



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Desenvolvimento de uma bicicleta elétrica de alta performance (E-bike)

Miguel Ângelo Barreiros Pereira

Dissertação

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Joaquim Delgado

Fevereiro de 2023



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Desenvolvimento de uma bicicleta elétrica de alta performance (E-bike)

Miguel Ângelo Barreiros Pereira

Dissertação

Mestrado em Eng. Eletrotécnica - Energia e Automação Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Joaquim Delgado

Fevereiro de 2023

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

Nas últimas décadas temos vindo a tomar cada vez maior consciência de que o uso de energia de origem fóssil é responsável por emissões de gases de efeito de estufa com implicação nas mudanças climáticas e de que essa fonte é finita e um dia irá esgotar-se. Sendo o setor dos transportes na União Europeia o maior consumidor desta forma de energia e responsável por cerca de um quarto das emissões, estes factos têm motivado para a diversificação de fontes de energia renovável para reduzir essa dependência.

As fontes de energia renovável de maior potencial são a solar, a eólica e a hídrica, que se caracterizam por serem inesgotáveis à escala da nossa civilização. Com base nesta ideia têm vindo a ser aperfeiçoadas as tecnologias para a sua captura convertendo a energia primária disponível na natureza em eletricidade que é gerada com taxas de emissão cada vez mais reduzidas e utilizada crescentemente, também, no setor dos transportes.

Uma alternativa de transporte viável e cada vez mais utilizada em muitas situações é o uso da bicicleta. Para diminuir o esforço da sua utilização e melhorar o desempenho, a escolha assenta cada vez mais nas *E-bikes*, pois trata-se de uma alternativa de mobilidade versátil e que permite realizar as deslocações de forma mais cómoda do que com a bicicleta tradicional.

Esta dissertação teve por objeto o estudo, o projeto e a implementação de uma *E-bike* de alto desempenho e eficiência. Esta constitui um meio de transporte viável para além de ser uma opção sustentável. Utiliza energia produzida cada vez mais a partir de fontes renováveis, contribui para a melhoria da qualidade do ar no meio onde é utilizada e promove hábitos de vida saudáveis.

Após a realização de estudo cinemático da *E-bike* com base no desempenho e autonomia que desejávamos alcançar, desenvolvemos o projeto teórico para atingir o desempenho e eficiência que iriam justificar as escolhas dos componentes a utilizar na implementação.

O quadro da *E-bike* destina-se não só a suportar o ciclista, mas também de todos os componentes mecânicos e elétricos como a bateria, o controlador e o motor elétrico. O formato escolhido foi o de um quadro que se assemelha ao de motas elétricas. Na fundamentação teórica foram realizadas simulações relativas ao desempenho dinâmico, potência requerida, consumos, autonomia e impacto ambiental.

Após a concretização da *E-bike* foram realizados testes para comprovar se o protótipo com os componentes escolhidos permitia alcançar o desempenho e autonomia pretendidos. Essa validação foi dividida em 3 modos de condução (só com propulsão do ciclista, com propulsão elétrica pura e com propulsão híbrida) e constatamos que: (i) nos modos com propulsão elétrica pura e com propulsão híbrida os resultados alcançados superaram o previsto; (ii) no modo com propulsão só do ciclista os resultados ficaram um pouco aquém do idealizado na fase de projeto.

ABSTRACT

In the last decades, we have been more and more aware of the use of fossil energy sources that are responsible for greenhouse gas emissions with implications to the climate change and that this energy source will run out. As the transport sector in the European Union is the largest consumer of this form of energy and it is also responsible for a quarter of CO₂ emissions, these facts have led to the variety of renewable energy sources to try to reduce that dependence.

The renewable energy sources with large potential are the solar, wind and hydro. These ones are characterized for being easily available in the world we are living in. Based on this idea, many technologies have been improved to produce electricity by converting the primary energy that exists in the nature into electricity that is generated with increasingly low emission rates and they are more and more used also by the transport sector.

Nowadays the use of the bicycle is a viable alternative transport that is being used in many situations. To reduce the effort of its use and to improve its performance, the choice is more and more based on the *E-bike*, as it is a versatile mobility alternative that allows us to travel more comfortable rather than with the traditional one.

The goal of this work is to study, to project and to implement an *E-bike* of high performance and efficiency. This is a viable mean of transport and a sustainable option. It uses electricity that is more and more produced from renewable sources, it contributes to improve the air quality and it promotes healthy habits.

After having done the kinematic study of the *E-bike* based on the performance and the autonomy we want to reach, we developed the theoretical project to achieve the performance and efficiency that would justify the choices of the components to be used on its implementation.

The *E-bike* structure is aimed to hold not only the cyclist, but also all the mechanical and electrical components such as the battery, the controller and the electric motor. We choose a structure that is similar to the one of the electric motorbikes. In what concerns the theoretical target some simulations were done regarding to the dynamic performance, the required power, as well as the consumption, the autonomy and the environmental impact.

After the *E-bike* being built, we made tests to validate if the prototype implemented with the chosen components, can achieve the anticipated performance and autonomy. This validation was divided into 3 propulsion test modes, with only the cyclist propulsion, in pure electric mode and in hybrid mode and we found that: (i) in pure electric and hybrid propulsion modes the results achieved exceeded our expectations; (ii) in the cyclist-only propulsion mode the results were below what we expected from the project.

PALAVRAS CHAVE

Mobilidade Elétrica

Bicicleta Elétrica

E-bike

Veículo de duas rodas

Baterias de Lítio

BMS (*Battery Management System*)

KEY WORDS

Electric Mobility

Electric Bike

E-bike

Two-wheeled vehicle

Lithium-ion Battery

BMS (Battery Management System)

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação contou com apoios e incentivos essenciais.

Em primeiro lugar quero deixar um agradecimento sincero ao meu orientador, Professor Doutor Joaquim Delgado, pela aceitação da proposta de trabalho, pelo total apoio e disponibilidade de colaboração no esclarecimento de dúvidas e pelas propostas de solução para os problemas que surgiram, sem esquecer as suas palavras de incentivo. De destacar também a cordialidade com que sempre me recebeu, bem como o estímulo e a confiança incutidos.

Ao Sr. Ricardo Silva, pelo seu empenho no auxílio da construção do quadro bem como na integração dos componentes e no apoio à programação do controlador.

À minha namorada por ter caminhado ao meu lado, pela paciência, compreensão e especialmente por apresentar sempre um sorriso durante o período de realização da dissertação.

A todos os amigos que de forma direta ou indireta contribuíram para este trabalho, o meu muito obrigado.

Por último, tendo consciência de que sozinho nada teria sido possível, dirijo um agradecimento muito especial aos meus pais e irmã pelo apoio incondicional, tanto financeiro como psicológico, para superar os obstáculos que foram surgindo.

Dedico a *E-bike* à minha irmã!

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABELAS.....	XVII
ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Transição para sistemas de mobilidade suave	2
1.2 Objeto da dissertação	3
1.3 Organização da dissertação.....	3
2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS <i>E-BIKES</i>	5
2.1 Outros fatores impulsionadores das <i>E-bikes</i>	10
2.2 Vantagens para a saúde com uso da <i>E-bike</i>	10
2.3 Penetração das <i>E-bikes</i> na Europa e pelo mundo	11
3. CINEMÁTICA DO VEÍCULO DE DUAS RODAS	13
3.1 Forças atuantes sobre um veículo	13
3.2 Forças de resistência ao deslocamento	15
3.3 Força motora	23
4. PROJETO DO SISTEMA PROPULSOR DA <i>E-BIKE</i>	29
4.1 Parâmetros do projeto	29
4.2 Fundamentação cinemática.....	30
4.3 Máximo declive alcançável só com propulsão elétrica.....	32
4.4 Velocidade e declive alcançáveis só com a propulsão do ciclista	34
4.5 Sistema híbrido paralelo – propulsão conjunta de motor elétrico mais ciclista.....	37
4.6 Considerações sobre a máxima autonomia alcançável	38
4.6.1 Autonomia alcançável só com a propulsão elétrica.....	38
4.6.2 Cálculo da autonomia à potência máxima de propulsão	39
4.6.3 Cálculo da corrente máxima debitada pela bateria.....	40
4.6.4 Considerações sobre a recarga da bateria	40
4.6.5 Considerações sobre a capacidade regenerativa.....	41
5. QUADRO DA <i>E-BIKE</i>	43

5.1	Materiais para a construção de quadros	43
5.2	Geometria do quadro	44
5.3	Dimensões de uma bicicleta	46
5.4	Quadro	47
6.	SELEÇÃO DE COMPONENTES DA <i>E-BIKE</i>	49
6.1	Escolha dos componentes elétricos	49
6.1.1	Motor elétrico.....	49
6.1.2	Bateria	51
6.1.3	Controlador	54
6.1.4	Ecrã	55
6.1.5	Acelerador.....	55
6.1.6	Carregador.....	56
6.2	Componentes mecânicos da <i>E-bike</i>	57
6.3	Montagem da <i>E-bike</i>	58
6.3.1	Montagem dos componentes mecânicos.....	58
6.3.2	Montagem dos componentes elétricos	61
6.3.3	Programação do controlador da <i>E-bike</i>	65
6.4	Ilustração da <i>E-bike</i>	69
6.5	Custo da <i>E-bike</i>	69
7.	ENSAIO DA <i>E-BIKE</i>	71
7.1	Tempo necessário para alcançar os 40 km/h no plano horizontal.....	72
7.2	Velocidade máxima alcançável no plano horizontal nos três modos.....	72
7.3	Velocidade alcançável num declive ascendente próximo de 15% com propulsão elétrica pura e a propulsão híbrida	73
7.4	Aferir a autonomia real do protótipo	73
7.5	Custo da energia e das emissões indiretas de CO_2 por quilómetro	76
8.	CONCLUSÃO	77
9.	REFERÊNCIAS	79
	ANEXOS.....	83
	Anexo 1 – Motor Elétrico	
	Anexo 2 – Bateria	
	Anexo 3 – Controlador	
	Anexo 4 – Ecrã	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – <i>E-Bike</i> de Hosea W. Libbey já com motor elétrico no pedaleiro.....	5
Figura 2 – <i>E-bike</i> da Humber Company para dois ocupantes.	6
Figura 3 – <i>E-bike</i> urbana da Sanyo de 1989.....	6
Figura 4 – Conversão de bicicleta tradicional em <i>E-bike</i> com kit da BionX.	7
Figura 5 – TREK Powerfly 7 com motor elétrico integrado no pedaleiro.	8
Figura 6 – Urtopia smart <i>E-bike</i> com motor elétrico na roda motora.....	9
Figura 7 – Riese & Müller modelo Load 75 vario.	9
Figura 8 – Penetração da evolução das vendas de bicicletas tradic. e <i>E-bikes</i> na Europa.	11
Figura 9 – Penetração de veículos elétricos de duas e de três rodas pelo mundo.	12
Figura 10 – Forças que atuam sobre uma bicicleta em movimento.	14
Figura 11 – Deflexão do pneu e motivo da resistência ao rolamento.....	15
Figura 12 – Como melhorar o parâmetro área frontal (A_f).....	18
Figura 13 – C_D para diferentes posições do ciclista.	19
Figura 14 – Forças exercidas num veículo num plano inclinado.	20
Figura 15 – Combinação dos movimentos de translação e de rotação.....	21
Figura 16 – Conceito de binário motor.....	23
Figura 17 – Efeito da aplicação de binário na roda motora.....	24
Figura 18 – Sistema de transmissão de binário do pedaleiro à roda motora numa bicicleta....	25
Figura 19 – Dados da roda propulsora.....	31
Figura 20 – Curva do binário/rotação do motor Mxus 3k Turbo 3kW.....	32
Figura 21 – Forças envolvidas na <i>E-bike</i> num declive ascendente.	33
Figura 22 – Sistema de transmissão do pedaleiro à roda motora.	35
Figura 23 – Geometria de um quadro convencional.....	43
Figura 24 – Geometria do quadro.....	44
Figura 25 – Altura da perna do ciclista.	46
Figura 26 – Dimensão da perna do ciclista e tamanho de bicicleta mais adequado.....	46
Figura 27 – Compartimento que permite alojar a bateria.....	47
Figura 28 – Caixa para alojar o controlador.	47
Figura 29 – Forquilha oscilante de suporte da roda motora.	48
Figura 30 – Suporte do espigão do selim.	48
Figura 31 – Quadro completo.....	48
Figura 32 – Componentes da <i>E-bike</i>	49
Figura 33 – Motor Mxus 3k turbo 3kW.	50
Figura 34 – Célula da LG INR21700M50LT.....	51
Figura 35 – Agrupamento das células da bateria.....	52
Figura 36 – BMS 72V 20S.	53
Figura 37 – Esquema de ligações do BMS.....	53

Figura 38 – Controlador KLS7212S.....	54
Figura 39 – Ecrã APT 750c.....	55
Figura 40 – Acelerador Daytona.....	55
Figura 41 – O carregador ASI BAC355.....	56
Figura 42 – Roda traseira – lado do disco de travagem.....	58
Figura 43 – Roda traseira – lado do pinhão da transmissão.....	59
Figura 44 – Quadro montado.....	59
Figura 45 – Suspensão dianteira montada.....	60
Figura 46 – Amortecedor traseiro instalado.....	60
Figura 47 – Controlador.....	61
Figura 48 – Tomada de carregamento.....	62
Figura 49 – Extensão de cabo.....	62
Figura 50 – Proteções dos cabos no guiador.....	62
Figura 51 – Controlador.....	63
Figura 52 – Chave de ignição.....	63
Figura 53 – Ficha de carregamento.....	63
Figura 54 – Local de alojamento da bateria.....	64
Figura 55 – Bateria com proteção.....	64
Figura 56 – Interface do PC para a programação do controlador da <i>E-bike</i>	66
Figura 57 – Interface do PC para a programação do controlador da <i>E-bike</i> (cont.).....	66
Figura 58 – Interface do PC para a programação do controlador da <i>E-bike</i> (cont.).....	67
Figura 59 – Interface de programação do ecrã.....	67
Figura 60 – Imagem principal do ecrã.....	68
Figura 61 – Aspeto final da <i>E-bike</i> implementada.....	68
Figura 62 – Ecrã do Speedometer Odometer.....	71
Figura 63 – Percurso efetuado para conferir a autonomia da <i>E-bike</i>	74
Figura 64 – Distância percorrida e acumulado de subidas no percurso.....	74
Figura 65 – Cota em relação ao nível do mar em função da distância percorrida.....	74
Figura 66 – Estado da bateria após realização do teste.....	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de atrito de rolamento.	16
Tabela 2 – Coeficientes de atrito de rolamento.	19
Tabela 3 – Parâmetros do projeto.	29
Tabela 4 – Características do motor Mxus 3k turbo 3kW.	50
Tabela 5 – Célula da LG INR21700M50LT.	51
Tabela 6 – Caraterísticas do controlador KLS7212S.	54
Tabela 7 – Especificações ASI BAC355.	56
Tabela 8 – Componentes mecânicos da <i>E-bike</i>	57
Tabela 9 – Inclinação em diferentes pontos do percurso.	75

ABREVIATURAS E SIGLAS

APP's	Application (aplicação)
BLDC	Brushless Direct Current
BMS	Battery Management System (Sistema de gestão de bateria)
CM	Centro de Massa
DOD	Deep of Discharge
<i>E-bike</i>	Electric bike (ou bicicleta elétrica)
EUA	Estados Unidos da América
FER	Fontes de Energia Renovável
FOC	Field Oriented Control
GPS	Global Positioning System (sistema de posicionamento global)
IEA	International Energy Agency
IOS	iPhone Operating System (sistema operacional do iPhone)
IOT	Internet of Things
MCI	Motor de Combustão Interna
Peak oil	O pico máximo de capacidade produtiva de petróleo a nível global
Pedelec	Pedal Electric Cycle
rpm	Rotações por minuto
rps	Rotações por segundo
SOC	State of Charge (Estado de Carga)
SVPWM	Space Vector Pulse-Width Modulation

1. Introdução

A energia constitui um elemento crucial em todas as atividades e pode ser obtida a partir de fontes renováveis e/ou de fontes não renováveis. As fontes renováveis caracterizam-se por serem praticamente inesgotáveis como o Sol, o vento e a geotermia e outras por terem ciclos de renovação relativamente curtos, como os da biomassa ou da energia hídrica. As fontes não renováveis são as fósseis como o carvão, o petróleo e o gás natural, mas também o Urânio e o Tório e caracterizam-se por serem finitas, logo esgotáveis e com origem em processos de formação de milhões de anos [1].

As descobertas, primeiro da máquina a vapor no século XVIII e depois do motor de combustão interna (MCI) no final do século XIX, alimentadas com energia de origem fóssil à data abundante e barata, conduziram a Humanidade a uma espiral energívora sem precedentes. Porém, como essas fontes são finitas, algumas estavam disponíveis em territórios com regimes instáveis e envolvem a emissão de gases de efeito de estufa; desde muito cedo foram motivo de disputa e de sérios conflitos geopolíticos. Em consequência do seu uso intensivo, algumas fontes fósseis apresentam desde há alguns anos sinais de escassez. O pico na exploração de petróleo (*"Peak oil"*) foi atingido em 2010 e desde então a sua exploração tem vindo a diminuir à taxa próxima de 6% ao ano, com forte impacto sobre os mercados [2].

