	075N15N	075N15N



Maximum ratings, at $T_j=25\text{ °C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Conditions	Value	Unit
Continuous drain current	I_D	$T_C=25\text{ °C}$	100	A
		$T_C=100\text{ °C}$	93	
Pulsed drain current ²⁾	$I_{D,pulse}$	$T_C=25\text{ °C}$	400	
Avalanche energy, single pulse	E_{AS}	$I_D=100\text{ A}$, $R_{GS}=25\text{ Ω}$	780	mJ
Reverse diode dv/dt	dv/dt	$I_D=100\text{ A}$, $V_{DS}=120\text{ V}$, $di/dt=100\text{ A/μs}$, $T_{j,max}=175\text{ °C}$	6	kV/μs
Gate source voltage	V_{GS}		±20	V
Power dissipation	P_{tot}	$T_C=25\text{ °C}$	300	W
Operating and storage temperature	T_j , T_{stg}		-55 ... 175	°C
IEC climatic category; DIN IEC 68-1			55/175/56	

¹⁾J-STD20 and JESD22

²⁾ See figure 3

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			min.	typ.	max.	

Thermal characteristics

Thermal resistance, junction - case	R_{thJC}		-	-	0.5	K/W
Thermal resistance, junction - ambient	R_{thJA}	minimal footprint	-	-	62	
		6 cm ² cooling area ³⁾	-	-	40	

Electrical characteristics, at $T_j=25\text{ °C}$, unless otherwise specified

Static characteristics

Drain-source breakdown voltage	$V_{(BR)DSS}$	$V_{GS}=0\text{ V}, I_D=1\text{ mA}$	150	-	-	V
Gate threshold voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=270\text{ }\mu\text{A}$	2	3	4	
Zero gate voltage drain current	I_{DSS}	$V_{DS}=120\text{ V}, V_{GS}=0\text{ V}, T_j=25\text{ °C}$	-	0.1	1	μA
		$V_{DS}=120\text{ V}, V_{GS}=0\text{ V}, T_j=125\text{ °C}$	-	10	100	
Gate-source leakage current	I_{GSS}	$V_{GS}=20\text{ V}, V_{DS}=0\text{ V}$	-	1	100	nA
Drain-source on-state resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS}=10\text{ V}, I_D=100\text{ A}, (TO220, TO262)$	-	6.2	7.5	m Ω
		$V_{GS}=10\text{ V}, I_D=100\text{ A}, (TO263)$	-	5.8	7.2	
		$V_{GS}=8\text{ V}, I_D=50\text{ A}, (TO220; TO262)$	-	6.4	7.7	
		$V_{GS}=8\text{ V}, I_D=50\text{ A}, (TO263)$	-	6.0	7.4	
Gate resistance	R_G		-	2.3	-	Ω
Transconductance	g_{fs}	$ V_{DS} >2 I_D R_{DS(on)max}, I_D=100\text{ A}$	65	130	-	S

³⁾ Device on 40 mm x 40 mm x 1.5 mm epoxy PCB FR4 with 6 cm² (one layer, 70 μm thick) copper area for drain connection. PCB is vertical in still air.

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			min.	typ.	max.	

Dynamic characteristics

Input capacitance	C_{iss}	$V_{GS}=0\text{ V}, V_{DS}=75\text{ V},$ $f=1\text{ MHz}$	-	5470	-	pF
Output capacitance	C_{oss}		-	638	-	
Reverse transfer capacitance	C_{rss}		-	10	-	
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$V_{DD}=75\text{ V}, V_{GS}=10\text{ V},$ $I_D=100\text{ A}, R_G=1.6\ \Omega$	-	25	38	ns
Rise time	t_r		-	35	52	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	46	69	
Fall time	t_f		-	14	21	

Gate Charge Characteristics⁴⁾

Gate to source charge	Q_{gs}	$V_{DD}=75\text{ V}, I_D=100\text{ A},$ $V_{GS}=0\text{ to }10\text{ V}$	-	30	40	nC
Gate to drain charge	Q_{gd}		-	11	17	
Switching charge	Q_{sw}		-	25	35	
Gate charge total	Q_g		-	70	93	
Gate plateau voltage	$V_{plateau}$		-	5.5	-	V
Output charge	Q_{oss}	$V_{DD}=75\text{ V}, V_{GS}=0\text{ V}$	-	179	239	nC

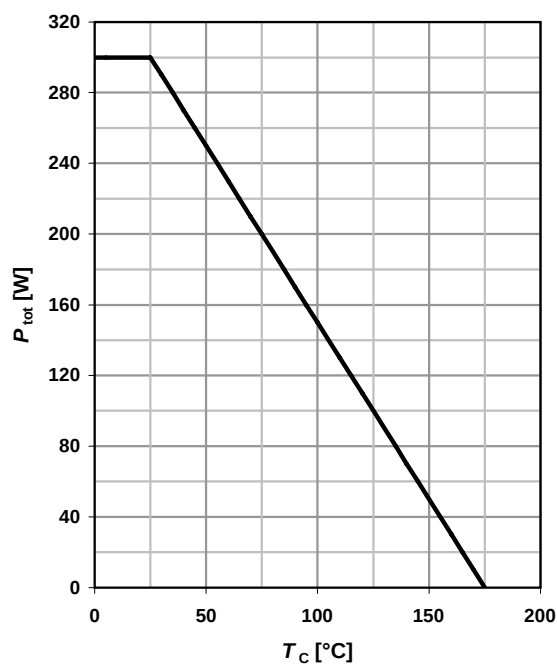
Reverse Diode

Diode continuous forward current	I_S	$T_C=25\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	100	A
Diode pulse current	$I_{S,pulse}$		-	-	400	
Diode forward voltage	V_{SD}	$V_{GS}=0\text{ V}, I_F=100\text{ A},$ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$	-	1	1.2	V
Reverse recovery time	t_{rr}	$V_R=75\text{ V}, I_F=I_S,$ $di_F/dt=100\text{ A}/\mu\text{s}$	-	146	-	ns
Reverse recovery charge	Q_{rr}		-	478	-	nC

⁴⁾ See figure 16 for gate charge parameter definition

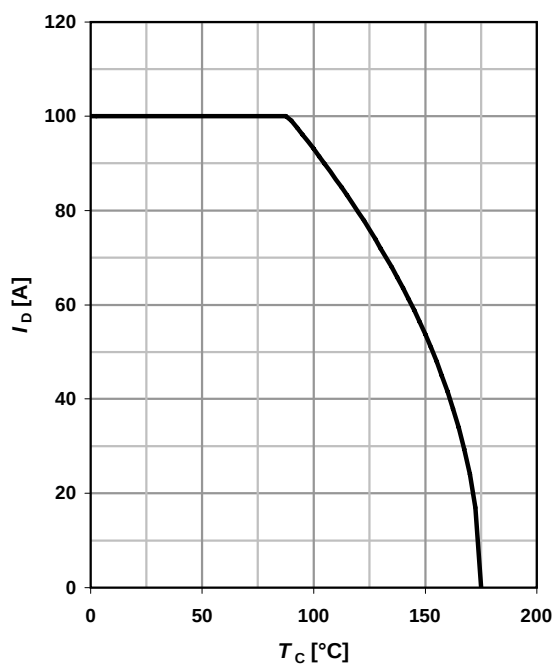
1 Power dissipation

$$P_{\text{tot}} = f(T_C)$$



2 Drain current

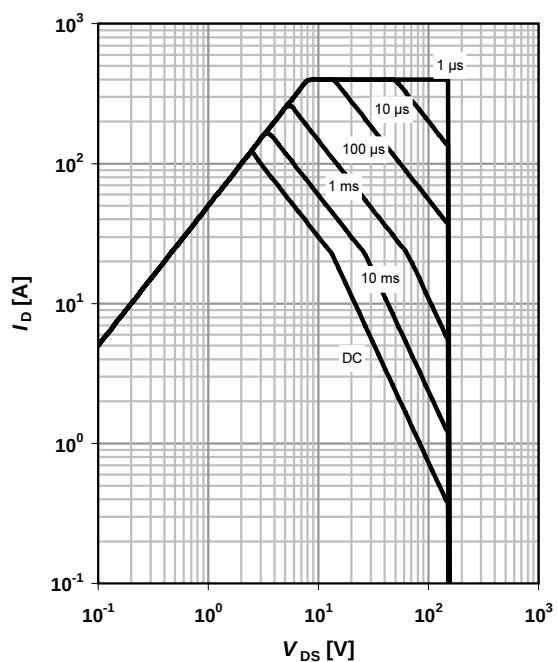
$$I_D = f(T_C); V_{GS} \geq 10 \text{ V}$$