Mais recentemente, a conjugação dessa escassez com o aumento da procura pelas economias emergentes e os efeitos da guerra têm-se refletido na subida do preço, no agudizar de tensões geopolíticas e no agravamento das alterações climáticas, fenómenos que estão a impor uma nova ordem energética mundial. O século XXI está a ser um período de transição para uma economia energética cada vez mais descarbonizada, com contributo crescente de fontes de energia renováveis (FER) e no uso da eletricidade como vetor de transporte energético com relevância crescente [3].

O setor de transportes terrestres, marítimos e aéreos constitui ainda hoje um dos maiores consumidores de energia de origem fóssil, sendo responsável por cerca de dois terços do total das emissões de gases de efeito de estufa e com tendência para aumentar se nada for feito em sentido contrário. Porém, na última década assistimos a uma diversificação crescente na captura de energia primária, com relevância para as fontes eólica e solar e à sua conversão em eletricidade. Estima-se que em 2022, cerca de 22% do total da energia consumida no planeta seja já de origem renovável, esperando-se que este rácio continue a crescer à taxa de 10% por década, em detrimento da componente fóssil e que se alcance a paridade por volta de 2050. Há, porém, alguns países onde o peso da componente renovável na produção de eletricidade é já muito superior e assim, à medida que cada vez mais eletricidade é produzida com FER e transportada através das redes de forma desmaterializada, é natural que as cargas transitem para o novo vetor energético [4].

Neste processo, a mobilidade elétrica, que teve um disparo da viabilidade com o avanço tecnológico nas tecnologias de armazenamento de energia e a disrupção introduzida por novos fabricantes no setor automóvel, primeiro em meio urbano, que obrigaram toda a indústria tradicional a adaptar-se, irá ter um grande impacto. Mas este movimento está também já a estender-se ao setor dos transportes pesados, fluviais e marítimos e dá os primeiros passos na aviação. Um movimento imparável que consumirá cada vez mais eletricidade e menos combustíveis fósseis [5].

Nos sistemas de transportes em meio urbano, há ainda outros fatores que contribuem para acelerar esta transição. A população mundial reside cada vez mais em grandes cidades que têm vindo a ficar congestionadas com veículos ineficientes, emissores de gases poluentes e de ruído, que ocupam muito espaço e que acarretam um elevado custo de posse. Este problema foi ainda agravado com as crises recentes que provocaram um aumento dos preços dos combustíveis, a diminuição do poder de compra, sobretudo dos jovens e a adoção de medidas penalizadoras do transporte individual com mais taxas na circulação e no estacionamento. Por isso, têm vindo a ser melhoradas muitas infraestruturas para promover o transporte coletivo mais eficaz e o uso de veículos de duas rodas de baixo custo com propulsão muscular, assistida eletricamente ou puramente elétrica.

1.1 Transição para sistemas de mobilidade suave

Devido às razões acima referidas, observa-se cada vez mais nos centros urbanos a adoção de sistemas de mobilidade suave com predominância para trotinetes elétricas, bicicletas elétricas com pedalada assistida e de bicicletas com a possibilidade de circular com propulsão exclusivamente elétrica e utilizadas em cidades com maiores declives. Estas soluções caracterizam-se por darem resposta a uma grande parte das necessidades de mobilidade, sobretudo da população mais jovem e por requererem menor espaço para circulação e estacionamento, muito menor consumo de energia, sem ruído, sem emissão local de gases de efeito de estufa, muito menor custo por quilómetro e ainda por permitirem ao utilizador maior liberdade nos horários de deslocação e escolha de trajetos. São inúmeras as empresas que adaptam a sua oferta com produtos a este segmento, bem como as cidades que interditaram o automóvel a muitas zonas e criaram ciclovias e parques de estacionamento para bicicletas a fim de facilitar e de dar segurança a quem opta por este meio de deslocação e facilitar a intermodalidade. Além das vantagens já referidas, o uso de bicicletas elétricas e assistidas promove ainda ganhos em saúde sem deixar de ter o seu carácter divertido [6].

1.2 Objeto da dissertação

O trabalho descrito nesta dissertação situa-se no domínio dos veículos de duas rodas com propulsão eletricamente assistida e voltado para o nicho dos desportos de aventura em *outdoor*. Consistiu na conceção e implementação de uma bicicleta elétrica de alto desempenho (*E-bike*) robusta e com capacidade para circular também em trilhos de montanha.

De acordo com a legislação europeia, transposta para a legislação nacional pelo Decreto-Lei n.º 102-B/2020, uma bicicleta elétrica para uso em meio urbano (*street E-bike*) pode incorporar hoje um motor elétrico com até 1000W e por razões de segurança o seu sistema de controlo deverá interromper o auxílio à propulsão quando é atingida a velocidade de 25 km/h ou o ciclista deixar de pedalar [7].

A potência da nossa *E-bike* excede esse valor e por isso a sua concretização sai fora dessa legislação. Mas esta terá que assegurar elevada segurança ao utilizador integrando rodas e pneus robustos e um sistema eficaz de suspensão e de travagem para suportar fortes embates sem comprometer o seu controlo. A *E-bike* assenta essencialmente no conceito de uma bicicleta tradicional, na qual foi incorporada uma bateria, um controlador, um motor elétrico para auxílio na propulsão e alguma aparelhagem de controlo e supervisão, constituindo um sistema com arquitetura híbrida paralela onde a propulsão pode ser efetuada simultaneamente pelo utilizador com o apoio do sistema elétrico de propulsão e de regeneração da *E-bike*.

A velocidade máxima de projeto com apoio do pedaleiro será de 40 km/h e a autonomia em modo elétrico assistido em terrenos acidentados deverá ser da ordem dos 80 km.

1.3 Organização da dissertação

Este documento está estruturado em 8 capítulos e 4 anexos. Neste primeiro, é efetuada uma descrição da importância da eletrificação dos veículos de duas rodas, do conceito genérico de *E-bike* de alto desempenho e dos principais objetivos a atingir.

No **capítulo 2** efetua-se uma breve abordagem da evolução histórica das *E-bikes* e das vantagens da sua utilização como meio de mobilidade sustentável.

No **capítulo 3** é feito o estudo cinemático do veículo de duas rodas, expondo os passos a ter em conta para encontrar os parâmetros necessários bem como as diferentes formas de alcançar elevada eficiência energética.

No **capítulo 4** é exposto o projeto do sistema propulsor da *E-bike* a partir do desempenho e autonomia que se pretende alcançar. Esse trabalho assenta nos fundamentos cinemáticos que justificaram os parâmetros técnicos e a seleção dos componentes para integração no projeto, incluindo o sistema pedaleiro, o perfil das rodas e dos pneus, a potência do motor elétrico e do controlador, a capacidade da bateria, as características do sistema de gestão da bateria (BMS), os sistemas de travagem e de suspensão e os sistemas de controlo e supervisão dos parâmetros de funcionamento.

No **capítulo 5** são descritos os requisitos do quadro da *E-bike* para albergar os componentes do sistema propulsor, nomeadamente a bateria, o BMS e o controlador, identificados no capítulo 4.

No **capítulo 6** é descrita a seleção e a montagem dos componentes e dos processos necessários para a concretização da *E-bike*, sendo também exposta uma estimativa do custo total de implementação do protótipo.

No **capítulo 7** são expostos os resultados dos testes reais com a *E-bike* implementada, nomeadamente a validação da velocidade máxima alcançável no plano horizontal e em subidas com diferentes declives, tanto com propulsão só do ciclista, como elétrica pura e híbrida. São ainda realizados testes para aferir a máxima autonomia alcançável bem como dos consumos de eletricidade e das emissões ambientais indiretas associadas.

No **capítulo 8** são expostas as conclusões e fazem-se algumas considerações sobre áreas críticas a serem alvo de maior atenção em possíveis trabalhos futuros.

Nos quatro anexos expõem-se as características técnicas dos principais componentes utilizados.

2. Evolução histórica das *E-bikes*

As primeiras bicicletas elétricas apareceram logo a seguir à descoberta dos componentes (motores elétricos e baterias) que as tornaram possíveis e com as primeiras patentes registadas em França e nos Estados Unidos da América (EUA) na década de 1880.

O primeiro registo francês é da Engenhoca Elétrica em 1882, um velocípede que integrava um motor elétrico de corrente contínua controlado por uma alavanca manual e sem pedais [8].

Em 1895, o inventor Ogden Bolton Jr. patenteou uma das primeiras *E-bikes* nos EUA. Essa integrava um motor elétrico no cubo da roda traseira, uma bateria de chumbo-ácido de 10 Volts e um sistema de controlo da tensão DC a aplicar ao motor [9].

Em 1897, Hosea W. Libbey de Boston registava uma *E-bike* que integrava o motor elétrico já no cubo do eixo pedaleiro e uma bateria de chumbo-ácido volumosa, Figura 1 [10].

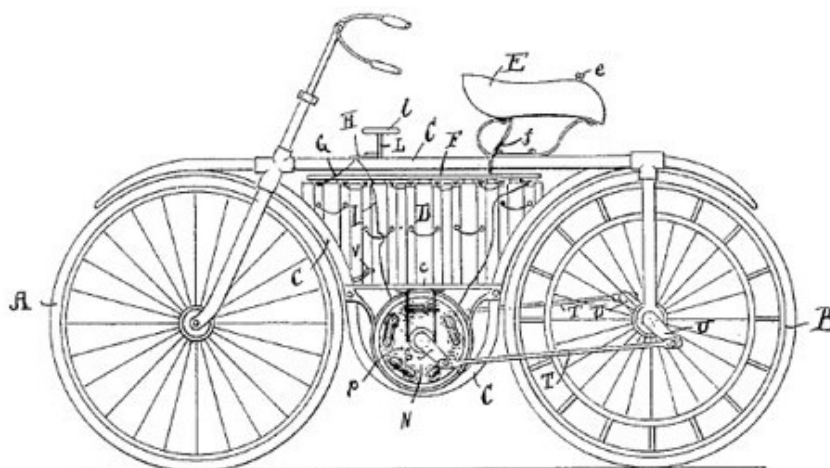


Figura 1 – *E-bike* de Hosea W. Libbey já com motor elétrico no pedaleiro. Fonte: [10].

Também em 1897, a empresa francesa Humber Company desenvolvia uma bicicleta elétrica para dois ocupantes (conceito *tandem*) e existem relatos de que esta participou na corrida Bol d'Or de 1899 em Paris. Esta *E-bike* possuía pedais para cada ciclista, bateria de chumbo-ácido, motor de 750 W e atingia a velocidades de 64 km/h, ver Figura 2 [11].

Em 1899, John Schnepf patenteou uma *E-bike* com bateria de chumbo-ácido que usava um motor elétrico que transmitia o acionamento à roda propulsora traseira através de contacto por fricção de uma polia ligada ao veio do motor sobre o pneu dessa roda [9].

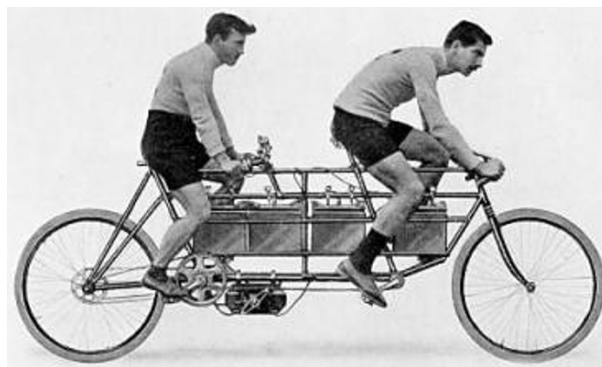


Figura 2 – *E-bike* da Humber Company para dois ocupantes. Fonte: [11].

Já em 1932, a Philips e a Simplex cooperavam no desenvolvimento de uma *E-bike* sem pedais, com um quadro em aço e uma grande bateria de chumbo-ácido. Essa possuía farol dianteiro, campainha, suspensão do assento e para-lamas [8].

Um grande salto – motor na roda

Com a evolução tecnológica no século XX e sobretudo com o surgimento de baterias químicas que permitiam maior densidade de energia, as *E-bikes* foram sendo aperfeiçoadas permitindo melhorias contínuas no desempenho; com produtos cada vez mais leves e com maior autonomia. Os japoneses da Sanyo entraram neste mercado e ofereciam, já em 1975, *E-bikes* com baterias de chumbo-ácido e logo a seguir com NiCd, ver Figura 3. Estas integravam uma bateria facilmente removível, localizada próximo do centro de massa da bicicleta, controlador eletrônico e motor elétrico na roda traseira ou na dianteira.



Figura 3 – *E-bike* urbana da Sanyo de 1989. Fonte: [12].

Uma importante inovação introduzida nas *E-bikes* por volta de 1989, foi o Pedelec (*Pedal Electric Cycle*) comumente conhecido por sistema de pedalada assistida e que implementava um modo de propulsão híbrido paralelo, onde a potência de propulsão é fornecida conjuntamente pelo ciclista e pelo sistema elétrico de apoio. Neste sistema, a potência debitada pelo motor elétrico é proporcional ao esforço aplicado no pedaleiro pelo ciclista e a ajuda elétrica pode ser selecionada em função do declive do percurso, com grande impacto na redução do esforço despendido pelo utilizador e na autonomia da *E-bike*. Esta solução permitia alargar grandemente o leque de uso das *E-bikes*, pois possibilitava que estas fossem muito mais cómodas em declives acentuados [8].

A partir dos anos 90, assiste-se a dois fenómenos simultâneos que aceleram ainda mais o interesse por sistemas de mobilidade elétrica. Por um lado, de cariz tecnológico, por outro de cariz económico, resultante do aumento do custo dos transportes devidos ao disparo generalizados dos preços, da energia de origem fóssil em particular e das dificuldades de circulação e de estacionamento em zonas urbanas de elevada densidade.

No domínio tecnológico, assistiu-se a um grande avanço nas áreas da eletrónica de potência, com redução simultânea dos preços nos controladores, motores elétricos e sensores assim como das baterias com aumento da capacidade e possibilitando sistemas mais leves e com maior autonomia. Todas estas evoluções tornaram possível disponibilizar *E-bikes* com elevados desempenhos e os utilizadores manifestaram de imediato grande interesse nesses produtos. Isso levou a China e outros países a iniciarem a produção em massa de *kits* constituídos por bateria, controlador, motor elétrico integrado no cubo da roda, sensores e aparelhagem de comando que tiveram um grande impacto no disparo do interesse pelas *E-bikes* [13]. Aproveitando também a expansão do comércio *on-line* que disparou nessa altura, os fabricantes passaram a disponibilizar os seus produtos via Internet e possibilitaram a qualquer pessoa poder implementar a sua *E-bike*, existindo hoje milhares de sítios ativos a oferecer este tipo de produtos.

Na Figura 4 exhibe-se uma *E-bike* implementada em 2008 na ESTGV e que resulta desse movimento. Esta assentou numa bicicleta Focus tradicional onde foram integrados os componentes de um *kit* da BionX (<https://www.bionx.ca/>) constituído por bateria com células de NiMH, controlador com três níveis de assistência de potência, consola de comando e motor elétrico BLDC de 250 W integrado no cubo da roda traseira de 26 polegadas.



Figura 4 – Conversão de bicicleta tradicional em *E-bike* com kit da BionX. Fonte: [14].

Ultrapassar limitações - motor no pedaleiro

Todavia o inconveniente da integração do motor elétrico no cubo da roda é o incremento significativo do seu peso e do momento de inércia angular bem como da deslocação do centro de massa da *E-bike* da zona central para a retaguarda. Para uso em pisos regulares esses fatores têm pouca relevância, mas para quem pretendia uma *E-bike* para um uso de alto desempenho desejava um produto com outras características. Estes aspetos levaram alguns fabricantes a iniciar o desenvolvimento de motores elétricos compactos para integrar no centro de massa da bicicleta e mais concretamente no cubo do pedaleiro. Os maiores fabricantes neste domínio são hoje a Bosh, a Shimano, a Yamaha, a Toshiba e a Brose. Na Figura 5 exibe-se uma *E-bike* com um motor desta tipologia. Ao contrário dos *kits* com motor na roda, que podem ser aplicados em qualquer bicicleta, com esta solução o quadro tem que ser concebido para alojar o motor e a bateria.

Com a massificação da produção destes motores, de controladores, das baterias e da instrumentação de comando, os preços tornaram-se de tal modo competitivos que não existe hoje praticamente nenhum fabricante de bicicletas que não disponibilize *E-bikes* que não integrem componentes de um dos fabricantes acima referidos. Na Figura 5 expõe-se uma *E-bike* atual que pouco se diferencia dos modelos comuns, estando a bateria, o controlador e o motor devidamente integrados na sua estrutura.



Figura 5 – TREK Powerfly 7 com motor elétrico integrado no pedaleiro. Fonte: [15].

O movimento em curso no desenvolvimento de bicicletas elétricas assistidas, tem provavelmente na Urtopia um dos seus expoentes máximos. Trata-se de uma *E-bike* com estrutura de Carbono ultraleve, que pesa apenas 15 kg, citadina, com velocidade máxima assistida de 32 km/h e autonomia de até 100 km. Mas o que a diferencia mais é a integração de múltiplos sensores tonando-a num dispositivo *IOT* (*Internet of Things*) automatizado e ligado à Web e que inclui acelerómetro, giroscópio, GPS, sensores de binário, gestão de energia, etc com ligação a APP's em Android e/ou IOS. Na Figura 6 expõe-se a Urtopia Carbon One [16].