3 Safe operating area

$$I_D = f(V_{DS}); T_C = 25 \text{ °C}; D = 0$$

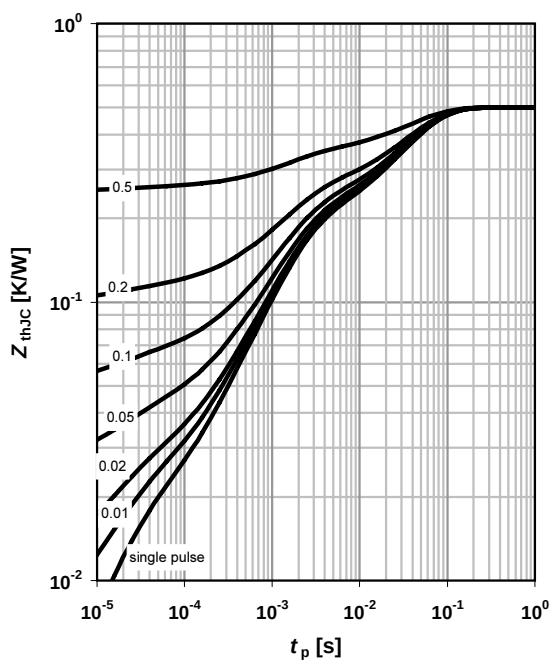
parameter: t_p



4 Max. transient thermal impedance

$$Z_{\text{thJC}} = f(t_p)$$

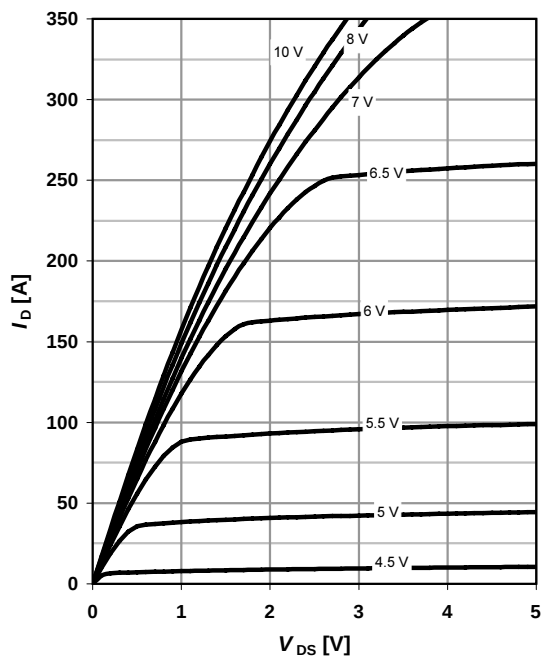
parameter: $D = t_p/T$



5 Typ. output characteristics

$$I_D = f(V_{DS}); T_J = 25^\circ\text{C}$$

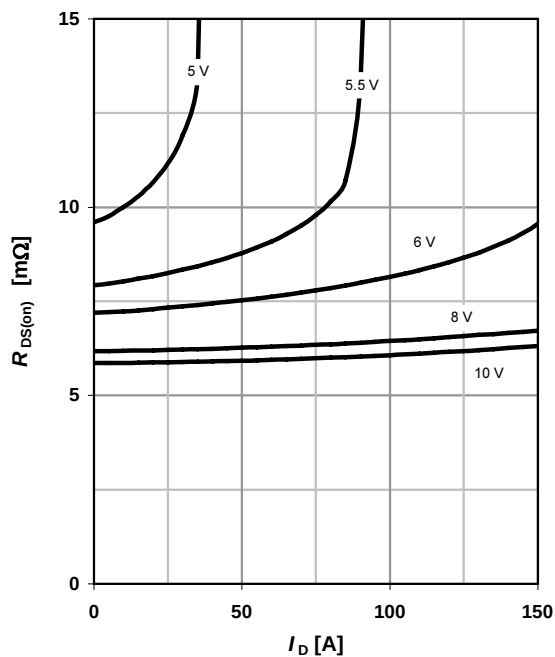
parameter: V_{GS}



6 Typ. drain-source on resistance

$$R_{DS(on)} = f(I_D); T_J = 25^\circ\text{C}$$

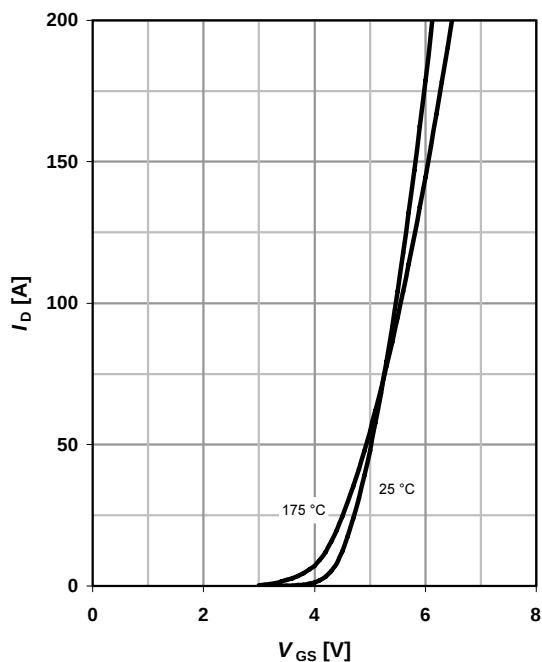
parameter: V_{GS}



7 Typ. transfer characteristics

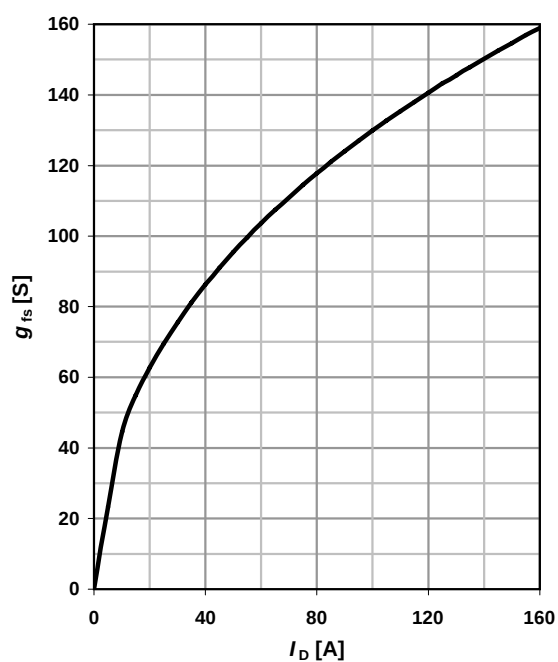
$$I_D = f(V_{GS}); |V_{DS}| > 2|I_D|R_{DS(on)max}$$