Figura 6 – Urtopia smart *E-bike* com motor elétrico na roda motora. Fonte: [16].

Num outro nicho a alemã Riese & Müller aposta não só no desenvolvimento de *E-bikes* tradicionais como também em bicicletas elétricas de carga adaptáveis a múltiplos fins. Estas estão a ter uma boa aceitação nos países nórdicos, Holanda, Alemanha, França, etc, com modelos concebidos para distribuição de mercadorias em zonas onde é proibido o automóvel e adaptadas inclusive para o transporte de crianças. Na Figura 7 ilustra-se o modelo Load 75 vario deste fabricante [17].



Figura 7 – Riese & Müller modelo Load 75 vario. Fonte: [17].

Na sequência destas evoluções as *E-bikes* têm vindo a desencadear maior atração nos mercados tradicionais no uso de bicicletas e a crescer de uma forma muito expressiva.

2.1 Outros fatores impulsionadores das *E-bikes*

A expansão das cidades nas últimas décadas trouxe grandes desafios à harmonia entre crescimento e infraestruturas. Os espaços tornaram-se exíguos para acomodar o número de pessoas e de veículos motorizados que neles coexistem. Em face do aumento dos preços da energia de origem fóssil, requerem-se também meios de transporte alternativos que possam reduzir essa pressão. Durante décadas a resposta foi a venda de automóveis no mundo ocidental e de veículos de duas rodas motorizados no Oriente. Mas a redução no uso do automóvel e de veículos de duas rodas altamente poluentes tornaram-se imperativas para agilizar a mobilidade, baixar as emissões, o custo das deslocações e promover qualidade urbana.

Muitos governos têm vindo a promover sistemas de mobilidade sustentável com recurso crescente ao transporte coletivo, mobilidade elétrica e sistemas de mobilidade suave que garantam menor consumo de energia por quilómetro e que essa energia seja de origem renovável e com elevada segurança.

Nas deslocações de curta distância as trotinetes e as bicicletas elétricas têm vindo a conquistar espaço. O seu uso tem, do ponto de vista energético e económico, menores custos do que o uso de qualquer outro meio de transporte, para além da diminuição da poluição sonora e emissão de gases nocivos [18].

2.2 Vantagens para a saúde com uso da *E-bike*

Podem enunciar-se as seguintes vantagens para os utilizadores de bicicletas e das *E-bikes* em particular:

Saúde – A simples rotina de pedalar pode dar um excelente contributo, como exercício físico o qual promove o aumento do tónus muscular, combate o excesso de peso, a diabetes e as doenças cardiopulmonares que têm vindo a aumentar.

Tempo – Para muitos cidadãos pedalar até ao local de trabalho poderia tornar a deslocação mais rápida do que ir de carro, usando ciclovias, ou ser mais ágil no trânsito, minimizando o tempo de procura de estacionamento e ainda o seu custo.

Economia – Após o investimento com a aquisição da *E-bike* e dos equipamentos como capacete e luvas, esta torna-se o modo mais económico de transporte na cidade.

Ecologia – Todos os meios de transporte têm impacto no meio ambiente, mas ao utilizar-se um transporte que não consome energia de origem fóssil não há emissão poluentes, logo não se contribui para o aumento de problemas respiratórios. Num percurso normal, uma bicicleta comum exige um dispêndio médio de energia do utilizador de cerca de 26,29 kcal/km, enquanto que se for com uma *E-bike* esse é da ordem dos 10,33 kcal/km. Com uma trotinete elétrica é de cerca de 9,61 kcal/km e numa simples caminhada despendemos cerca de 52,58 kcal/km. Num automóvel citadino médio gastamos cerca de 326,97 kcal/km e num carro elétrico cerca de 148,42 kcal/km. Comparando estes valores constatamos que a bicicleta surge em segundo lugar no consumo energético de deslocação do utilizador [13].

2.3 Penetração das *E-bikes* na Europa e pelo mundo

Com as preocupações ambientais e de saúde crescentes, os governos e as organizações internacionais têm vindo a promulgar normas de limitação das emissões o que leva à contínua expansão do mercado das *E-bikes*. Este foi avaliado em 26.730 milhões de US\$ em 2021 e estima-se que alcance 53.530 milhões de US\$ em 2027, e demonstrando assim um crescimento superior a 12% neste período [13].

A produção de bicicletas constitui também na Europa uma das indústrias mais dinâmicas, sendo hoje Portugal o maior fabricante europeu. Segundo previsões da *Cycling Industries Europe* o mercado das *E-bikes* continuará a crescer em detrimento da redução nas vendas de bicicletas tradicionais (ver áreas a azul e a verde na Figura 8) e terá só neste continente um crescimento nas vendas da ordem dos 17 milhões de Euros entre 2020 e 2030 [19].

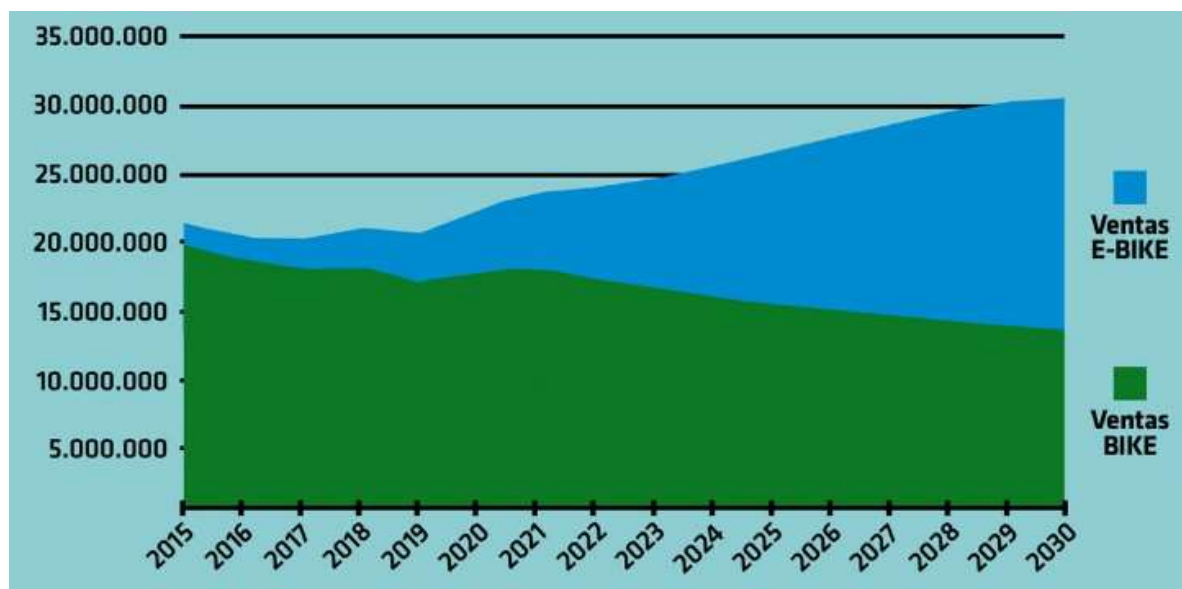


Figura 8 – Penetração da evolução das vendas de bicicletas tradicionais e *E-bikes* na Europa.
Fonte: [19].

Segundo dados recentemente divulgados pela IEA (*International Energy Agency*) os veículos elétricos de duas e de três rodas (triciclos motorizados) têm vindo a exibir nos últimos anos uma elevada inserção no mercado, especialmente na Ásia, ver Figura 9.

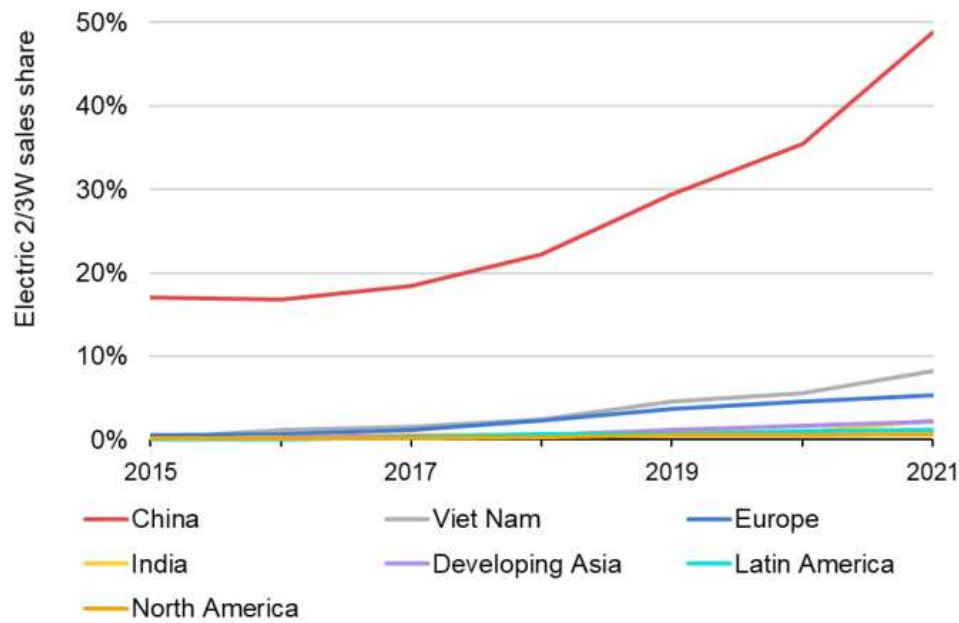


Figura 9 – Penetração de veículos elétricos de duas e de três rodas pelo mundo. Fonte: [20].

Espera-se que a Europa continue a desempenhar também um papel de destaque neste mercado, tendo como principais fatores a natureza inovadora do produto assente na tecnologia das baterias, em motores e controladores integrados no quadro, no *design* atraente e no uso de novos materiais onde se aguardam boas notícias em torno do Grafeno.

3. Cinemática do veículo de duas rodas

A cinemática tem origem no vocábulo grego “*kinema*” que significa movimento e integra a mecânica clássica, um campo da física que descreve o comportamento dos corpos. Esta define as condições, no nosso caso de uma bicicleta, que regem o seu comportamento dinâmico, permitindo calcular em cada instante o somatório das forças que atuam sobre ela e que determinam a aceleração, velocidade instantânea, espaço percorrido e posição ocupada num dado referencial [21].

3.1 Forças atuantes sobre um veículo

Podemos considerar que sobre um veículo atuam forças de dois tipos (Figura 10). A força resistente (\vec{F}_R), descrita em 3.2, que resulta da soma de várias componentes dependentes dos parâmetros intrínsecos do veículo como a sua massa, os momentos de inércia angular, tipo de rodas, de pneus e de peso, declive do percurso de circulação, etc, e a força motora (\vec{F}_M) descrita em 3.3, que é aplicada por algum tipo de fonte de energia mecânica e responsável pelo movimento.

Segunda lei de Newton

A segunda lei de Newton diz-nos que a força atuante sobre um corpo é igual à taxa de variação do seu momento linear no tempo [22].

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad [1]$$

Onde:

\vec{F} – Força aplicada em Newton (N);

m – Massa do corpo em quilogramas (kg);

\vec{a} – Aceleração do corpo em metro por segundo ao quadrado (m/s^2).

Da expressão anterior podemos deduzir que a aceleração de um corpo é diretamente proporcional à força exercida sobre ele e inversamente proporcional à sua massa.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad [2]$$

Para otimizar o desempenho dinâmico de qualquer veículo é necessário compreender os efeitos das forças que interagem sobre ele. Assim, a sua aceleração é dependente do somatório das forças que interagem sobre ele e da sua massa instantânea.

Na Figura 10 ilustram-se a força motora e as forças resistentes acima referidas que atuam sobre um veículo de duas rodas em movimento.

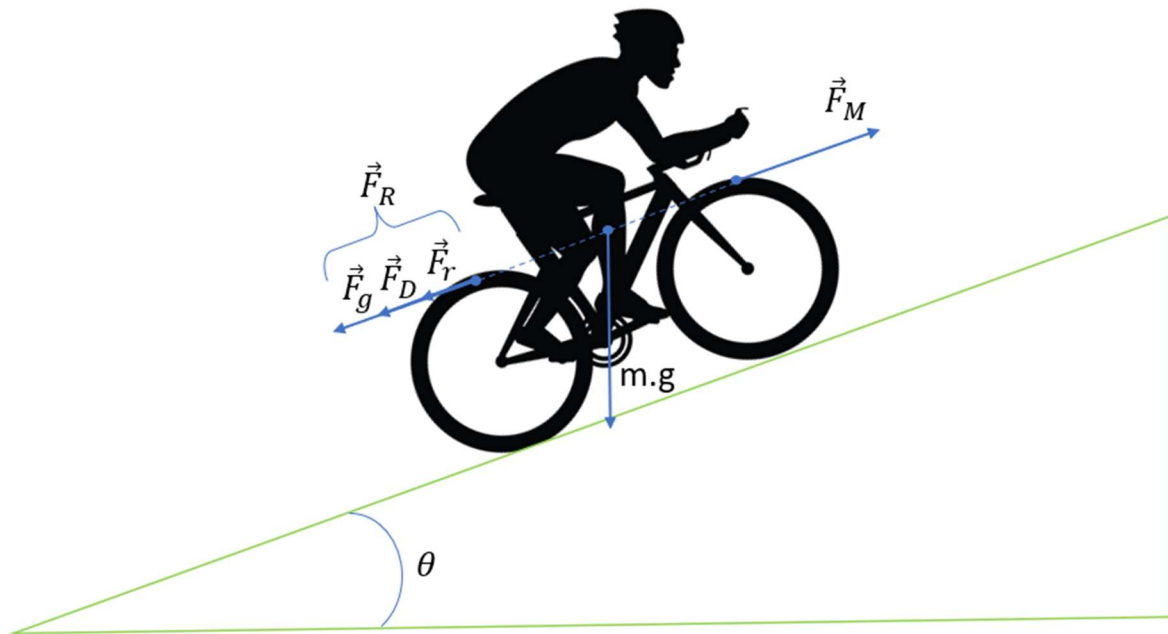


Figura 10 – Forças que atuam sobre uma bicicleta em movimento. Fonte [23].

Força propulsora

O conceito de força propulsora (\vec{F}_P) resulta da subtração das forças resistentes (\vec{F}_R) à força motora (\vec{F}_M) e o seu valor pode ser positivo, nulo ou negativo, expressão (3).

$$\vec{F}_P = \vec{F}_M - \vec{F}_R \quad [3]$$

E tendo em consideração a expressão (2) podemos afirmar que:

Se $\vec{F}_P > 0$ – temos movimento acelerado;

Se $\vec{F}_P = 0$ – temos movimento com velocidade constante ou nula (corpo imobilizado);

Se $\vec{F}_P < 0$ – temos movimento desacelerado.

3.2 Forças de resistência ao deslocamento

As forças de resistência ao deslocamento são de quatro tipos: força de resistência de rolamento, força de atrito aerodinâmico, força gravítica e força de inércia linear e angular.

$$\vec{F}_R = \vec{F}_r + \vec{F}_D + \vec{F}_g + \vec{F}_i \quad [4]$$

Onde:

\vec{F}_R – Força de resistência ao deslocamento;

\vec{F}_r – Força de atrito de rolamento;

\vec{F}_D – Força de atrito aerodinâmico;

\vec{F}_g – Força gravítica;

\vec{F}_i – Força de atrito inercial.

- **Força de atrito de rolamento**

A força de atrito de rolamento (\vec{F}_r) é devida à fricção dos pneus do veículo com a via onde circula. Contribuem para esta o tipo de pneu, a sua pressão e o seu diâmetro, o tipo do piso, o peso sobre ele e outras variáveis com menor importância como a temperatura, sendo estes fatores representados pelo coeficiente de atrito de rolamento (f_r) explicitado na expressão (6).

A aplicação de carga (P) sobre o pneu provoca, na zona de contacto com o piso, uma deformação que depende do peso e da sua pressão. Quando imobilizado, a força de reação do piso ao peso está na linha vertical que passa pelo eixo da roda, mas quando em deslocamento essa reação (P_z) sofre um desvio (d) de avanço no sentido do deslocamento, obrigando ao fornecimento de um binário motor extra para compensar essa força de resistência. A Figura 11 ilustra este comportamento.

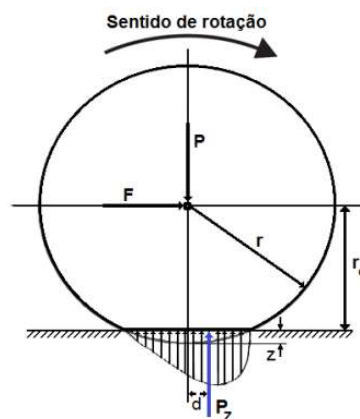


Figura 11 – Deflexão do pneu e motivo da resistência ao rolamento. Fonte: adaptada de [24].