parameter: T_J



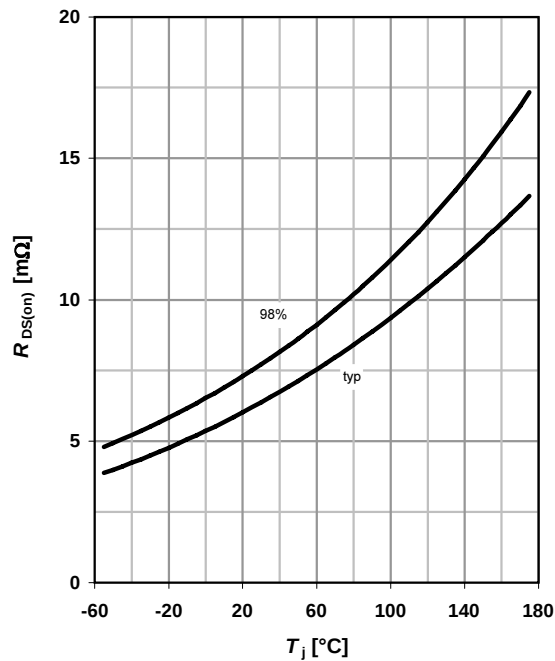
8 Typ. forward transconductance

$$g_{fs} = f(I_D); T_J = 25^\circ\text{C}$$



9 Drain-source on-state resistance

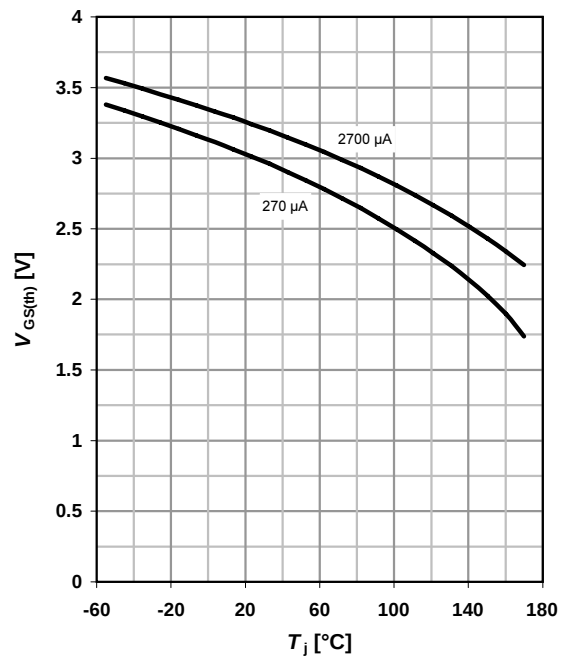
$$R_{DS(on)} = f(T_j); I_D = 100 \text{ A}; V_{GS} = 10 \text{ V}$$



10 Typ. gate threshold voltage

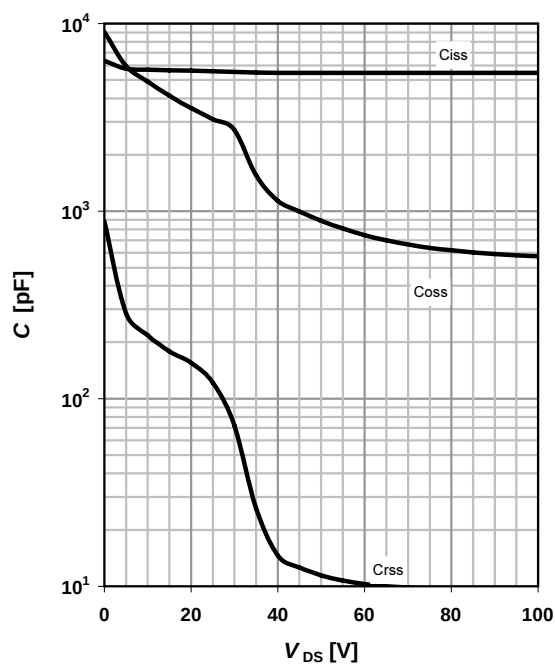
$$V_{GS(th)} = f(T_j); V_{GS} = V_{DS}$$

parameter: I_D



11 Typ. capacitances

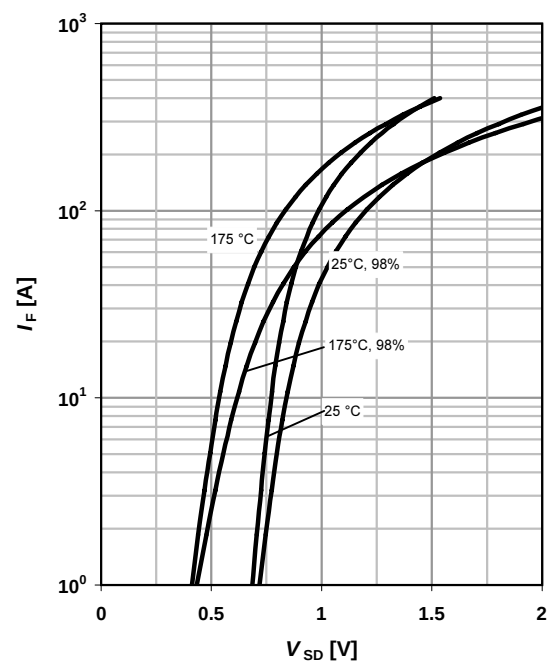
$$C = f(V_{DS}); V_{GS} = 0 \text{ V}; f = 1 \text{ MHz}$$



12 Forward characteristics of reverse diode

$$I_F = f(V_{SD})$$

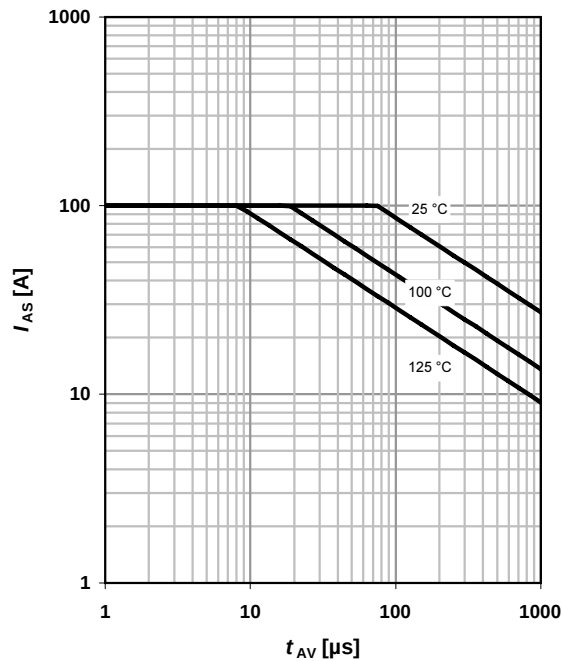
parameter: T_j



13 Avalanche characteristics

$$I_{AS}=f(t_{AV}); R_{GS}=25\ \Omega$$

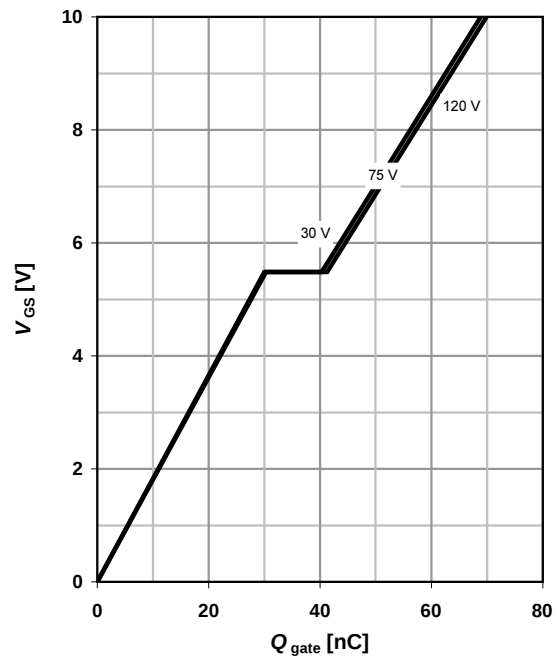
parameter: $T_{j(\text{start})}$



14 Typ. gate charge

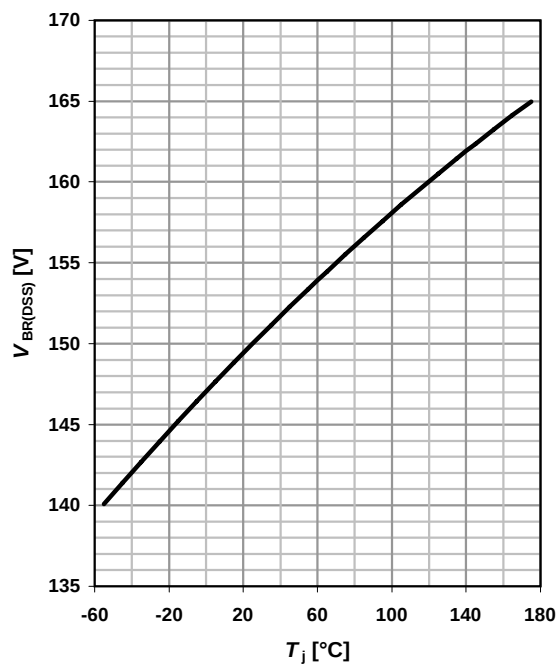
$$V_{GS}=f(Q_{\text{gate}}); I_D=100\ \text{A pulsed}$$