Num plano horizontal, a força de resistência ao deslocamento é diretamente proporcional ao peso (P) e à deformação (d) e inversamente proporcional ao raio da roda (r).

$$\vec{F}_r = \vec{P} \times \frac{d}{r} \quad [5]$$

Coefficiente de atrito de rolamento

Define-se por *coeficiente de atrito de rolamento* (f_r) o exposto em (6) e este depende linearmente da deformação (d) do pneu e é inversamente do seu raio (r).

$$f_r = \frac{d}{r} \quad [6]$$

O f_r explicita assim um valor real que quantifica a relação entre a força de tração que é necessário aplicar, relativamente ao peso incidente, para que o veículo se desloque com velocidade uniforme num plano horizontal. Na Tabela 1 expõem-se coeficientes f_r para diversas situações de rodas, tipos de pneus e de pisos.

Tabela 1 – Coeficientes de atrito de rolamento. Fonte: [24].

Tipos de rodas/pneus	Tipo de piso	Valor de f_r
Roda de metal	Carris de metal	0,0002 a 0,002
Pneus especiais do carro solar da Michelin	Pista de autódromo	0,0025
Pneus de bicicleta	Em rolos, a 120 psi e 50 km/h	0,0022 a 0,009
- Vittoria pista evo CS tubular		0,0022
- Michelin Pro 3 light SC		0,00272
- Continental GP 4000S		0,00307
- Vittoria Corsa CG Squadra Prof - tubular		0,00418
- Conti GP 3000		0,00488
- Schwalbe Montello 300	Em rolos, a 100 psi e 50 km/h	0,0083
Pneus de bicicleta	Piso de madeira	0,001
	Piso de betão	0,002
	Piso de alcatrão	0,004
	Piso de alcatrão áspero	0,008
Pneus de automóvel	Piso de betão	0,01 a 0,015
	Piso de alcatrão	0,03
	Piso areia sólida	0,04 a 0,08
	Piso em areia solta	0,2 a 0,4

A pressão do pneu, o diâmetro da roda e o tipo de piso têm uma grande influência na resistência ao rolamento. Por exemplo, quanto maior for a pressão, menor é a deformação e menor a resistência ao rolamento.

A constituição do pneu tem também influência na resistência ao rolamento, pois quanto menos material é usado menos há para ser deformado. E quanto mais flexível for esse material menos energia é dissipada na deformação. É por isso que os pisos lisos (*slick*) rolam melhor que pisos com saliências em alcatrão liso [25].

Como se pode observar na primeira linha da Tabela 1, o menor coeficiente de atrito de rolamento é alcançado com a roda de metal sobre carris de metal, ou pelo transporte ferroviário, pois com esta solução a deformação da roda é desprezível e a força necessária para manter o movimento é a mínima possível. Os coeficientes de atrito de rolamento mais elevados são constatados quando o deslocamento é realizado sobre pisos de areia solta.

A expressão genérica da força de atrito de rolamento para a circulação num plano com inclinação θ com a horizontal é dada pela expressão (7).

$$\vec{F}_r = \vec{P} \times f_r \times \cos(\theta) \quad [7]$$

Onde:

\vec{F}_r – Força de atrito de rolamento em Newton (N);

$\vec{P} = (m.g)$ – Peso aplicado no centro da roda em Newton (N);

f_r – Coeficiente de atrito de rolamento (número real);

θ – Ângulo de inclinação do plano do deslocamento com a horizontal.

● Força de atrito aerodinâmico

A força de atrito aerodinâmico ou de arrasto (*drag coefficient*), é devida à fricção do perfil do veículo mais o ciclista com o ar e pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2} \times \rho \times A_f \times C_D \times (\vec{v} - \vec{v}_w)^2 \quad [8]$$

Onde:

\vec{F}_D – Força de atrito aerodinâmico em Newton (N);

ρ – Densidade do ar em quilograma por metro cúbico (kg/m^3);

A_f – Área frontal do veículo em metros quadrados (m^2);

C_D – Coeficiente de atrito aerodinâmico ou de arrasto (número real);

\vec{v} – Velocidade do veículo em metros por segundo num dado referencial (m/s);

\vec{v}_w – Velocidade do vento em metros por segundo no mesmo referencial de v (m/s).

Densidade do ar (ρ)

A densidade do ar é uma grandeza cujo valor depende da sua temperatura, humidade, pressão atmosférica e altitude. Esta é máxima ao nível do mar com baixas temperaturas e o seu valor vai diminuindo com o aumento da altitude e da temperatura. Como aproximação consideramos que à pressão de 1 Atmosfera (próxima de 1020 hPa) e à temperatura ambiente (20 °C) o seu valor é de 1,2 kg/m³ [26].

Área frontal (A_f)

A área frontal é definida em metros quadrados e refere-se à superfície plana de embate do ciclista mais a bicicleta com o ar. Enquanto que a bicicleta é indeformável, o ciclista pode optar por diferentes posições com vista a minimizar essa área, como se ilustra na Figura 12, onde para a mesma bicicleta/ciclista varia entre os 0,423 m² e os 0,339 m² proporcionando o poder de alcançar maior velocidade com o mesmo esforço despendido.

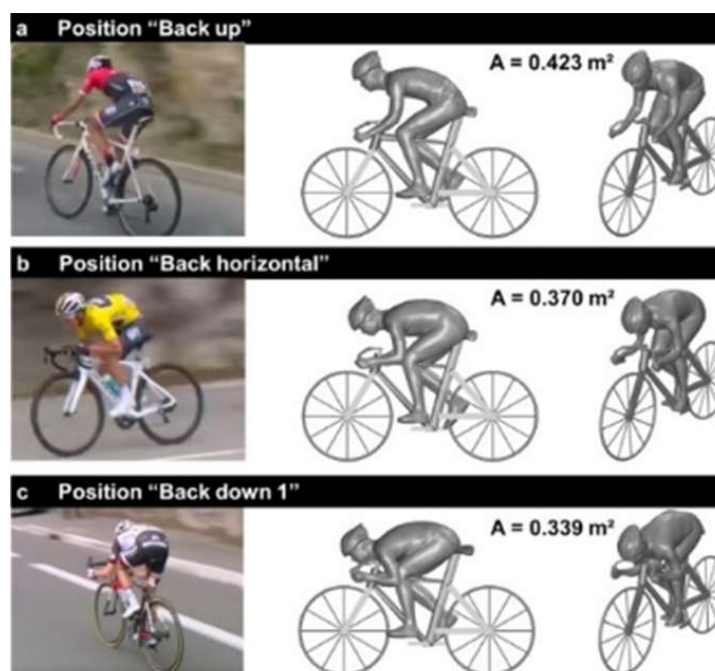


Figura 12 – Como melhorar o parâmetro área frontal (A_f). Fonte: [27].

Coeficiente de atrito aerodinâmico (C_D)

O coeficiente de atrito aerodinâmico ou de arrasto (C_D) é um valor real que permite calcular a força de resistência exercida pelo ar num dado objeto, sempre que esse se desloca no seu seio. Depende essencialmente do perfil ou do modo como o objeto “corta” o ar sem causar grande turbulência. Como se pode observar pela Figura 13, no caso das bicicletas, este coeficiente pode ser mitigado com um melhor *design* de todos os componentes, bem como da postura do ciclista e do vestuário e capacete que este usa [28].




Bicicleta <i>standard</i> com condutor	Coefficiente de resistência aerodinâmica (C_D)
	1,1
	1,0
	0,88

Figura 13 – C_D para diferentes posições do ciclista. Fonte: [24].

A força de atrito aerodinâmico pode ser minimizada atuando simultaneamente no valor da área frontal (A_f) e do coeficiente de arrasto (C_D), utilizando componentes que permitam uma melhor penetração no ar, tanto na bicicleta como no ciclista.

Se observarmos a expressão (8) constatamos que os únicos parâmetros onde um ciclista pode intervir para minimizar a força de atrito aerodinâmico a que está sujeito são a A_f e o C_D . Assim, é o produto destes dois parâmetros que interfere grandemente no melhor desempenho da pedalada. A Tabela 2 ilustra este conceito.

Tabela 2 – Coeficientes de atrito de rolamento. Fonte: [29].

Position	A (m ²)	C_d (-)	$C_d A$ (m ²)
Sprint regular	0.460	0.670	0.308
Sprint low	0.374	0.626	0.234
Back up	0.423	0.655	0.277
Back horizontal	0.370	0.638	0.236
Back down	0.339	0.655	0.222

A otimização destes parâmetros constitui uma grande preocupação das equipas envolvidas na competição nesta área.

• Força gravítica

A força gravítica manifesta-se na atração entre massas. No âmbito deste estudo, para bicicleta/ciclista, refere-se ao peso do conjunto o qual exprime a força (em Newton) com que a Terra atrai a massa do ciclista mais a bicicleta e que é calculada pelo produto da massa (em kg) com a gravidade terrestre ($9,8 \text{ m/s}^2$).

Quando um veículo se desloca num plano inclinado, a força gravítica pode ser de oposição ou de atrito se o veículo estiver a subir, como se pode observar na Figura 14, ou adjuvante (atrito negativo) se o veículo estiver a descer.

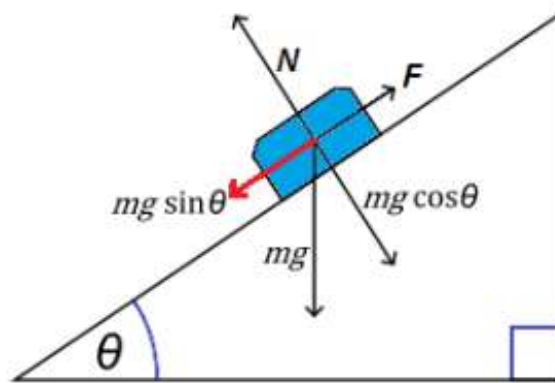


Figura 14 – Forças exercidas num veículo num plano inclinado. Fonte: [25].

Os elementos para o cálculo da força de atrito gravítico são:

$$\vec{F}_g = m \times \vec{g} \times \sin(\theta) \quad [9]$$

Onde:

\vec{F}_g – Força gravítica na direção do movimento em Newton (N);

m – Massa em quilograma (kg);

\vec{g} – Aceleração gravítica ($9,8 \text{ m/s}^2$);

θ – Ângulo de inclinação do plano do deslocamento com a horizontal.

Para mitigar o atrito gravítico a única possibilidade é a de desenvolver bicicletas com o menor peso possível, uma vez que este depende linearmente da massa. Por isso estas têm vindo a evoluir através do uso de componentes em aço, para o alumínio e outras ligas, depois para o Carbono e hoje cada vez mais para Carbono com Titânio e também já com o Grafeno [30].

● Força de atrito inercial

A primeira lei de Newton enuncia que um corpo permanece em repouso ou em movimento uniforme e retilíneo se a soma das forças que atuam sobre ele for nula e designa-se por inércia a reação que esse manifesta à alteração do seu estado [31].

Se o corpo estiver a deslocar-se com velocidade (m/s) numa trajetória retilínea, alterar o seu estado exige o fornecimento de energia para incrementar a sua velocidade ($dv/dt > 0$) ou extrair-lhe energia para a diminuir ($dv/dt < 0$). A sua energia cinética é $E_C = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ e estamos aqui a falar de inércia linear.

Se o corpo estiver a rodar com velocidade angular (rad/s) em torno de um eixo, modificar o seu estado exige também fornecer energia para incrementar essa velocidade angular ($d\omega/dt > 0$) ou extrair-lhe energia para a diminuir ($d\omega/dt < 0$). A energia cinética angular é dada por $E_C = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$, (com I = momento de inércia) e estamos aqui a falar de inércia angular.

O aumento da velocidade (e da energia cinética linear e angular) exige o fornecimento de energia ao sistema. Assim acontece com a aceleração de qualquer veículo. E para reduzir essa velocidade a energia tem que ser dissipada, sendo toda perdida ou parcialmente aproveitada com a travagem regenerativa nos veículos elétricos.

Na Figura 15 (à esquerda) expõe-se uma roda em movimento de translação onde todos os seus pontos se deslocam com velocidade V_c igual à do seu centro de massa (CM).

Na Figura 15 (ao centro) expõe-se uma roda com movimento de rotação puro onde os seus pontos se deslocam em trajetórias circulares em torno do CM/eixo de rotação com velocidade tangencial dependente da distância ao CM.

Na Figura 15 (à direita) expõe-se o rolamento típico de uma roda sobre piso onde há movimentos simultâneos de rotação e de translação. Podemos observar que a velocidade da roda no ponto (P) de contacto com o solo é nula (se não existir escorregamento), que a velocidade no centro da roda (CM) relativamente ao solo é V_c e de que no ponto mais afastado (P') é dupla da velocidade do CM/eixo.

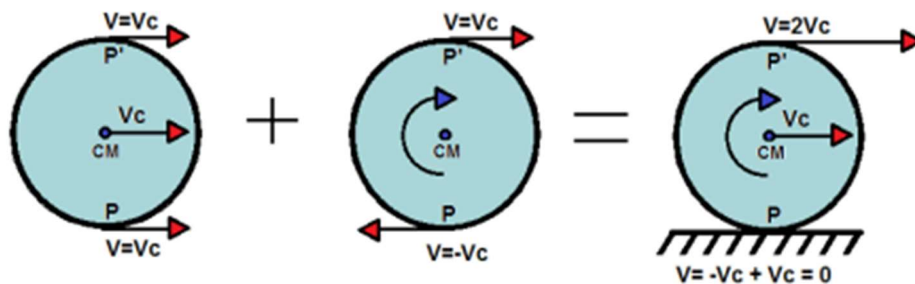


Figura 15 – Combinação dos movimentos de translação e de rotação. Fonte: adaptada de [31].

Todos os veículos com rodas possuem massas lineares que integram os componentes como quadro, guiador, assento, chassi, bloco do motor, etc. e partes rotativas como rodas, veios e rodas dentadas do sistema de transmissão, rotor do motor, etc. Estes são assim sistemas mistos onde há inércia linear que resulta da sua massa total mais inércia angular que resulta do somatório dos momentos de inércia de todas as partes rotativas.

Nos veículos de alto desempenho há a preocupação de minimizar ambas as inércias através da redução do peso e dos momentos de inércia de todos os componentes rotativos. Tal concretiza-se com uso de ligas leves alumínio e compósitos com fibra de carbono, jantes leves e de elevado diâmetro, pneus *tubeless* e de baixo perfil, veios ocos de aço ultrarresistente, rodas dentadas em titânio etc.

A análise rigorosa dos parâmetros de cada veículo que interferem com a sua inércia é complexa e sai fora do âmbito desta dissertação. Em modalidades como Fórmula 1, ralis e ciclismo, as marcas campeãs dispõem de equipas multidisciplinares que estudam exclusivamente estes aspetos que contribuem grandemente para o sucesso.

Conceito de fator de massa

Na nossa abordagem vamos apenas considerar que um veículo, no nosso caso uma bicicleta, possui uma massa linear, fácil de quantificar com uma simples balança e uma massa rotativa representada pelo fator de massa (δ) que integra o contributo das massas com inércias angulares no “agravamento” da massa linear. A expressão seguinte traduz o conceito.

$$\delta = \frac{J}{m \times r^2} \quad [10]$$

Onde:

δ – Fator de massa (valor real);

J – Momento de inércia equivalente de todas as partes rotativas do veículo (kg.m^2);

m – Somatório das massas das partes rotativas em quilogramas (kg);

r – Raio equivalente das massas rotativas do veículo, em metros (m)

Assim, deve ter-se em consideração que um veículo que envolva massas em translação e de rotação envolve dois tipos de atritos inerciais que se refletem na fase de aceleração em oposição ao movimento, exigindo o fornecimento de energia que fica acumulado sob a forma de energia cinética linear e angular responsável pelo movimento e que será depois necessário dissipar para reduzir a velocidade ou imobilizar esse veículo.

A força de inércia total

A força de inércia total é a soma das inércias linear (de translação) e angular (de rotação), expressa pela seguinte expressão:

$$\vec{F}_i = m \times \vec{a} \times \left(1 + \frac{J}{m \times r^2}\right) \quad [11]$$

Na prática a expressão (12) sintetiza este raciocínio.

$$\vec{F}_i = m \times \vec{a} \times (1 + \delta) \quad [12]$$

Para a maioria dos veículos o fator de massa (δ) é da ordem dos 2% a 10% (0,02 a 0,10) representando este parâmetro o acréscimo percentual da massa do veículo a ter em conta nos cálculos dinâmicos devido a possuir uma inércia rotativa.

3.3 Força motora

Como referimos em 3.1, a força motora (\vec{F}_M) responsável pelo movimento de um veículo é sempre produzida por uma fonte de energia mecânica. No caso da bicicleta tradicional essa é o sistema muscular do ciclista mais a força gravítica caso o movimento ocorra numa descida. Se for numa *E-bike*, além da componente gravítica, a força motora é a soma das componentes gerada pelos binários do ciclista e do motor elétrico.

O conceito de binário motor (ou torque)

O binário motor (ou torque) é uma grandeza vetorial gerada pela aplicação de uma força sobre um corpo que pode rodar em torno de um eixo. É recíproca, isto é, se aplicarmos força temos a produção de binário no eixo e se aplicarmos binário no eixo temos a produção de uma força tangencial. A Figura 16 ilustra este conceito.

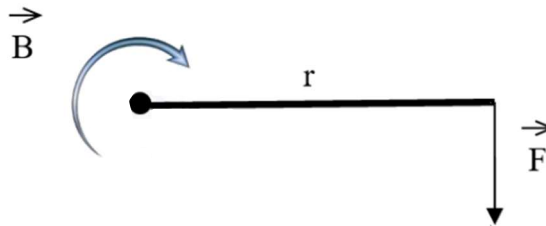


Figura 16 – Conceito de binário motor.