parameter: V_{DD}

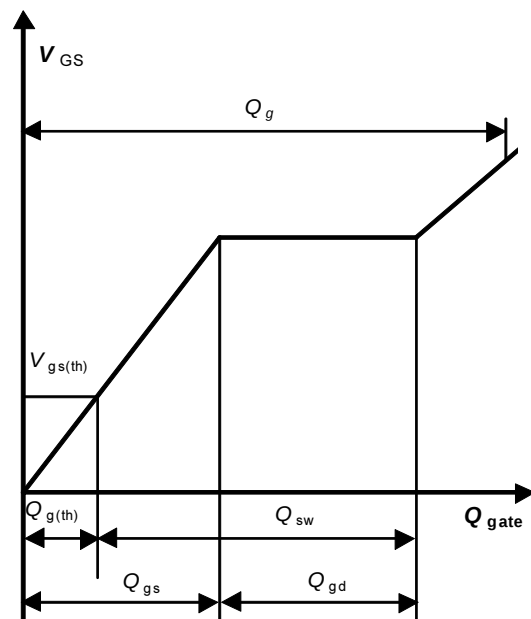


15 Drain-source breakdown voltage

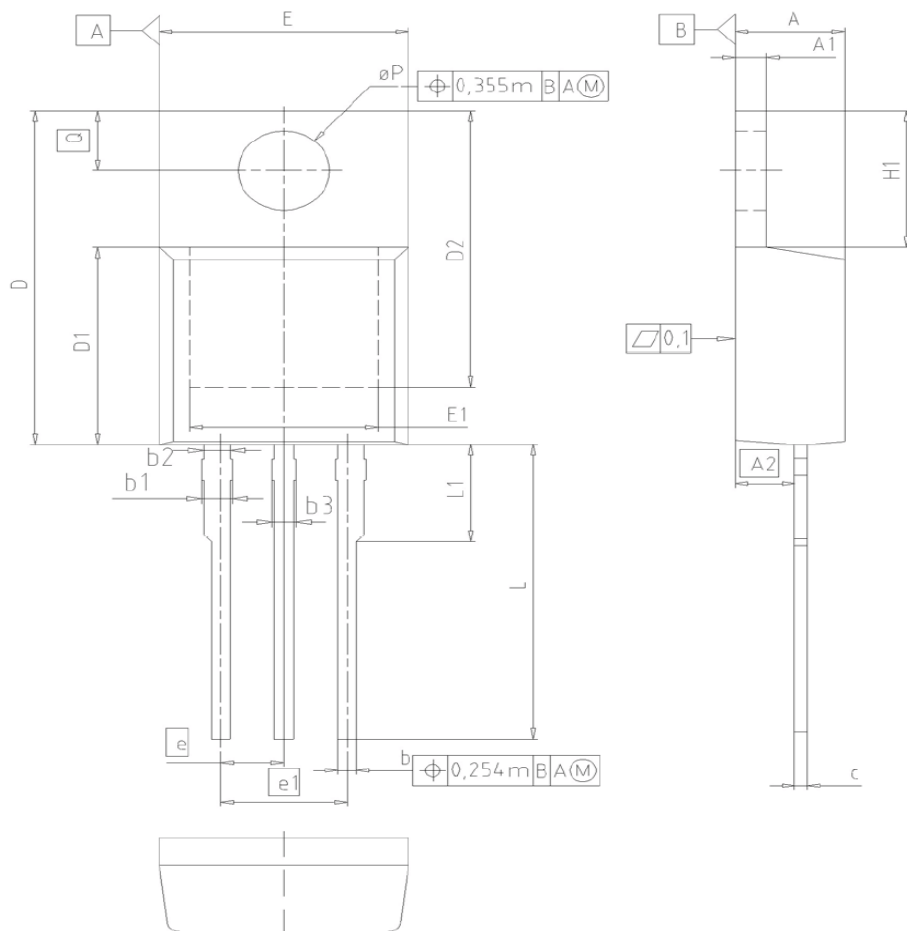
$$V_{BR(DSS)}=f(T_j); I_D=1\ \text{mA}$$



16 Gate charge waveforms



PG-TO220-3: Outline



DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	4.30	4.57	0.169	0.180
A1	1.17	1.40	0.046	0.055
A2	2.15	2.72	0.085	0.107
b	0.65	0.86	0.026	0.034
b1	0.95	1.40	0.037	0.055
b2	0.95	1.15	0.037	0.045
b3	0.65	1.15	0.026	0.045
c	0.33	0.60	0.013	0.024
D	14.81	15.95	0.583	0.628
D1	8.51	9.45	0.335	0.372
D2	12.19	13.10	0.480	0.516
E	9.70	10.36	0.382	0.408
E1	6.50	8.60	0.256	0.339
e	2.54		0.100	
e1	5.08		0.200	
N	3		3	
H1	5.90	6.90	0.232	0.272
L	13.00	14.00	0.512	0.551
L1	-	4.80	-	0.189
øP	3.60	3.89	0.142	0.153
Q	2.60	3.00	0.102	0.118