O valor do Binário é dado por:

$$\vec{B} = \vec{F} \times r \quad [13]$$

Onde:

\vec{B} – Binário em Newton metro (N.m);

\vec{F} – A Força aplicada em Newton (N);

r – Comprimento do braço em metros (m);

Em todos os veículos com rodas, a força motora é desenvolvida pela aplicação de binário motor nas suas rodas motrizes.

Aplicação de binário à roda motriz de um veículo

A aplicação de binário \vec{B} à roda motriz de um veículo traduz-se na geração de uma forma motora (\vec{F}_M) na área de contacto do pneu com o pavimento. Se não houver patinagem essa zona encontra-se imobilizada relativamente ao solo e há a geração de uma força impulsora (expressão 14) que é transmitida à estrutura do pneu e roda e ao centro de massa (ou veio) que está por sua vez ligado à estrutura do veículo, provocando a sua aceleração (expressão 2).

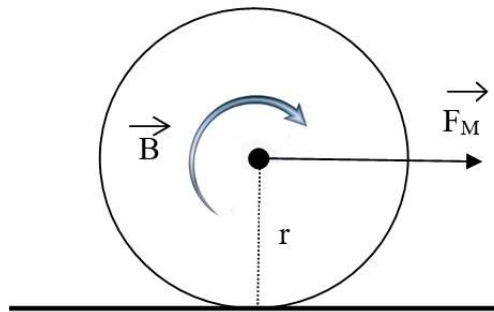


Figura 17 – Efeito da aplicação de binário na roda motora.

(\vec{F}_M) é dada por:

$$\vec{F}_M = \frac{\vec{B}}{r} \quad [14]$$

Onde:

\vec{F}_M – Força motora em Newton (N);

\vec{B} – Binário em Newton metro (N.m);

r – Raio da roda (m).

Transmissão de binário à roda motriz da bicicleta

A aplicação de binário à roda motriz de uma bicicleta tradicional é realizada com um sistema mecânico de transmissão de energia entre o pedaleiro e a roda, constituído por rodas dentadas e corrente (ou correia) de transmissão. No caso das *E-bikes* com motor elétrico no cubo da roda, o binário total é a soma do aplicado pelo ciclista mais o desenvolvido pelo motor elétrico que pode ser positivo (motor) ou negativo (resistente) quando em regeneração. Se o motor elétrico estiver localizado no pedaleiro é aí que ocorre a soma de binários, Figura 18.

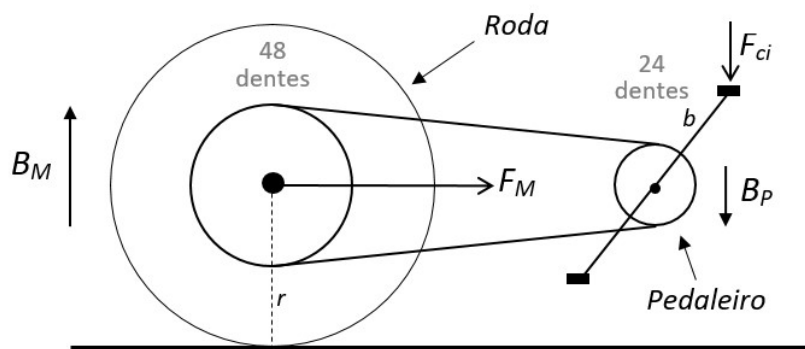


Figura 18 – Sistema de transmissão de binário do pedaleiro à roda motora numa bicicleta.

A produção do binário (\vec{B}_P) na roda pedaleira é dada pela seguinte expressão [33]:

$$\vec{B}_P \cong \frac{1}{2} \times \vec{F}_{Ci} \times b \quad [15]$$

Onde:

\vec{B}_P – Binário médio produzido no pedaleiro em Newton metro (N.m);

\vec{F}_{Ci} – Força média exercida pelo ciclista em Newton (N);

b – Distância desde o veio do pedaleiro até ao veio do pedal em metros (m).

Conceito de relação de transmissão (*Gear ratio*)

O diâmetro (ou o número de dentes) das rodas dentadas do pedaleiro e da motriz definem a relação de transmissão (G) que é dada pela expressão:

$$G = \frac{\text{Diâmetro ou nº de dentes no pedaleiro}}{\text{Diâmetro ou nº de dentes na roda motriz}} \quad [16]$$

Quando o diâmetro da roda dentada da roda motriz é superior ao do pedaleiro, essa tem maior perímetro e irá rodar com menor velocidade. A velocidade de rotação da roda motriz é assim dada por:

$$V_{Roda} = V_{Pedaleiro} \times G \quad [17]$$

Já a transferência de binário é dada por:

$$\vec{B}_{Roda} = \frac{\vec{B}_{Pedaleiro}}{G} \times \eta_T \quad [18]$$

Onde:

\vec{B}_{Roda} – Binário aplicado à roda motriz em Newton metro (N.m);

$\vec{B}_{Pedaleiro}$ – Binário produzido pelo ciclista no pedaleiro em Newton metro (N.m);

G – Relação de transmissão (*Gear ratio*);

η_T – Eficiência da transmissão mecânica entre o pedaleiro e a roda motriz.

Observação sobre o η_T

Cada pedal está ligado a um veio através de dois rolamentos e esse veio fixo à extremidade do braço do pedaleiro cujo veio é suportado por mais dois rolamentos. A roda motriz é também suportada por mais dois rolamentos. Há assim oito rolamentos envolvidos no sistema. A transmissão de força entre o pedaleiro e a roda motriz é efetuada por duas rodas dentadas ligadas por corrente ou correria dentada. Todos estes órgãos introduzem perdas de energia por fricção, que se manifestam sob a forma de perda de rendimento. O η_T representa a eficiência dessa transmissão e de acordo com as nossas pesquisas é da ordem dos 90% em sistemas de qualidade e devidamente lubrificados [33].

Concluimos assim que com uma G menor que 1 há uma diminuição da velocidade de rotação entre o pedaleiro e a roda motriz (expressão 17) e um aumento do binário aplicado nessa roda (expressão 18).

Caso exemplo

No caso exposto na Figura 18, com pedaleiro de 24 dentes e braço (b) de 17,5 cm e uma roda dentada na roda motriz com 48 dentes (e roda com raio r de 32 cm), temos que $G = (24/48) = 0,5$.

- ✓ Se o ciclista aplicar no pedaleiro 60 kg do seu peso e exercer uma força média $\vec{F}_{Ci} = 60 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 588 \text{ N}$, essa produzirá um binário \vec{B}_P ($1/2 \times \vec{F}_{Ci} \times b = 0,5 \times 588 \text{ N} \times 0,175 \text{ m}$) = **51,45 N.m**.
- ✓ Esse binário de 51,45 N.m será transmitido à roda motriz pela expressão $\vec{B}_M = (\vec{B}_P / 0,5) \times \eta_T$ e $(51,45 \text{ N.m} / 0,5) \times 0,9 = \mathbf{92,61 \text{ N.m}}$.
- ✓ E esse \vec{B}_M de 92,61 N.m aplicado à roda motriz com 0,32 m de raio produz uma força motora \vec{F}_M aplicada ao veio (dada pela expressão 14) de $92,61 \text{ N.m} / 0,32 \text{ m} = \mathbf{289,4 \text{ N}}$.
- ✓ Se a cadência imposta pelo ciclista ao pedaleiro for **100 rpm**, a velocidade na roda motora será de $100 \times 0,5 = \mathbf{50 \text{ rpm}}$.
- ✓ Como a roda motora tem perímetro ($P = 2 \times \pi \times 0,32 \text{ m}$) de 2 metros, essa rotação de 50 rpm provoca uma velocidade linear de 100 m por minuto, **1,67 m/s** ou 6 km/h.

Este caso exemplo representa uma situação em que é alcançada uma velocidade baixa mas é produzido um binário elevado, suficiente para vencer a força gravítica numa subida com declive de aproximadamente 18°.

Cálculo da potência fornecida por um sistema de acionamento

A potência instantânea fornecida por qualquer sistema mecânico rotativo é o produto do Binário (N.m) e da velocidade de rotação angular (rad/s) [34].

A expressão seguinte permite calcular este valor em kW.

$$P = \frac{\vec{B} \times rpm}{9549} \quad [19]$$

Onde:

P – Potência em quilo Watt (kW);

\vec{B} – Binário em Newton metro (N.m);

rpm – Velocidade de rotação em rotações por minuto.

Cálculo da potência fornecida pelo ciclista e entregue à roda no caso exemplo

A partir da expressão (19) podemos calcular a potência fornecida pelo ciclista no exemplo atrás exposto.

$$P_{Ciclista} = \frac{51,45 \text{ N.m} \times 100 \text{ rpm}}{9549} = 0,538 \text{ kW} = 538 \text{ W} \quad [20]$$

e aplicada à roda motora:

$$P_{Roda\ motora} = \frac{92,61 \text{ N.m} \times 50 \text{ rpm}}{9549} = 0,484 \text{ kW} = 484 \text{ W} \quad [21]$$

Com este valor de G , o sistema transmissão tem o efeito de reduzir a velocidade de rotação e de aumentar o binário na roda motriz.

A potência aplicada à roda motriz é 90% da desenvolvida pelo ciclista, pois foi esse o valor considerado no rendimento da transmissão.

4. Projeto do sistema propulsor da *E-bike*

Constituindo o objeto deste trabalho a implementação de uma *E-bike*, expomos neste Capítulo o seu projeto com base na fundamentação cinemática exposta no Capítulo 3, com o intuito de obter as especificações dos componentes para alcançar o desempenho desejado.

4.1 Parâmetros do projeto

O estudo desenvolve-se a partir do desempenho desejado num plano horizontal e depois com simulação em planos inclinados com declive variável. Na Tabela 3 são expostos os parâmetros de desempenho que pretendemos alcançar, bem como os valores das grandezas utilizadas nos cálculos.

Tabela 3 – Parâmetros do projeto.

	Valores	Unidades
Velocidade máxima a alcançar em plano horizontal (\vec{v})	40 11,11	km/h m/s
Autonomia	70	km
Massa da bicicleta (m_1) ⁽¹⁾	45	kg
Massa do ciclista (m_2)	70	kg
Aceleração gravítica (\vec{g})	9,8	m/s ²
Coefficiente de resistência ao rolamento (f_r) ⁽²⁾	0,006	
Densidade do ar (ρ) à temperatura de 20°C e pressão de 1 Atm.	1,2	kg/m ³
Área frontal do veículo com condutor (A_f) ⁽³⁾	0,5	m ²
Coefficiente de resistência aerodinâmica (C_D) ⁽⁴⁾	1	
Velocidade do vento (\vec{v}_w)	0	m/s
Ângulo de inclinação (θ)	0	graus
Raio da roda de 18 polegadas ⁽⁵⁾	22,85	cm
Comprimento do braço pedal	0,175	m
Cadência imposta pelo ciclista ao pedaleiro ⁽⁶⁾	100	rpm

Legenda:

⁽¹⁾ O peso do quadro (12 kg) + bateria (8,5 kg) + motor (9,8 kg) + outros componentes (14,7 kg).

⁽²⁾ O f_r é retirado do estudo do Capítulo 3, da Tabela 1.

⁽³⁾ A A_f é retirada do estudo do Capítulo 3, Figura 12.

⁽⁴⁾ O C_D retirado do estudo do Capítulo 3, Figura 13.

⁽⁵⁾ Diâmetro de um aro 18" é de 45,7 cm, com um raio de 22,85 cm (Figura 19).

⁽⁶⁾ A cadência máxima de pedalada do ciclista é de 100 rpm.

4.2 Fundamentação cinemática

Tendo por base o exposto em 4.1 vamos calcular a força de resistência ao deslocamento \vec{F}_R que depende das seguintes componentes:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_r + \vec{F}_D + \vec{F}_g + \vec{F}_i$$

A força de resistência ao rolamento \vec{F}_r (expressão 7) no plano horizontal é dada por:

$$\vec{F}_r = \vec{P} \times f_r \times \cos(\theta)$$

$$\vec{P} = (45 + 70) \times 9,8 = 1127 \text{ N}$$

$$\vec{F}_r = 1127 \times 0,006 \times 1 = 6,76 \text{ N} \quad [22]$$

A força de atrito aerodinâmico \vec{F}_D (expressão 8) à velocidade de 11,11 m/s é dada por:

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2} \times \rho \times A_f \times C_D \times (\vec{v} - \vec{v}_w)^2$$

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2} \times 1,2 \times 0,5 \times 1 \times (v^2 - 0)^2 = 37,03 \text{ N} \quad [23]$$

A força gravítica \vec{F}_g (expressão 9) no plano horizontal é dada por:

$$\vec{F}_g = (45 + 70) \times 9,8 \times 0 = 0 \quad [24]$$

A força de inércia \vec{F}_i (expressão 12) quando a velocidade é constante é dada por:

$$\vec{F}_i = m \times \vec{a} \times (1 + \delta)$$

Como em regime estacionário a aceleração $\vec{a} = 0$, a $\vec{F}_i = 0$.

A força de resistência total \vec{F}_R para a velocidade de 11,11 m/s e no plano horizontal é:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_r + \vec{F}_D + \vec{F}_g + \vec{F}_i = 6,76 + 37,03 + 0 + 0 = 43,8 \text{ N} \quad [25]$$

Esta é a força que é preciso vencer para manter a velocidade de 11,11 m/s no plano horizontal.

Força motora (\vec{F}_M)

Para manter a velocidade de 40 km/h (11,11 m/s), vem da expressão (3) que \vec{F}_M deve ser igual em módulo à força resistente \vec{F}_R :

$$|\vec{F}_M| = |\vec{F}_R|$$

Na Figura 19 expõem-se as dimensões da roda propulsora da bicicleta, considerando que é desprezível a deformação do pneu em contacto com o solo.

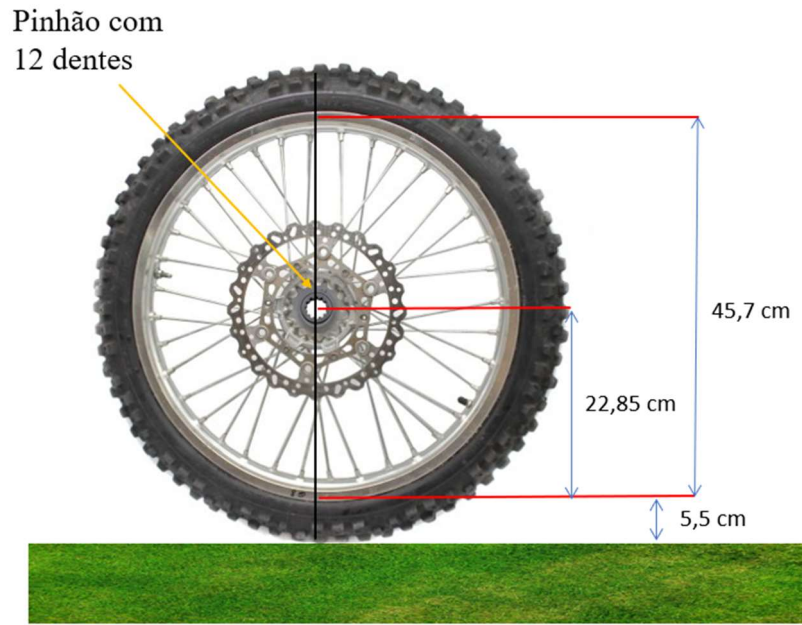


Figura 19 – Dados da roda propulsora. Fonte: adaptada de [35].

O raio da roda (R_T) é a soma do raio da jante com a espessura do pneu.

$$R_T = 22,85 + 5,5 = 28,35 \text{ cm} = 0,2835 \text{ m} \quad [26]$$

E o seu perímetro P_R :

$$P_R = \pi \times (R_T \times 2) = 3,14 \times 0,567 = 1,78 \text{ m} \quad [27]$$

Para rolar podemos utilizar só a potência fornecida pelo motor elétrico, só a força a exercida pelo ciclista nos pedais ou ambos os propulsores num sistema híbrido paralelo.

O binário motor (\vec{B}_M) necessário para garantir a força motora de (\vec{F}_M) é:

$$\vec{B}_M = \vec{F}_M \times R_T = 43,8 \times 0,2835 = 12,40 \text{ N.m} \quad [28]$$

A velocidade a que deve rodar a roda e o motor (em rpm) para garantir essa velocidade é:

$$Velocidade\ rpm = \frac{v}{P_R} \times 60 = \frac{11,11}{1,78} \times 60 = 374,4\ rpm \quad [29]$$

Se o motor elétrico puder debitar 12,40 N.m às 374,4 rpm consegue, só com a sua potência, fornecer a força motora necessária para alcançar a velocidade de 11,11 m/s no plano horizontal.

A potência a debitar pelo motor elétrico para garantir o binário \vec{B}_M necessário para fornecer essa força motora a essa velocidade de rotação é (expressão 19) de:

$$P_{(kW)} = \frac{12,40 \times 374,4}{9549} = \frac{4642,56}{9549} = 0,486\ kW = 486\ W \quad [30]$$

4.3 Máximo declive alcançável só com propulsão elétrica

Quando o motor elétrico pré escolhido roda à velocidade de 374 rpm constatamos, a partir da sua curva binário/rotação (a azul na Figura 20), que o binário debitado é de aproximadamente 70 N.m. Concluimos que, com este motor, a velocidade de 11,11 m/s no plano horizontal (que requiere um binário de 12,4 N.m) é facilmente alcançada só com a propulsão elétrica.

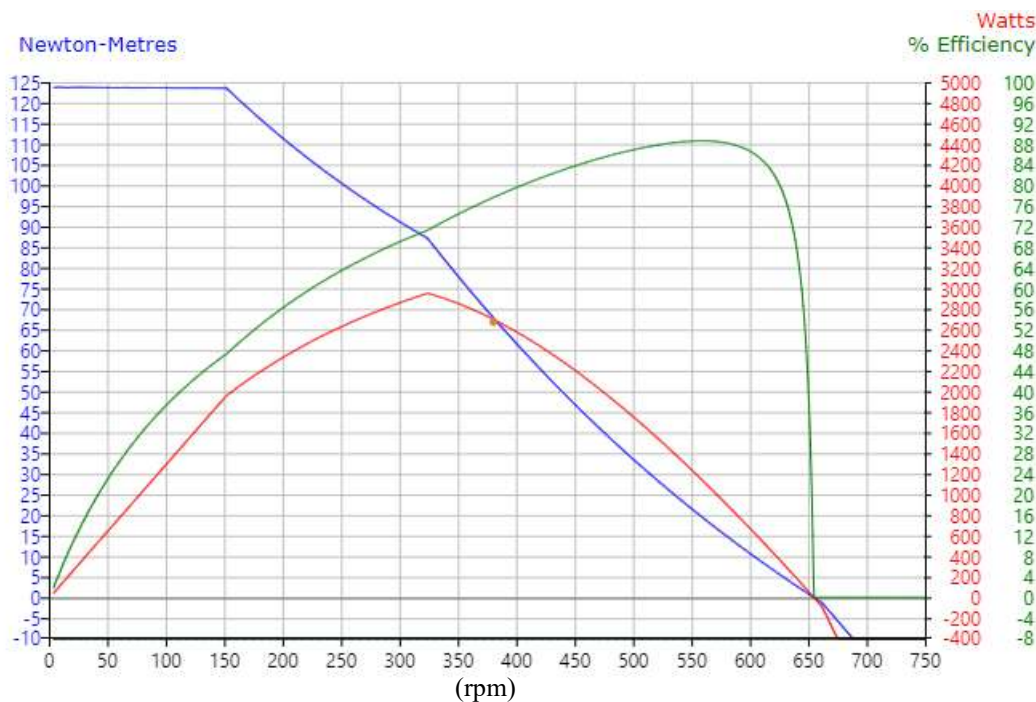


Figura 20 – Curva do binário/rotação do motor Mxus 3k Turbo 3kW. Fonte: [36].

Nas condições acima referidas a potência debitada pelo motor elétrico é (da expressão 19):

$$P_{(kW)} = \frac{70 \times 374,4}{9549} = \frac{26208}{9549} = 2,744 \text{ kW} = 2744 \text{ W} \quad [31]$$

Como esta potência é muito superior à requerida para a circulação à velocidade máxima de projeto no plano horizontal, vamos calcular qual o declive máximo alcançável só com a propulsão elétrica e à mesma velocidade.

Máximo declive alcançável só com a propulsão deste motor elétrico

Caso a circulação seja efetuada num plano inclinado ascendente, teremos que vencer para além das forças de atrito de rolamento e aerodinâmico, a força gravítica.

A força motora máxima $\vec{F}_{M(máx)}$ produzida à rotação de 374,4 rpm é de:

$$\vec{F}_{M(máx)} = \frac{70}{0,2835} = 246,9 \text{ N} \quad [32]$$

E se subtrairmos a esta o valor dos atritos de rolamento mais aerodinâmico ($\vec{F}_r + \vec{F}_D$) que é aproximadamente de 43,8 N vem que a máxima força gravítica \vec{F}_g (Figura 21) pode ser de:

$$\vec{F}_g = 246,9 - 43,8 = 203,1 \text{ N} \quad [33]$$

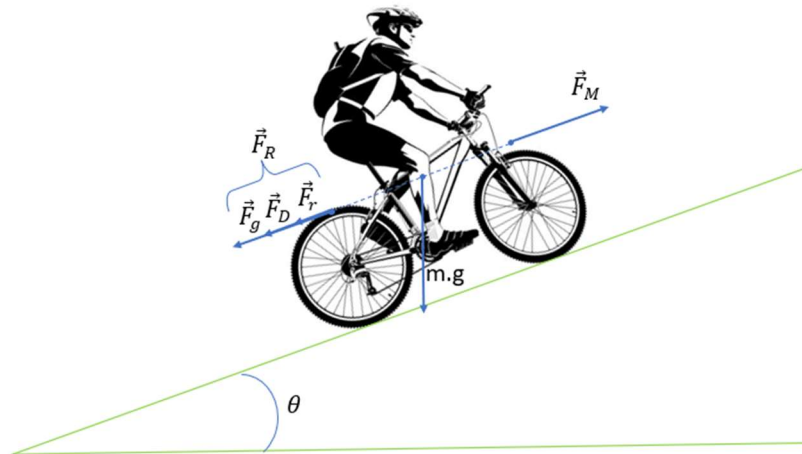


Figura 21 – Forças envolvidas na *E-bike* num declive ascendente. Fonte: adaptada de [37].

E com esta força propulsora disponível para vencer \vec{F}_g , o máximo declive alcançável é:

$$\theta = \arcsin \frac{\vec{F}_g}{m \times g} = \frac{203,1}{(45 + 70) \times 9,8} = \arcsin 0,180 \cong 10^\circ \quad [34]$$

O máximo declive alcançável com este motor elétrico à velocidade de 11,11 m/s é de 17,6%.

4.4 Velocidade e declive alcançáveis só com a propulsão do ciclista

A força máxima que o ciclista pode exercer sobre cada um dos pedais é da ordem de:

$$\overrightarrow{F_{ci}} = 70 \times 9,8 = 686 \text{ N} \quad [35]$$

Com esta força podemos calcular o binário médio (\vec{B}_p) produzido pelo ciclista no veio do pedaleiro, analisado no Capítulo 3 (expressão 15), através do pedal com 0,175 m.

$$\vec{B}_p \cong \frac{1}{2} \times 686 \times 0,175 = 60 \text{ N.m} \quad [36]$$

Dimensionamento do sistema de transmissão

E com o binário acima calculado, para que o ciclista consiga acompanhar – com a cadência da sua pedalada – a velocidade de 374,4 rpm na roda motriz, a relação entre o número de dentes da roda pedaleira e da roda motriz é dada pela expressão (37) abaixo:

- Velocidade de rotação da roda motora = 374,49 rpm.
- Velocidade de rotação do pedaleiro = 100 rpm.

Relação de transmissão G aproximada:

$$G = \frac{374,49}{100} = 3,75 \quad [37]$$

Como o número de dentes da roda motriz é de 12, o da roda do pedaleiro terá que ser de:

$$\text{Roda do pedaleiro} = 12 \times 3,75 = 45 \text{ dentes} \quad [38]$$

A Figura 22 ilustra o sistema de transmissão.

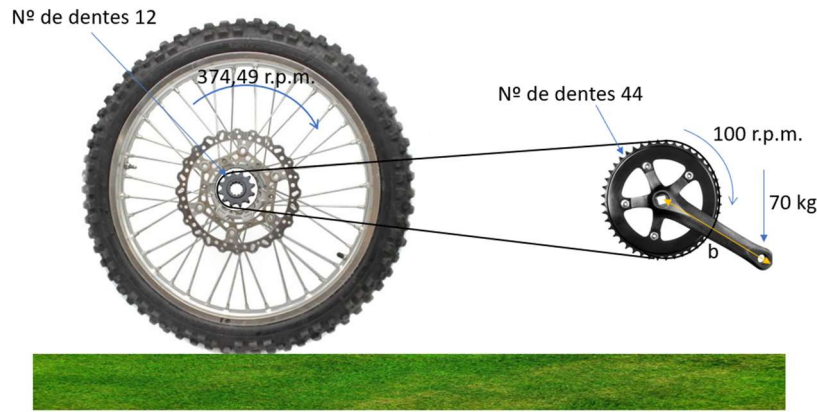


Figura 22 – Sistema de transmissão do pedaleiro à roda motora. Fonte: adaptada de [38].

Como não existem pratos do pedaleiro com 45 dentes, vamos escolher um com 44 dentes e assim calcular o G exato (39):

$$G = \frac{44}{12} = 3,66 \quad [39]$$

E a velocidade de rotação da roda motora é assim dada pela (expressão 17):

$$V_{Roda} = 100 \times 3,66 = 366 \text{ rpm} \quad [40]$$

Nas condições enunciadas acima, a força motora de propulsão máxima produzida pelo binário \vec{B}_p gerado pelo ciclista e considerando o rendimento $\eta_T = 90\%$ exposto da expressão (18) do Capítulo 3, é dada por:

$$\vec{B}_{Roda} = \frac{60}{3,66} \times 0,9 = 14,75 \text{ N.m} \quad [41]$$

E a força motora \vec{F}_{MC} produzida pelo ciclista (expressão 14) é:

$$\vec{F}_{MC} = \frac{14,75}{0,2835} = 52,02 \text{ N} \quad [42]$$

Concluimos que num plano horizontal (e com esta relação de transmissão) a força exercida pelo ciclista no pedaleiro é suficiente para alcançar a velocidade de 11,11 m/s, pois o binário aplicado à roda motriz produz uma força motora de 52,02 N que é superior à \vec{F}_R encontrada atrás em (4.2) e que é de 43,8 N.

A transmissão escolhida é assim de 12 dentes na roda dentada da roda motriz e de 44 dentes na roda dentada do pedaleiro, com $G = 3,66$.

Cálculo da potência máxima fornecida pelo ciclista

A potência fornecida pelo ciclista quando pedala à cadência e força máximas é (expressão 19):

$$P_{(kW)} = \frac{\vec{B}_{Pedal} \times rpm}{9549} = \frac{60 \times 100}{9549} = 0,628 kW = 628 W \quad [43]$$

E a potência fornecida à roda motora é:

$$P_{(kW)} = \frac{\vec{B}_{Roda} \times rpm}{9549} = \frac{14,75 \times 366}{9549} = 0,565 kW = 565 W \quad [44]$$

Com a relação $G = 3,66$, o sistema transmissão tem o efeito de aumentar a velocidade de rotação (100 rpm \rightarrow 366 rpm) e de reduzir o binário na roda motriz (60 N.m \rightarrow 14,75 N.m).

O máximo declive alcançável só com a propulsão do ciclista à velocidade de 11,11 m/s

Tendo em conta a força motora máxima produzida pelo ciclista na roda motora \vec{F}_{MC} exposta em (42) e que é de 52,02 N, constatamos que a força motora excede a necessária para vencer os atritos à velocidade de 11,11 m/s no plano horizontal.

Assim, a força motora extra disponível para vencer a componente gravítica é de:

$$\vec{F}_g = 52,02 - 43,8 = 8,22 N \quad [45]$$

Com esta força propulsora extra disponível, o declive máximo alcançável é dado por:

$$\theta = \arcsin \frac{\vec{F}_g}{m \times g} = \frac{8,22}{(45 + 70) \times 9,8} = \arcsin 0,001 \cong 0,05^\circ \quad [46]$$

Ou seja, com apenas a força propulsora do ciclista a margem para vencer qualquer declive à velocidade de 11,11 m/s é praticamente nula.

4.5 Sistema híbrido paralelo – propulsão conjunta de motor elétrico mais ciclista

A força motora máxima produzida pelo sistema híbrido paralelo (\vec{F}_{MSHP}) resulta do somatório das forças produzidas pelo motor elétrico na roda motriz (\vec{F}_M) expressão (32), mais a aplicada pelo ciclista (\vec{F}_{MC}) expressão (42) e é dada por:

$$\vec{F}_{MSHP} = 246,9 + 52,02 = 298,92 \text{ N} \quad [47]$$

Concluimos assim que num plano horizontal (e com esta relação de transmissão) a força máxima exercida pelo sistema híbrido paralelo é mais do que suficiente para alcançar a velocidade de 11,11 m/s, sendo a força motora de 298,92 N muito superior à força resistente de 43,8 N encontrada na expressão (25).

Binário do sistema híbrido paralelo

$$\vec{B}_{SHP} = \vec{F}_{MSHP} \times R_T = 298,92 \times 0,2835 = 84,4 \text{ N.m} \quad [48]$$

A potência máxima conjunta do sistema híbrido paralelo é:

$$P_{(kW)} = \frac{84,4 \times 374,4}{9549} = \frac{31599}{9549} = 3,309 \text{ kW} = 3309 \text{ W} \quad [49]$$

O máximo declive alcançável com o sistema híbrido paralelo à velocidade de 11,11 m/s

Tendo em conta a força motora máxima produzida pelo sistema híbrido (\vec{F}_{MSHP}), temos que a margem disponível para vencer a força gravítica é:

$$\vec{F}_g = 298,92 - 43,8 = 255,12 \text{ N} \quad [50]$$

E com esta força propulsora extra disponível, o declive máximo alcançável é dado por:

$$\theta = \arcsin \frac{\vec{F}_g}{m \times g} = \frac{255,12}{(45 + 70) \times 9,8} = \arcsin 0,226 \cong 13^\circ \quad [51]$$

O declive máximo alcançável com o sistema híbrido paralelo e à velocidade de 11,11 m/s é próximo dos 23%.

4.6 Considerações sobre a máxima autonomia alcançável

A autonomia alcançável com qualquer sistema de mobilidade elétrica com bateria depende da capacidade desta e das condições de circulação, tipo de piso, velocidade, orografia do terreno, etc. No caso desta *E-bike*, dispomos de um sistema híbrido paralelo cuja propulsão tem duas fontes de potência, o motor elétrico e o ciclista. Em cada instante a propulsão pode ser assegurada pela combinação dessas fontes, sendo a autonomia elétrica tanto maior quanto maior for a assistência do ciclista. No limite, podemos considerar que – neste caso – e tal como numa bicicleta tradicional, não há limite de autonomia no sentido tradicional do termo, desde que o ciclista possua energia e força muscular para prosseguir.

4.6.1 Autonomia alcançável só com a propulsão elétrica

Se considerarmos o uso de uma bateria para alimentar o motor referido na secção 4.3 com tensão nominal de 72 Volt e Capacidade de 29 Ah, verificamos que a energia por esta armazenada é da ordem de:

$$E = U \times Cap. = 72 V \times 29 Ah = 2088 Wh \quad [52]$$

Onde:

U – Tensão da bateria em V;

$Cap.$ – Capacidade da bateria em Ah.

Para assegurar a longevidade das células da bateria vamos impor que, através de um bom Sistema de Gestão da Bateria ou *Battery Management System* (BMS), seja apenas permitida uma profundidade máxima de descarga ou *Deep of Discharge* (DOD) de 80% e verificamos assim que a energia disponível será:

$$E_{Disp.} = 0,8 \times 2088 = 1670 Wh \quad [53]$$

Tendo em conta a cascata de energia desde a saída da bateria até à aplicação de força propulsora do pneu sobre o piso, onde o rendimento do controlador (η_C) é da ordem dos 95% (Anexo 2) e o do motor elétrico (η_M) da ordem dos 80% (Anexo 1) e a energia útil aplicada na roda é de:

$$E_{Util} = E_{Disp.} \times (\eta_C \times \eta_M) = 1670 \times (0,95 \times 0,80) = 1269 Wh \quad [54]$$

E com esta energia útil disponível e nas condições de projeto (30) para garantir a velocidade de 11,11 m/s no plano horizontal e num piso com atrito médio, a potência requerida (expressão 30) é de 486 W e a bateria descarrega em:

$$T_{Descarga} = \frac{1269 \text{ Wh}}{486 \text{ W}} = 2,6 \text{ h} \quad [55]$$

E nesse tempo a bicicleta poderia percorrer:

$$D_{Percorrida} = 2,6 \text{ h} \times 40 \text{ km/h} = 104 \text{ Km} \quad [56]$$

Todavia esta estimativa só seria concretizável num percurso horizontal com 104 quilómetros de extensão o qual não existe. Na realidade, os trajetos são constituídos por zonas planas mais ou menos extensas, subidas e descidas com diferentes declives, pisos com coeficientes de atrito díspares e velocidades variáveis. Nessas condições a potência média requerida não é uniforme e é superior ao valor atrás exposto, assim como os consumos. Tudo isso na realidade encurta a autonomia teórica acima encontrada.

Cada tipo de percurso e de condições de circulação têm assim um grande impacto na máxima autonomia alcançável.

4.6.2 Cálculo da autonomia à potência máxima de propulsão

A partir da expressão (31) constatamos que para as condições limite do projeto, expostas na secção 4.1, a máxima potência debitada pelo motor é de 2744 W e que, teoricamente, permite vencer um declive com 11,1% à velocidade de 40 km/h. Nestas condições e aplicando o mesmo raciocínio da secção anterior, podemos constatar que o tempo de descarga é:

$$T_{Descarga} = \frac{1269 \text{ Wh}}{2744 \text{ W}} = 0,45 \text{ h} \quad [57]$$

E nesse tempo (27 minutos) a bicicleta poderia percorrer:

$$D_{Percorrida} = 0,45 \text{ h} \times 40 \text{ km/h} = 18 \text{ Km} \quad [58]$$

Cerca de 18 quilómetros.