DOCUMENT NO.
Z8B00003318

SCALE

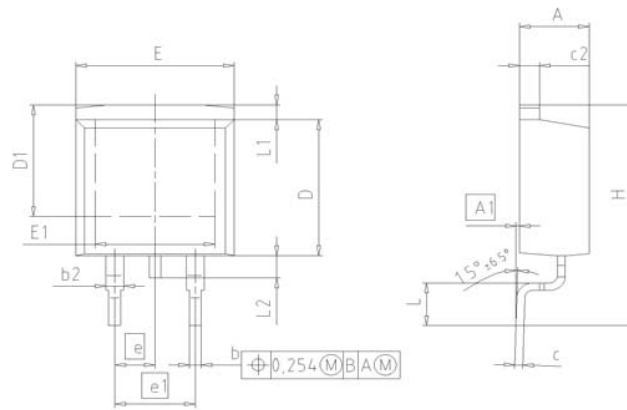
0 2.5 5mm

EUROPEAN PROJECTION

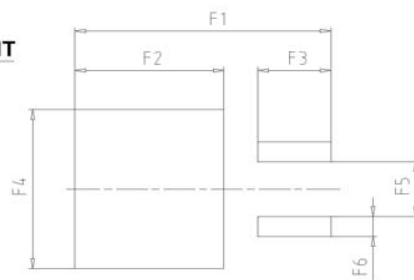
ISSUE DATE
23-08-2007

REVISION
05

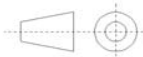
PG-TO263-3: Outline



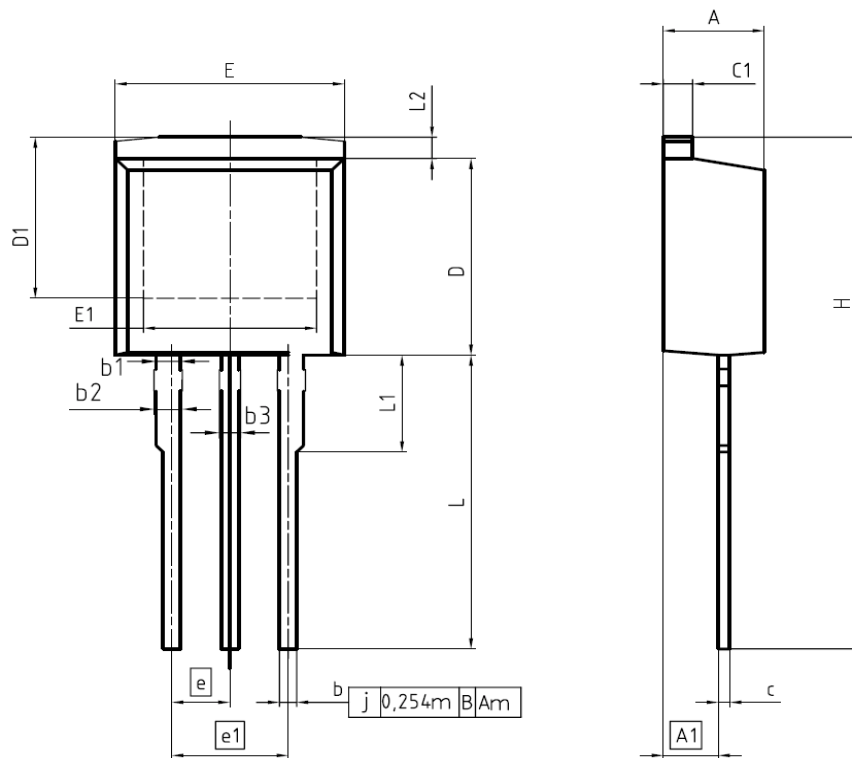
FOOTPRINT



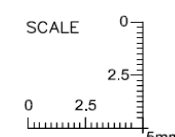
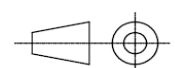
DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	4.30	4.57	0.169	0.180
A1	0.00	0.25	0.000	0.010
b	0.65	0.85	0.026	0.033
b2	0.95	1.15	0.037	0.045
c	0.33	0.65	0.013	0.026
c2	1.17	1.40	0.046	0.055
D	8.51	9.45	0.335	0.372
D1	7.10	7.90	0.280	0.311
E	9.80	10.31	0.386	0.406
E1	6.50	8.60	0.256	0.339
e	2.54		0.100	
e1	5.08		0.200	
N	2		2	
H	14.61	15.88	0.575	0.625
L	2.29	3.00	0.090	0.118
L1	0.70	1.60	0.028	0.063
L2	1.00	1.78	0.039	0.070
F1	16.05	16.25	0.632	0.640
F2	9.30	9.50	0.366	0.374
F3	4.50	4.70	0.177	0.185
F4	10.70	10.90	0.421	0.429
F5	3.65	3.85	0.144	0.152
F6	1.25	1.45	0.049	0.057

DOCUMENT NO. Z8B00003324	
SCALE	0 5 5 7.5mm
EUROPEAN PROJECTION 	
ISSUE DATE 30-08-2007	
REVISION 01	

PG-TO262-3: Outline



DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	4.300	4.572	0.169	0.180
A1	2.150	2.718	0.085	0.107
b	0.650	0.864	0.026	0.034
b1	0.950	1.093	0.037	0.043
b2	0.950	1.400	0.037	0.055
b3	0.650	1.118	0.026	0.044
c	0.330	0.600	0.013	0.024
c1	1.170	1.400	0.046	0.055
D	8.509	9.450	0.335	0.372
D1	6.900	-	0.272	-
E	9.700	10.363	0.382	0.408
E1	6.500	8.600	0.256	0.339
e	2.540		0.100	
e1	5.080		0.200	
N	3		3	
L	13.000	14.000	0.512	0.551
L1	-	4.800	-	0.189
L2	-	1.727	-	0.068

REFERENCE JEDEC TO262
SCALE 
EUROPEAN PROJECTION 
ISSUE DATE 05-05-2006
FILE TO262_1

Published by
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany
© 2010 Infineon Technologies AG
All Rights Reserved.

Legal Disclaimer

The information given in this document shall in no event be regarded as a guarantee of conditions or characteristics. With respect to any examples or hints given herein, any typical values stated herein and/or any information regarding the application of the device, Infineon Technologies hereby disclaims any and all warranties and liabilities of any kind, including without limitation, warranties of non-infringement of intellectual property rights of any third party.

Information

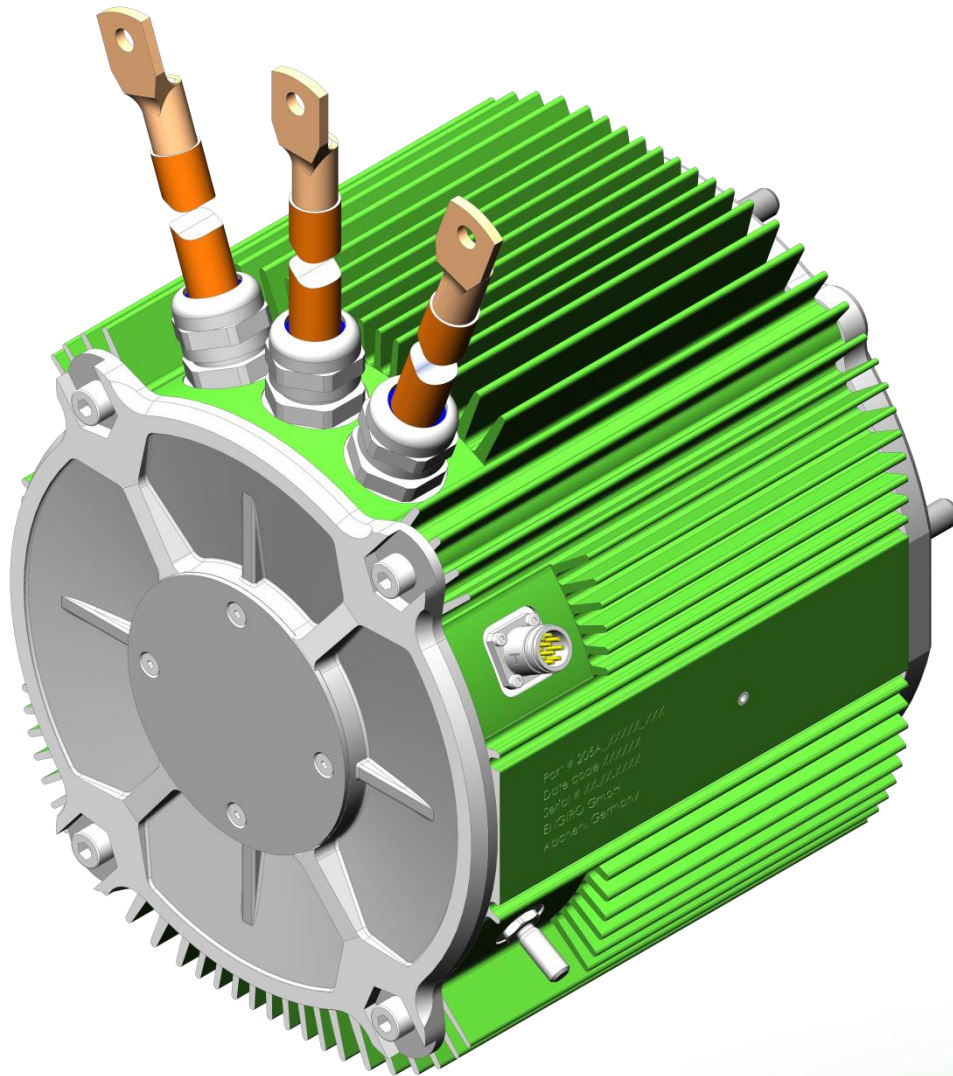
For further information on technology, delivery terms and conditions and prices, please contact the nearest Infineon Technologies Office (www.infineon.com).

Warnings

Due to technical requirements, components may contain dangerous substances. For information on the types in question, please contact the nearest Infineon Technologies Office. The Infineon Technologies component described in this Data Sheet may be used in life-support devices or systems and/or automotive, aviation and aerospace applications or systems only with the express written approval of Infineon Technologies, if a failure of such components can reasonably be expected to cause the failure of that life-support, automotive, aviation and aerospace device or system or to affect the safety or effectiveness of that device or system. Life support devices or systems are intended to be implanted in the human body or to support and/or maintain and sustain and/or protect human life. If they fail, it is reasonable to assume that the health of the user or other persons may be endangered.

205A-04016-ABC

air-cooled motor / generator with up to 13 kW continuous power



KEY FEATURES

- permanent magnet synchronous machine
- air-cooled
- high peak power for motor applications
- convincing cost-benefit ratio
- recommended voltage range from 48V to 200V
- delivery with controller possible

Section	Page
Technical Data Machine	3
Technical Drawings Machine	4
Characteristics Machine 96V	5
Technical Data Inverter Set 96V	6

Data, including specifications, contained within this document are summary in nature and subject to change at any time without notice and are intended for general information only. Call for latest revision. All brand names and product names referenced are trademarks, registered trademarks, or trade names of their respective holders.