4.6.3 Cálculo da corrente máxima debitada pela bateria

Nas condições referidas na secção anterior, para que o motor possa fornecer a potência de 2744 W, a bateria terá que debitar um valor superior de potência para compensar as perdas no controlador e no motor eléctrico o qual será da ordem de:

$$P_{Deb. Bateria} = \frac{2744 W}{(\eta_C \times \eta_M)} = \frac{2744}{0,95 \times 0,8} = 3610 W \quad [59]$$

E como $P = U \times I$, vem que:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3610}{72} = 50 A \quad [60]$$

Ou seja, a corrente que a bateria terá que debitar continuamente nessas condições será de 50 A.

4.6.4 Considerações sobre a recarga da bateria

Para a reposição da carga da bateria com um DOD de 80%, utilizando um carregador com 72 V de tensão nominal com corrente máxima de 5 A, a potência de saída é da ordem dos 360 W (72 V x 5 A).

Admitindo que a bateria de *Li-Ion* tem um rendimento de 85% (E_{out}/E_{in}) [40], a energia a introduzir para a sua recarga é de:

$$E_{Recarga} = \frac{1670 Wh}{0,85} = 1965 Wh \quad [61]$$

E o tempo mínimo para a reposição da sua carga é da ordem de:

$$Tempo_{Recarga} = \frac{1965 Wh}{360 W} = 5,45 h \quad [62]$$

Ou superior a 5 horas e 27 minutos.

4.6.5 Considerações sobre a capacidade regenerativa

A capacidade regenerativa só pode ser aproveitada em declives acentuados e se desejarmos descer com baixa velocidade ou quando da desaceleração e imobilização da *E-bike*. A potência regenerativa e o tempo em que está disponível são em qualquer das situações muito baixos.

Para termos uma ideia quantificada, podemos idealizar que quando a bicicleta circula a 11,11 m/s a sua energia cinética é dada por:

$$E_C = \frac{1}{2} \times m \times v^2 = \frac{1}{2} \times (45 + 70) \times 11,11^2 = 7097 J \quad [63]$$

Em Wh é:

$$E_C = \frac{7097 J}{3600 J} = 1,97 Wh \quad [64]$$

Esta é a energia que teoricamente pode ser recuperada com a travagem regenerativa resultante da sua imobilização. Mas como há uma cascata de componentes desde a roda até à bateria que é constituída por motor/gerador ($\eta_{M/G} = 0,8$), controlador ($\eta_C = 0,95$) e bateria ($\eta_{Bat.} = 0,85$), todos com perdas significativas ou com rendimento conjunto da ordem dos 50 a 60% sendo a energia recuperável de apenas de cerca de 1 Wh.

Consideramos por isso que a componente regenerativa tem um contributo insignificante neste tipo de veículo elétrico.

5. Quadro da *E-bike*

O quadro da *E-bike* constitui um elemento estrutural que determina o tamanho, a resistência e a capacidade para integrar os restantes componentes e garantir segurança.

As bicicletas convencionais possuem um quadro com formato em diamante, tendo um triângulo à frente composto pelos “*top tube, down tube, seat tube, head tube*” e um triângulo traseiro composto pelos “*seat stays, chain stays, seat tube*”. Estes devem apresentar uma elevada rigidez nas uniões onde serão exercidos os maiores esforços [41].

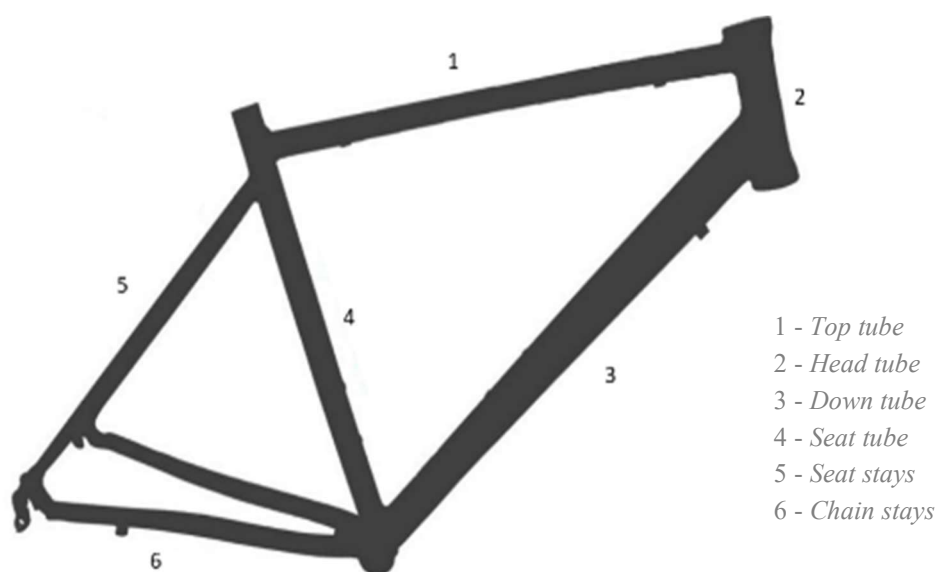


Figura 23 – Geometria de um quadro convencional.

5.1 Materiais para a construção de quadros

São utilizados diversos materiais no fabrico de quadros. Dependendo do tipo de bicicleta, dispomos de:

- Composto de matriz polimérico reforçado com fibras de carbono – muito leve, rígida, resistente ao impacto e às altas temperaturas.
- O cromo-molibdénio – está a ser utilizado nos quadros das *E-bikes*.
- O aço de alta resistência – uma liga que proporciona boas propriedades mecânicas e maior resistência à corrosão que o aço tradicional.
- O alumínio – que percorreu um longo caminho desde os tradicionais tubos de grandes dimensões até quadros leves, fortes e rígidos.

5.2 Geometria do quadro

A geometria adotada suporta a finalidade da *E-bike* e é definida pelos ângulos e as dimensões do quadro o que permite uma boa adaptação bicicleta/ciclista para alcançar o melhor desempenho.

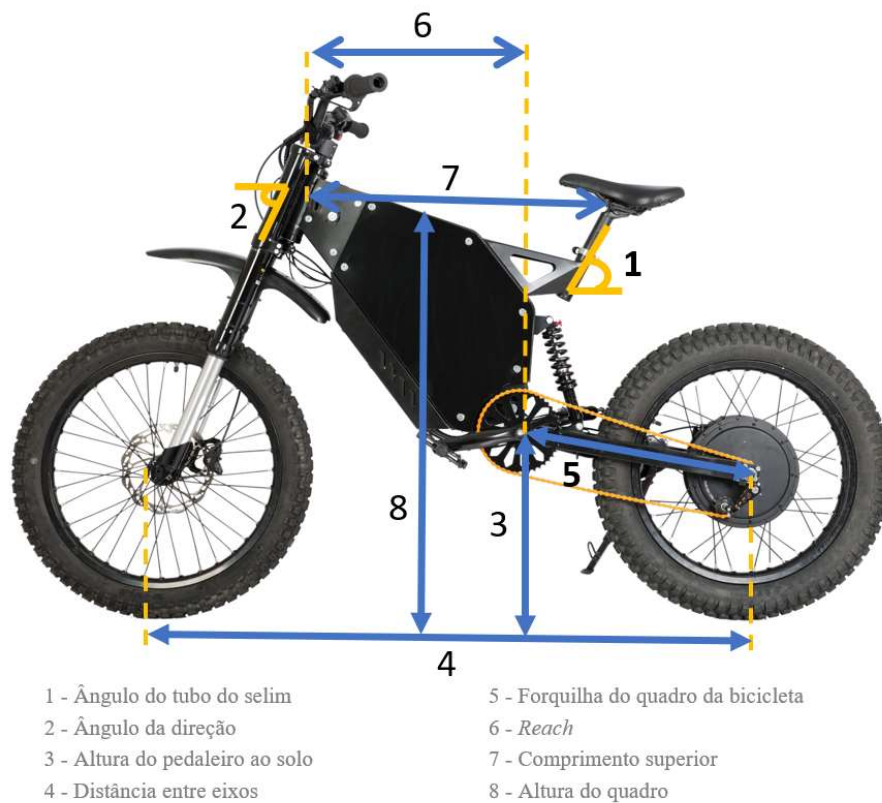


Figura 24 – Geometria do quadro.

1. Ângulo do tubo do selim (α)

O ângulo do tubo de selim é formado pelo ângulo deste em relação ao solo. A variação deste ângulo depende da flexão da suspensão traseira e afeta a postura do ciclista e a eficiência da pedalada [42].

- Um ângulo próximo de 90° proporciona pedalada mais eficiente.
- Um ângulo inferior a 90° proporciona maior estabilidade nas descidas.

2. Ângulo da coluna da direção

O ângulo da coluna da direção é medido entre o solo e o tubo da coluna de direção, determinando a agilidade da bicicleta.

As bicicletas de *Trail / All Mountain* utilizam ângulos entre 66° e 68° [42].

3. Altura do veio do pedaleiro ao solo

É a distância do veio do pedaleiro ao solo. Se o pedaleiro estiver mais baixo que a medida tradicional tem maior estabilidade, uma vez que o centro de gravidade fica mais próximo do solo. No entanto, as bicicletas de montanha têm maior altura do pedaleiro para evitar colisões da roda dentada em solos irregulares.

Para compensar a deflexão da suspensão traseira, as bicicletas com suspensão total necessitam que o pedaleiro esteja também mais elevado do que nas bicicletas só com suspensão dianteira [42].

4. Distância entre eixos

Esta distância influencia diretamente na estabilidade da bicicleta. Quando em alta velocidade, quanto maior for a distância entre eixos mais estável ela será.

5. Forquilha de suporte da roda traseira

A forquilha de suporte da roda traseira determina não só o tamanho máximo da roda mas também a estabilidade que a bicicleta tem em determinadas situações. A sua dimensão é medida entre o centro do pedaleiro até ao centro da roda traseira.

6. *Reach* (distância da coluna de direção ao eixo da pedaleira)

É a distância horizontal medida entre a linha vertical que passa pelo centro do pedaleiro e o centro da direção. Esta determinará o grau de conforto e a posição do ciclista.

- Um *reach* curto deixará o ciclista com o tronco mais direito, com menor estabilidade mas com maior conforto.
- Um *reach* longo deixará o ciclista mais inclinado para a frente, o seu centro de gravidade é mais baixo e aumenta a estabilidade.

7. Comprimento superior

Este serve para determinar a distância da *E-bike* para o ciclista. É medido no centro da direção ao centro do tubo do selim.

8. Altura do quadro

É a altura da parte superior do quadro em relação ao solo. Tem de ser inferior à altura interna das pernas do ciclista (h), por forma a que ele consiga pôr os pés no chão e manter o equilíbrio [43].

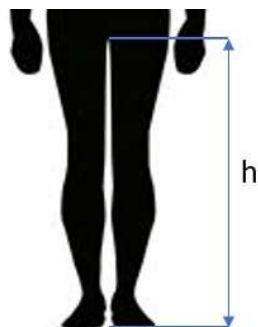


Figura 25 – Altura da perna do ciclista.

5.3 Dimensões de uma bicicleta

Uma *E-bike* com dimensões inadequadas pode causar problemas ao ciclista os quais podem ir desde inflamações em tendões até complicações mais graves.

Para as bicicletas de estrada utiliza-se no sistema europeu as medidas padronizadas em centímetros e para as bicicletas de montanha em polegadas.

Para a escolha do tamanho do quadro de uma bicicleta de montanha temos de medir a altura da perna do ciclista (por exemplo $h = 83$ cm) e da expressão seguinte obtém-se a altura adequada do quadro em polegadas.

$$\text{Altura do quadro} = h \times 0,21$$

$$83 \times 0,21 = 17,43"$$

Na Figura 26 podemos visualizar os tamanhos mais adequados de bicicletas de estrada e de montanha, sendo este um guia básico [43].

Comprimento da perna	Tamanho da bicicleta de estrada	Tamanho da bicicleta de montanha
81 cm	52	17
82 cm	53	17
83 cm	54	17,5
84 cm	54	17,5
85 cm	55	18
86 cm	56	18

Figura 26 – Dimensão da perna do ciclista e tamanho de bicicleta mais adequado.

5.4 Quadro

Neste projeto optou-se pela aquisição de um quadro já existente da *Vector Typhoon*. Este é de aço e suporta uma carga de até 150 kg, possui uma estrutura resistente e adequada para uso em circuitos de montanha onde o risco de batidas é elevado.

Possui um compartimento (Figura 27) de 37 x 27 x 12,5 centímetros e permite instalar uma suspensão total com ponteira de desviador traseiro forte e largo (155 mm). Pesa 12 kg, suporta motores de alto binário e exibe elevada estabilidade a altas velocidades.



Figura 27 – Compartimento que permite alojar a bateria. Fonte: [44].

O compartimento permite alojar uma bateria e tem ainda capacidade para anexar uma caixa ventilada para alojar o controlador no exterior (Figura 28).



Figura 28 – Caixa para alojar o controlador. Fonte: [44].



Figura 29 – Forquilha oscilante de suporte da roda motora. Fonte: [44].

Na Figura 29, expõe-se a forquilha oscilante de suporte da roda motora e ligação ao corpo do quadro e amortecedor traseiro.

Na Figura 30 exhibe-se o suporte do selim convencional para espigão de 31,6 mm de diâmetro.



Figura 30 – Suporte do espigão do selim. Fonte: [44].

Na Figura 31 o quadro completo com os componentes incorporados.



Figura 31 – Quadro completo.

6. Seleção de componentes da *E-bike*

Para a implementação da *E-bike* foi efetuada uma seleção de componentes mecânicos e elétricos com base nas especificações encontradas no Cap. 4 e com a finalidade de possibilitar elevada eficiência. Na Figura 32 expõem-se, à priori, os componentes que foram integrados.



Figura 32 – Componentes da *E-bike*.

6.1 Escolha dos componentes elétricos

6.1.1 Motor elétrico

O motor elétrico escolhido foi um *Brushless Direct Current* (BLDC) Motor Mxus 3k turbo 3kW, com enrolamentos concentrados e ímãs permanentes de Neodímio Ferro e Boro (NdFeB), com elevado desempenho dinâmico, alta eficiência e robustez [45].

O motor está integrado na roda traseira (*direct drive*), sem necessidade de um sistema transmissão (Figura 33), permitindo uma maior eficiência energética.

Para controlo da velocidade do motor escolhemos um acelerador com sensor Hall. Ao rodar o punho damos ordem ao controlador e o motor é acionado.



Figura 33 – Motor Mxus 3k turbo 3kW.

Tabela 4 – Características do motor Mxus 3k turbo 3kW.

Potência máxima	3000	W
Velocidade máxima	730	rpm
Tensão	72	V
Binário máximo (às 0 rpm)	125	N.m.
Peso	9,8	kg
Eficiência (máx.)	≈ 88	%

O motor Mxus 3k turbo 3kW dispõe de um veio com 170 mm que possibilita a colocação de uma cassete e disco de travagem. O seu corpo ferromagnético é constituído por lâminas de ferro silicioso finas que o tornam muito eficiente e de alumínio, o que permite dissipar calor sem necessidade de ventilação forçada.

No **Anexo 1** expomos especificações mais detalhadas deste motor.

6.1.2 Bateria

As baterias são dispositivos que armazenam energia sob a forma eletroquímica por um tempo longo e que fornecem energia elétrica (libertando elétrons) quando é necessário; no entanto, durante o processo de conversão das diferentes formas de energia, existem sempre perdas manifestadas sob a forma de calor [45].

Neste projeto optou-se por uma bateria não removível e integrada no quadro. Uma das desvantagens desta solução é a de que é necessário ter a *E-bike* junto de um ponto de energia para realizar o seu carregamento.

As células utilizadas foram as LG INR21700M50LT, de iões de Lítio (Li-Ion) que dispõem de uma densidade de energia de 71,42 Wh/ kg e possibilitam cerca de 500 ciclos de carga/descarga quando protegidas por um bom BMS.

As células de Li-Ion caracterizam-se por não exibirem efeito de memória o que permite não necessitarem de ser totalmente descarregadas antes de serem recarregadas e a sua taxa de auto descarga máxima é da ordem dos 10% por mês [46].



Figura 34 – Célula da LG INR21700M50LT. Fonte: [47].

Tabela 5 – Célula da LG INR21700M50LT.

Capacidade	5000	mAh
Tensão mínima	2,5	V
Tensão nominal	3,6	V
Tensão máxima	4,2	V
Tamanho	21,44 x 70,8	mm
Peso	70	g

No **Anexo 2** expomos informação adicional sobre estas células da LG.

Agrupamento das células na bateria

Cada célula da bateria tem tensão nominal de 3,6 V e capacidade de 5000 mAh. Assim, para alcançar a tensão e corrente desejadas, vamos ter de agrupar as células em série (para somar a tensão) e em paralelo (para alcançar a corrente desejada).

$$72\text{ V} \div 3,6 = 20 \text{ células ligadas em série.}$$

$$29\text{ Ah} \div 5\text{ Ah} \approx 6 \text{ células ligadas em paralelo.}$$

Totalizando 120 células, cujo esquema de ligação expomos na Figura 35 a qual é constituída por grupos de 6 células ligadas em paralelo, com 20 grupos ligados em série para obter os 72V.