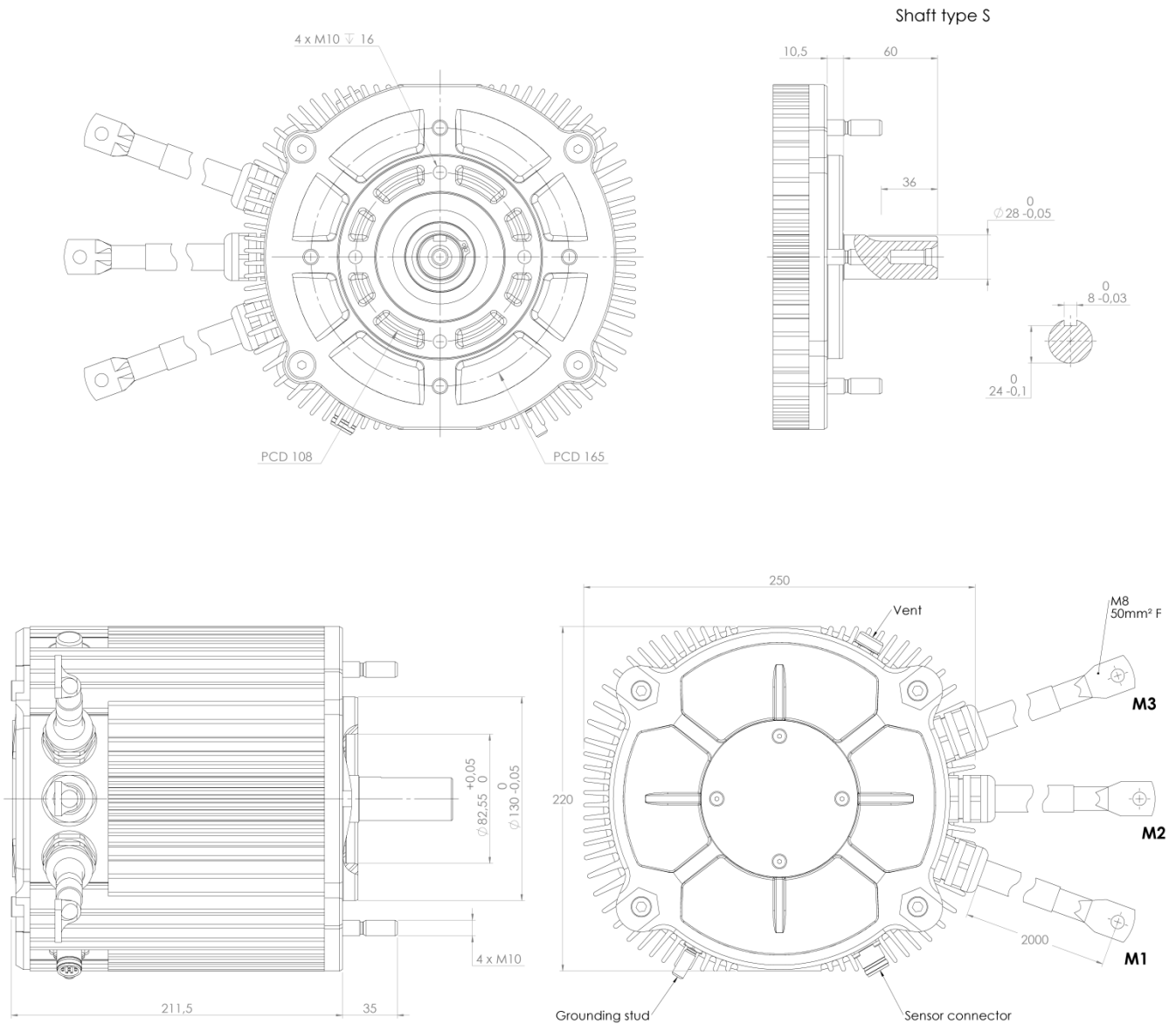
Nominal Operation (S1, cooling as specified below)				
Torque	T_{nom}		22	Nm
Power	P_{nom}		13	kW
Speed	n_{nom}		5720	rpm
Phase rms-current	I_{nom}		156	A
Battery voltage (DC)	U_{nom}		96	V
Electric frequency	$f_{\text{el, nom}}$		381	Hz
Power factor	$\cos(\varphi)$		0.75	
Maximal Values (S2, 10s, cooling as specified below)				
Torque	T_{max}		95	Nm
Power	P_{max}		42	kW
Phase rms-current	I_{max}		781	A
Battery voltage (DC)	U_{max}		200	V
Speed	n_{max}		8000	rpm
Electric frequency	$f_{\text{el, max}}$		533	Hz
Electrical Data				
Number of phases			3	
Number of pole pairs			4	
Maximal efficiency			>96	%
T/I constant ($I < I_{\text{nom}}$)			0.14	Nm/A _{rms}
U/n constant (AC)		rms: 9.1	peak: 12.9	V/(1000rpm)
K_e constant (AC)		rms: 0.022	peak: 0.031	V/(rad*s ⁻¹)
Additional Data				
Weight (w/o cables)			20	kg
Rotor moment of inertia			0.009	kg*m ²
Protection category			IP65	
Maximal motor temperature			120	°C
Allowed ambient temperature			-20 ... 45 ¹⁾	°C
Cooling (medium, flow rate, inlet temperature, pressure)			air, 18 m/s, ≤ 45°C	
Temperature monitoring			1 x KTY84-130	
Type approval			CE, EN 60034	
Customs tariff number			8501 5230	
Connectors				
Power terminals			3 x 50mm ² cables with M8 cable lugs	
Weight power cables			3.3	kg
Length power cables			2	m
Signal connectors			M16, 10 Pin	

¹⁾ other range on request

Data, including specifications, contained within this document are summary in nature and subject to change at any time without notice and are intended for general information only. Call for latest revision. All brand names and product names referenced are trademarks, registered trademarks, or trade names of their respective holders.

Available Type Variants

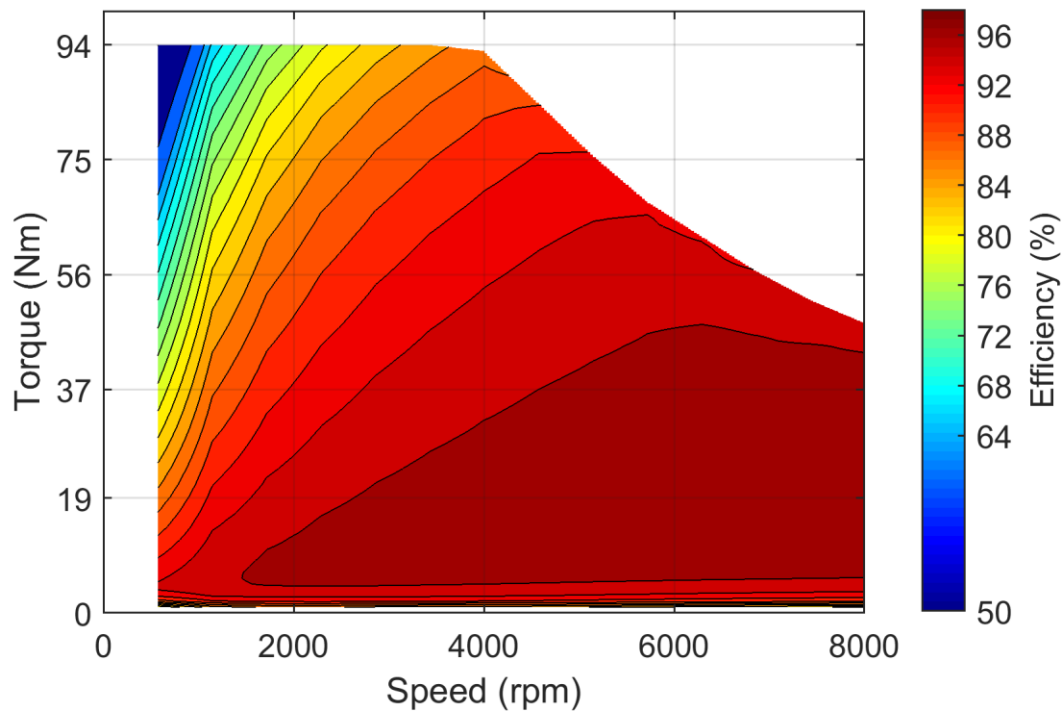
type number	A: flange	B: shaft	C: position sensor
205A-04016-	S: standard	S: cylindrical shaft with keyway	E: sin/cos encoder
			N: none



Data, including specifications, contained within this document are summary in nature and subject to change at any time without notice and are intended for general information only. Call for latest revision. All brand names and product names referenced are trademarks, registered trademarks, or trade names of their respective holders.

Simulated Efficiency of Motor Application

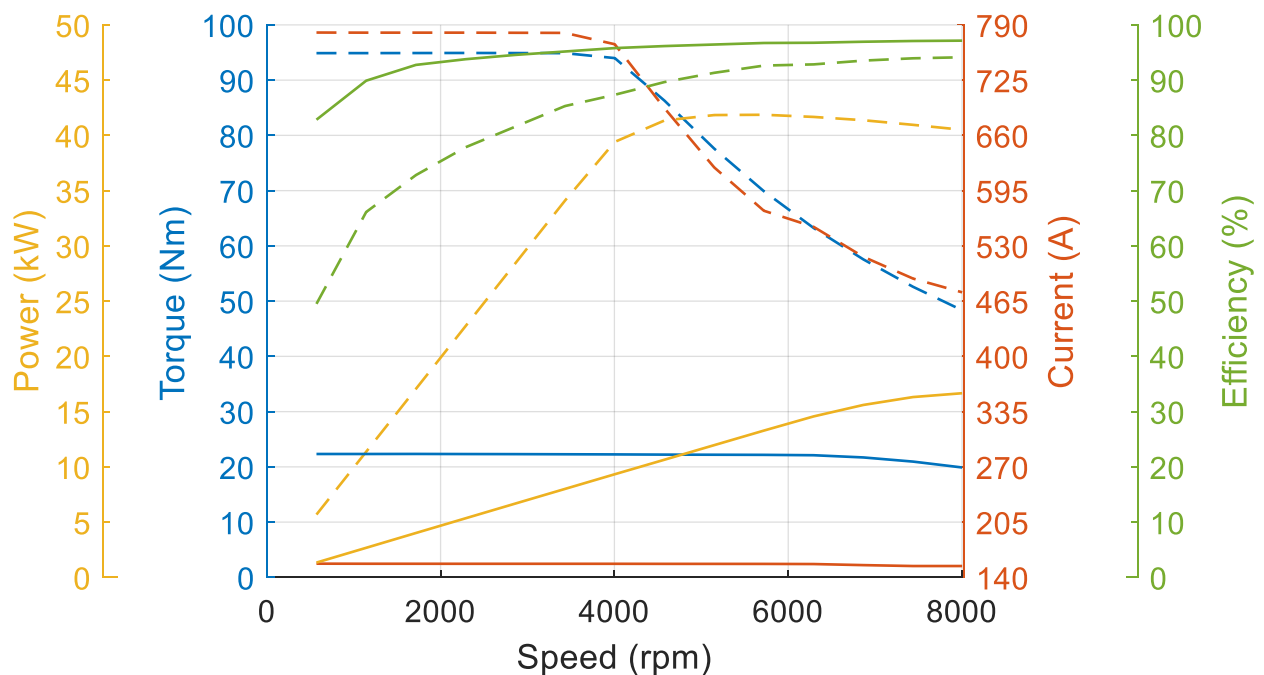
(electric machine only; $U_{\text{nom}} = 96 \text{ V}$; machine at 100°C ;))



Simulated Characteristic Motor Parameters

$U_{\text{nom}} = 96 \text{ V}$

solid lines: continuous; dashed lines: maximum;
 (jitter is caused by numerical inaccuracies in the simulation software)

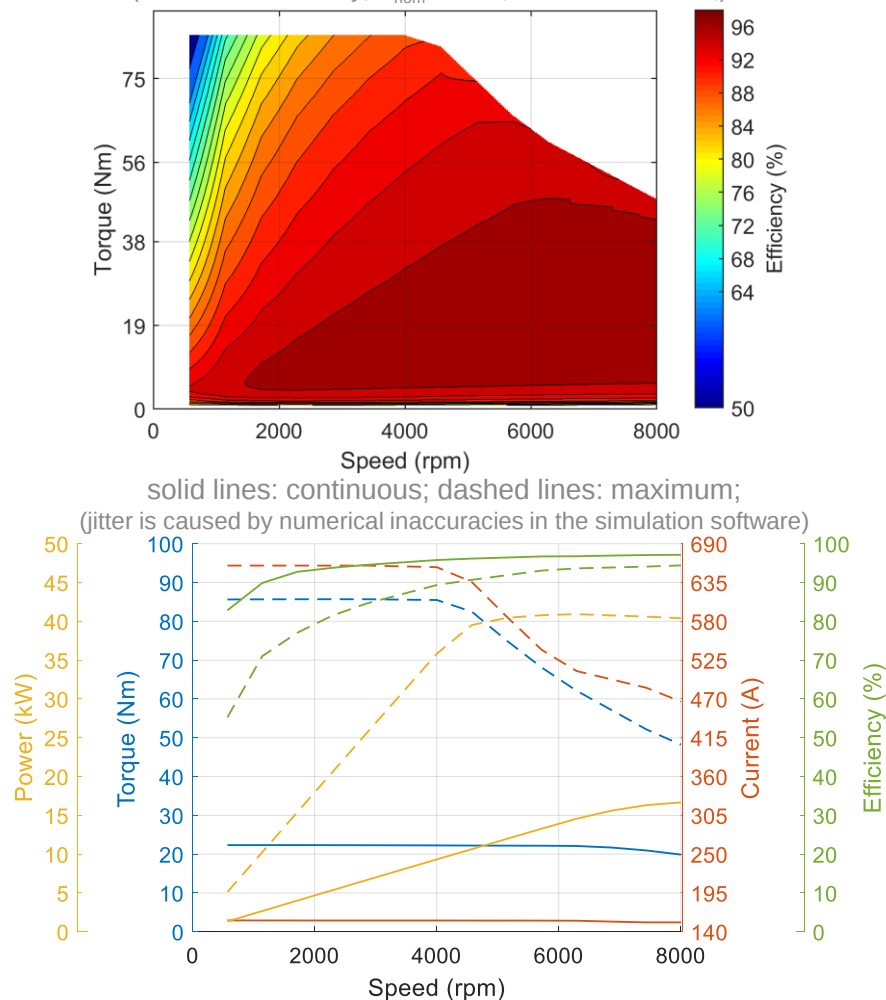


Data, including specifications, contained within this document are summary in nature and subject to change at any time without notice and are intended for general information only. Call for latest revision. All brand names and product names referenced are trademarks, registered trademarks, or trade names of their respective holders.

Nominal Operation Drive Set (S1)			
Torque	T_{nom}	22	Nm
Power	P_{nom}	13	kW
Speed	n_{nom}	5720	rpm
Phase rms-current	I_{nom}	156	A
Battery voltage (DC)	U_{nom}	96	V
Electric frequency	$f_{el,\text{nom}}$	381	Hz
Power factor	$\cos(\varphi)$	0.75	
Maximal Values Drive Set (S2, 1-10s)			
Torque	T_{max}	86	Nm
Power	P_{max}	41	kW
Phase rms-current	I_{max}	660	A
Battery voltage (DC)	U_{max}	96	V
Speed	n_{max}	8000	rpm
Electric frequency	$f_{el,\text{max}}$	553	Hz

Simulated Efficiency and Motor Characteristic of Motor Application

(electric machine only; $U_{\text{nom}} = 96 \text{ V}$; machine at 100°C ;))



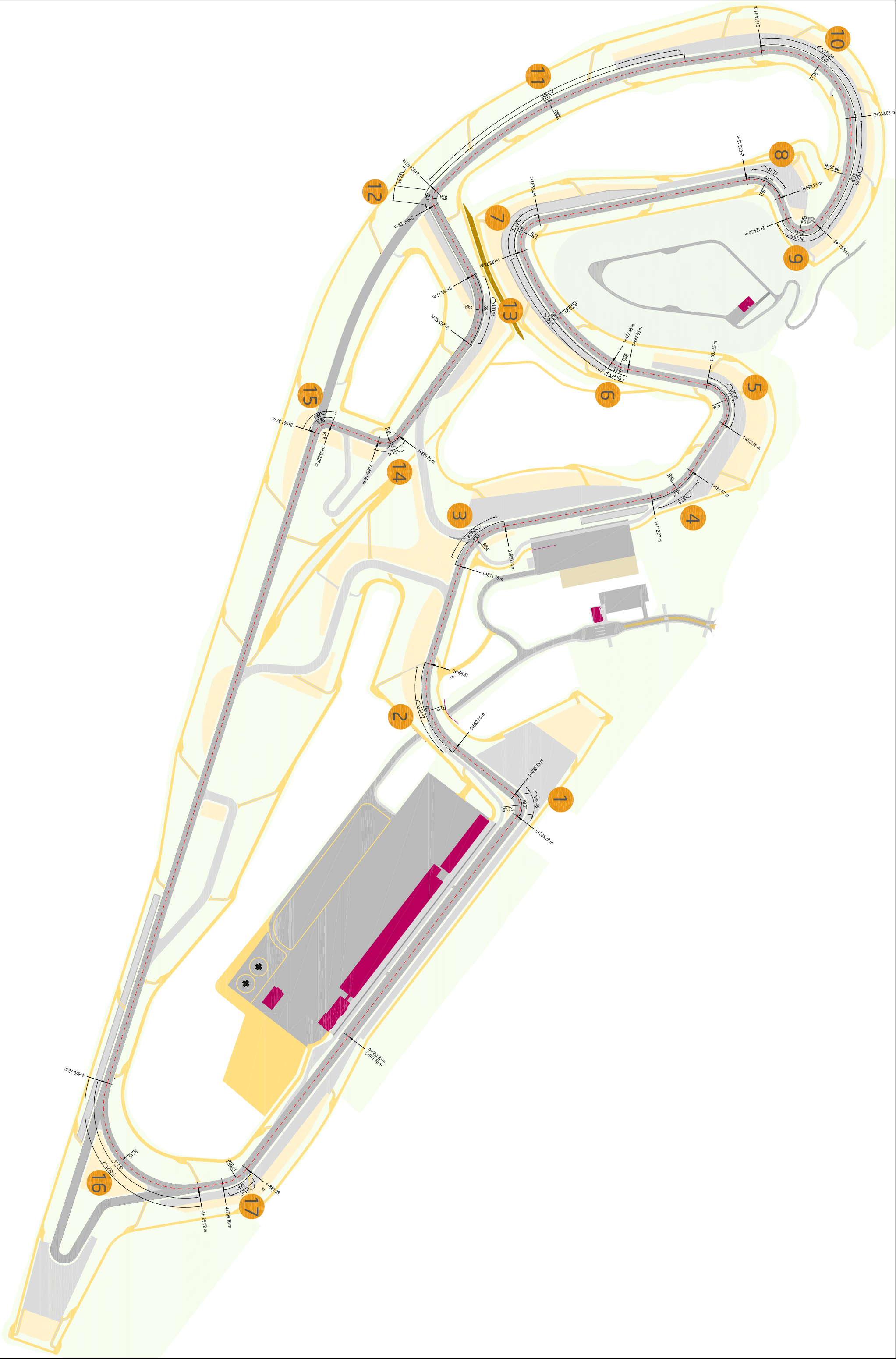
Data, including specifications, contained within this document are summary in nature and subject to change at any time without notice and are intended for general information only. Call for latest revision. All brand names and product names referenced are trademarks, registered trademarks, or trade names of their respective holders.



MOTORLAND ARAGON

Race Track with Geometry Data -Grand Prix FIM MotoGP

MOTORLAND ARAGON

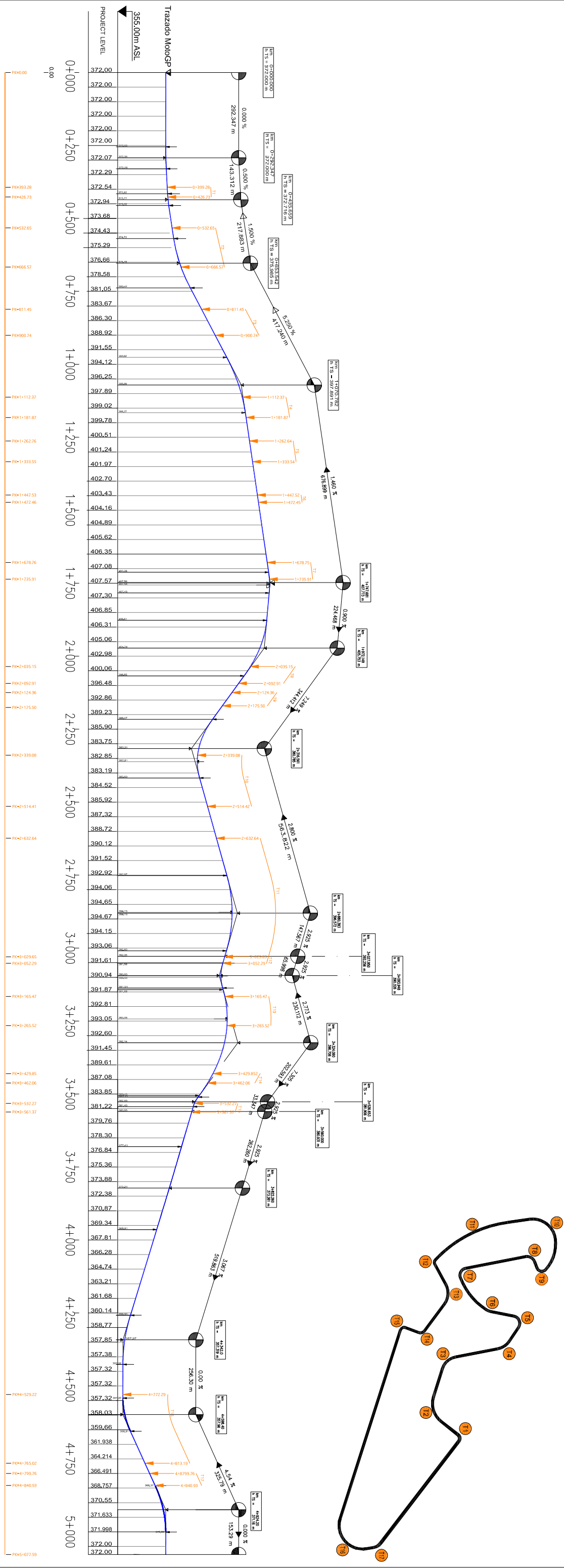




MOTORLAND ARAGON

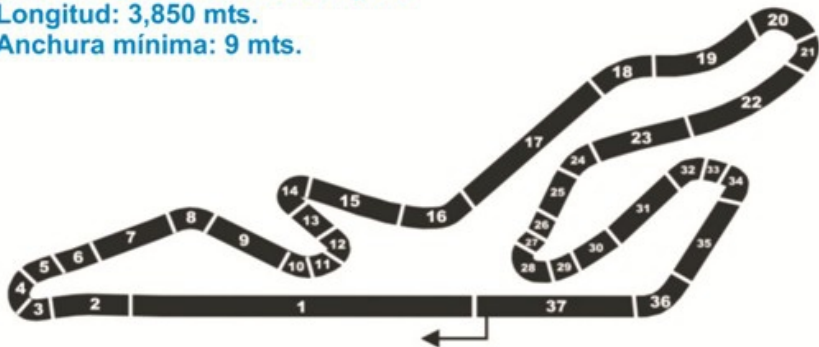
ELEVATION PROFILE - GRAND PRIX FIM MotoGP

11/01/2012





Relación planimétrica de la pista
Longitud: 3,850 mts.
Anchura mínima: 9 mts.



TRAMO Nº	RADIO MTS.	LONGITUD MTS.	PENDIENTE TRANSVERSAL %	PENDIENTE LONGITUDINAL %
1		507	2	0.25
2	-800	132	2	0.00
3	25	35	3	0.00
4	40	54	3	0.00
5	160	44	2	0.00
6	-800	81	2	0.00
7		118	2	0.24
8	68	62	9	0.16
9		144	2	0.13
10	-41	57	10	0.20
11		13	2	0.23
12	-20	31	10	0.25
13		89	2	0.25
14	20	55	10	0.25
15		170	2	0.58
16	-70	78	10	7.50
17		305	2	4.85
18	130	103	2	4.00
19	-180	163	2	-1.00
20	45	106	3	-1.00
21	65	49	2	-1.00
22	300	196	2	-1.00
23		150	2	-2.58
24	-100	88	8	-6.89
25		78	2	-5.12
26	105	57	10	-1.90
27		23	2	-0.50
28	-20	45	10	1.22
29		72	2	4.57
30	-150	63	6	6.04
31		176	2	2.27
32	33	31	10	0.00
33		30	2	0.92
34	25	47	10	-1.19
35		183	2	-2.45
36	75	82	9	-3.97
37		240	2	-3.80

* Representan los tramos rectos
* Los radios negativos corresponden a curvas con centro de giro a la izquierda según el sentido de la marcha
* Las pendientes longitudinales negativas son bajadas