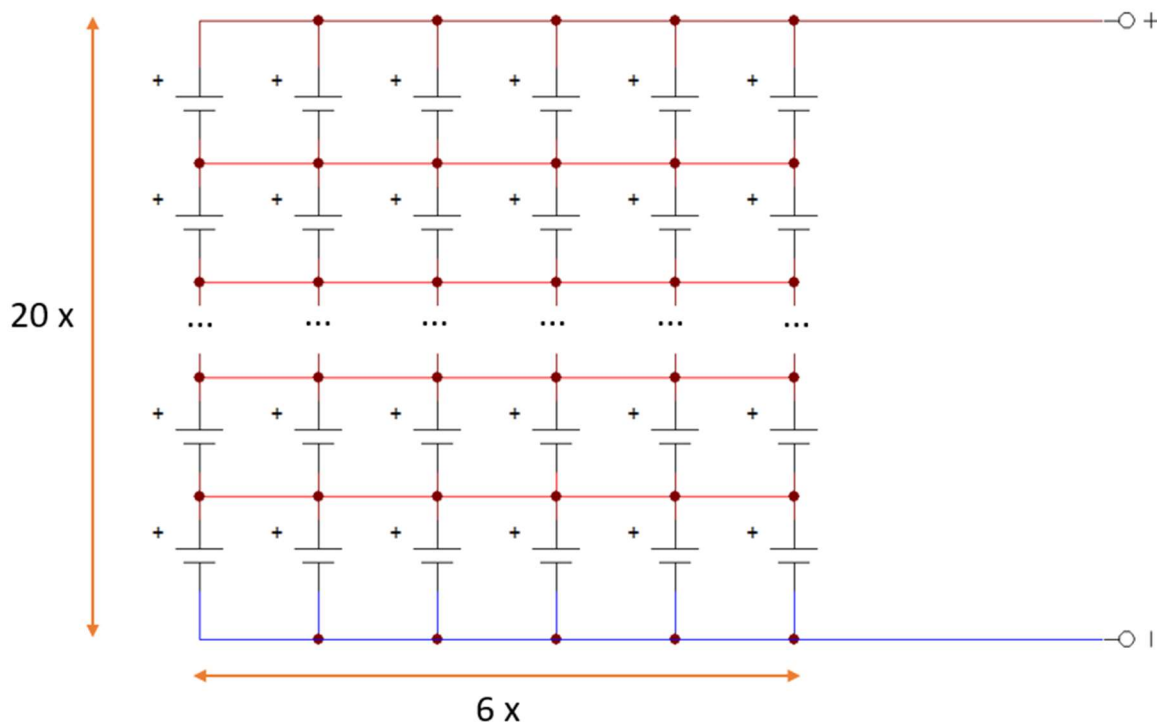


Figura 35 – Agrupamento das células da bateria.

Uso de BMS

Para assegurar a durabilidade da bateria, esta é dotada com um sistema de proteção eletrónico ou BMS (*Battery Management System*) que garante que as tensões máxima e mínima por célula, bem como a temperatura e a corrente, se situam dentro dos valores de segurança pré-definidos pelo fabricante.

O sistema de proteção utilizado foi o BMS 72V 20S 60A da marca YIT-element. Este integra eletrónica que monitoriza a bateria e está equipado com um sistema de medição da temperatura que possibilita agir preventivamente para garantir uma operação segura (Figura 36).



Figura 36 – BMS 72V 20S. Fonte: [48].

Na Figura 37 expomos o esquema de ligações das células com o BMS na bateria implementada.

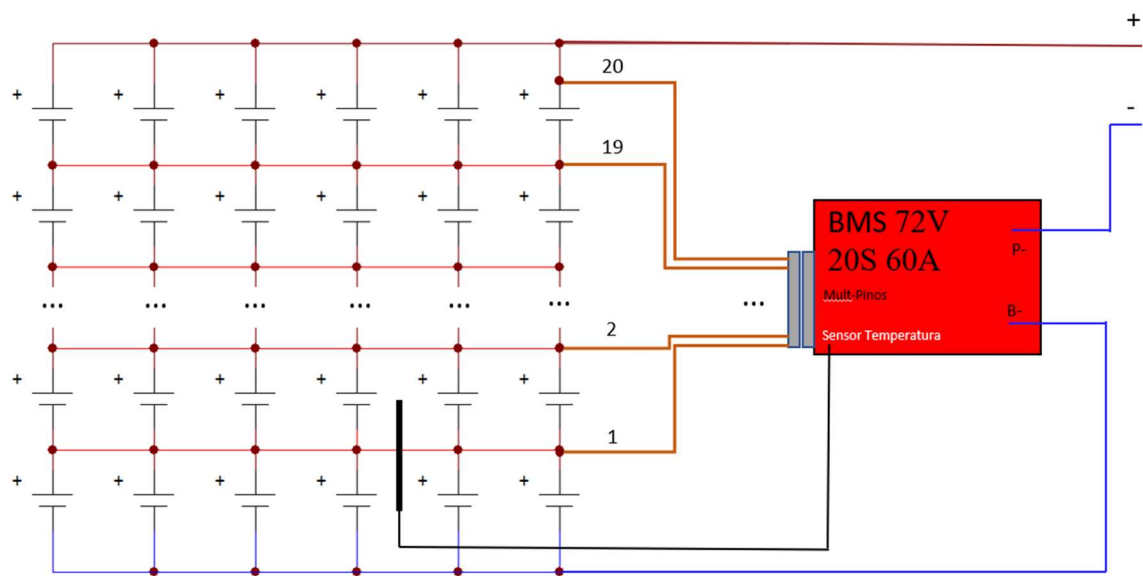


Figura 37 – Esquema de ligações do BMS.

6.1.3 Controlador

O controlador de uma *E-bike* é constituído por um microcontrolador que, juntamente com eletrónica de potência, recebe como *input* uma série de parâmetros de sensores instalados na bicicleta e de comando do ciclista e controla a potência que flui da bateria para o motor elétrico (propulsão) e vice-versa (na regeneração).

O controlador escolhido foi o KLS7212S, baseado em sensores de Hall. Utiliza *Mosfets* de alta potência e SVPWM ⁽⁷⁾ e FOC ⁽⁸⁾ para atingir elevada eficiência no módulo de potência (até 95%) transmite energia às 3 fases no momento correto para fazer rodar o motor elétrico, sendo esse processo realimentado com base na leitura dos sensores Hall. O controlador poderá ser programado através de uma aplicação em telemóvel se possuírmos um adaptador específico ou de um computador [49].

O controlador comunica com um ecrã que envia e recebe informações do ciclista.



Figura 38 – Controlador KLS7212S.

Tabela 6 – Caraterísticas do controlador KLS7212S.

Corrente contínua	50	A
Faixa de tensão	24 a 72	V
Sobretensão até	90	V
Máxima corrente (10 segundos)	120	A
Frequência PWM	10 a 20	kHz
Frequência máxima de saída do controlador	1000	Hz
Temperatura de funcionamento	-40 a 100	°C
Velocidade Máxima em que poderá ser configurado	20 a 100	%
Eficiência	95	%

Expõem-se no **Anexo 3** as especificações detalhadas do controlador e a respetiva programação.

⁽⁷⁾ SVPWM é uma técnica de modulação por largura de impulso que permite minimizar as harmónicas na corrente e no binário.

⁽⁸⁾ FOC é uma técnica de controle que se baseia na fixação de um dos três fluxos magnéticos (estator, rotor ou entreferro) no eixo direto do sistema de coordenadas síncronas.

6.1.4 Ecrã

Optou-se pelo ecrã do modelo APT 750c que é compatível com o controlador KLS7212S.

Este possui um ecrã de 3,2 polegadas a cores, onde podemos visualizar a velocidade instantânea, máxima e média e indicações sobre o estado da bateria, o consumo de potência instantânea (em *Watt*) e um relógio.



Figura 39 – Ecrã APT 750c.

Podem ser programados no ecrã os seguintes parâmetros:

- Brilho;
- Hora do relógio;
- Diâmetro da roda;
- Senha;
- Tensão nominal da bateria;
- Seletor de km ou milhas;
- Assistência com 3 níveis de potência.

Encontram-se no **Anexo 4** as especificações detalhadas do ecrã e a respetiva programação.

6.1.5 Acelerador

O acelerador da *E-bike* é semelhante ao de uma moto, equipado com sensor Hall e com uma tensão de saída de 0,4 V a 5 V.



Figura 40 – Acelerador Daytona.

6.1.6 Carregador

O carregador é um conversor de energia que controla o fluxo de potência atuando nas grandezas tensão e corrente fornecidas à bateria.

Foi escolhido o carregador ASI BAC355 que permite uma tensão de saída de até 84 V e uma corrente máxima 5 A.



Figura 41 – O carregador ASI BAC355.

Tabela 7 – Especificações ASI BAC355.

Tensão de entrada	100 - 240	V
Frequência	50 - 60	Hz
Potência máxima de entrada	420	W
Tensão de saída	$84 \pm 0,3$	V
Corrente máxima de saída	5	A

6.2 Componentes mecânicos da *E-bike*

Para assegurar o elevado desempenho, eficiência e robustez mecânica da *E-bike* foram selecionados os componentes expostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Componentes mecânicos da *E-bike*.

Travões	Travões hidráulicos Shimano
Diâmetros dos discos	203 mm
Cubo da frente	Trut
Aros da frente	Aros alumínio 19"
Pneu da frente	Pneu enduro 19" – KENDA 2.75 -19
Raios da roda dianteira	Com diâmetro de 2,6 mm
Guiador	Guiador de motocross
Avanço	Avanço em alumínio com 31 mm
Curso da suspensão dianteira	180 mm
Rolamento da caixa	Oversized
Raios da roda traseira	Com diâmetro 3 mm
Aros de trás	Aros alumínio 18"
Pneu de trás	Pneu enduro 18" – GOLDEN BOY 3.50 -18M/C
Singlespeed	12 dentes
Corrente	Shimano
Tensor de corrente	Single speed, Kurven
Prato do pedaleiro	44 dentes
Amortecedor traseiro	220 mm
Rolamento pedaleira	Rolamento selado com 100 mm
Rolamento da caixa de direção	Rolamento da caixa de direção oversized e selado
Chave de ignição	Universal
Punhos	Punhos de borracha anti derrapante, cor preta
Descanso	Descanso universal

6.3 Montagem da *E-bike*

Após a seleção e a aquisição dos componentes, passamos à montagem da *E-bike* a qual se realizou em duas fases:

1. Montagem dos componentes mecânicos:
 - a) Montagem das rodas;
 - b) Montagem do quadro;
 - c) Montagem da suspensão dianteira;
 - d) Montagem do amortecedor traseiro;
 - e) Montagem da corrente;
 - f) Montagem do sistema de travagem hidráulica.
2. Montagem dos componentes elétricos:
 - a) Montagem das fichas e dos terminais no controlador;
 - b) Tomada de carregamento e chave de ignição;
 - c) Extensão de cabos;
 - d) Passagem de cabos;
 - e) Fixação do controlador, da chave de ignição e da ficha de carregamento;
 - f) Aplicação da bateria.

6.3.1 Montagem dos componentes mecânicos

1.a) Montagem das rodas

Na montagem das rodas procedemos à instalação dos raios nas jantes, tanto na roda dianteira de 19" como na roda traseira de 18", bem como à sua calibração e à inserção dos respetivos pneus.



Figura 42 – Roda traseira – lado do disco de travagem.



Figura 43 – Roda traseira – lado do pinhão da transmissão.

1.b) Montagem do quadro

No Capítulo 5 foram expostos os componentes do quadro e agora é efetuada a sua montagem.



Figura 44 – Quadro montado.

1. c) Montagem da suspensão dianteira

Após a montagem do quadro, montámos a suspensão dianteira e fixámos o guiador.



Figura 45 – Suspensão dianteira montada.

1. d) Montagem do amortecedor traseiro

Realizámos a montagem do amortecedor traseiro no quadro.



Figura 46 – Amortecedor traseiro instalado.

1. e) Montagem da corrente

Para a montagem da corrente tivemos que instalar previamente um tensor que permite manter a corrente sempre em tensão com as vibrações do sistema e compensar o seu desgaste. Após a sua montagem passámos à montagem das rodas.

1. f) Sistema de travagem hidráulica

Começámos por instalar as maxilas com os bombitos de travagem, depois as mangueiras em ambas as rodas, de seguida as manetes e por fim o óleo em cada um dos circuitos.

Finalização da montagem dos componentes mecânicos

Para concluirmos a montagem dos componentes mecânicos, instalámos o pedaleiro, o guarda-lamas, o selim e o descanso.

6.3.2 Montagem dos componentes elétricos

2.a) Montagem das fichas e dos terminais no controlador

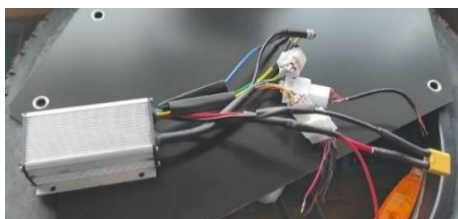


Figura 47 – Controlador.

Como exposto na Figura 47 as fichas brancas foram cravadas e soldadas e servem para ligar os seguintes componentes:

- Sinal da fonte de alimentação;
- Chave de ignição;
- Entrada do interruptor do acelerador;
- Entrada analógica do acelerador;
- Entrada do sensor de temperatura do motor;
- Regeneração variável do freio ou função Boost;
- Entrada do *Hall effect sensor* – fase A;
- Entrada do *Hall effect sensor* – fase B;
- Entrada do *Hall effect sensor* – fase C.

Na Figura 47 vêem-se três condutores com cores azul, verde e amarelo que são os cabos de potência que vão ligar ao motor. Existe ainda um cabo para ligar ao ecrã da *E-bike*.

No **Anexo 3** expomos o *pin-out* completo do controlador.

2.b) Ficha de carregamento e chave de ignição

Efetuámos as ligações da ficha de carregamento e da chave de ignição. Na ligação dos fios aos bornes efetuaram-se soldaduras a estanho e para o isolamento utilizou-se uma manga termo retrátil.

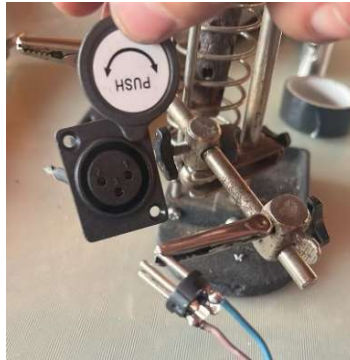


Figura 48 – Tomada de carregamento.

2.c) Extensão de cabos

Como os cabos que vinham de origem eram curtos, foi necessário extendelos com soldaduras a estanho e manga termo retrátil como isolamento.

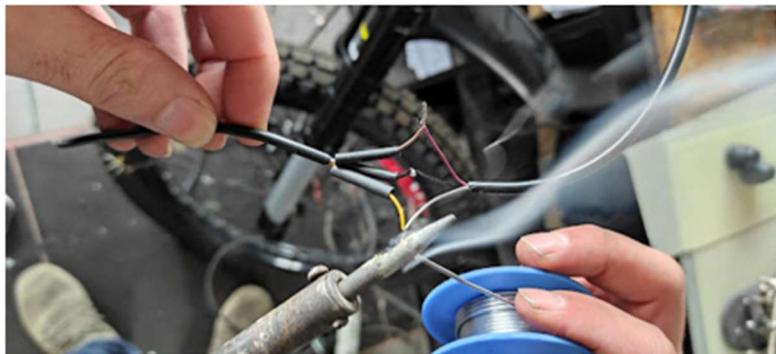


Figura 49 – Extensão de cabos.

2.d) Passagem de cabos

Após a preparação das fichas e das extensões procedemos à passagem dos cabos e à instalação de proteções.



Figura 50 – Proteções dos cabos no guiador.

2.e) Fixação do controlador, da chave de ignição e da ficha de carregamento

O controlador foi instalado na caixa de proteção na parte inferior do quadro (Figura 51), a montagem da chave de ignição na parte superior (Figura 52) e a ficha de carregamento na face lateral direita (Figura 53).



Figura 51 – Controlador.



Figura 52 – Chave de ignição.



Figura 53 – Ficha de carregamento.

2.f) Instalação da bateria

Antes da instalação da bateria tivemos que proceder ao isolamento do compartimento com esponja com alguma rigidez e à aplicação de um plástico para isolamento anti-faísca.



Figura 54 – Local de alojamento da bateria.

Como o compartimento possui uma dimensão superior ao da bateria, tivemos que a colocar dentro de uma bolsa de proteção. Esta ficou na parte inferior do compartimento com algum espaço superior vazio o qual foi preenchido com uma esponja para a manter imobilizada.



Figura 55 – Bateria com proteção.

6.3.3 Programação do controlador da *E-bike*

Com as montagens concluídas, passámos à programação do controlador e do ecrã:

Programação dos parâmetros do controlador

A mesma ficha do controlador onde se liga o ecrã serve para ligar o computador. Utilizámos um adaptador de interface para ligar o PC ao controlador e de seguida abrimos o programa *Kelly controllers*. A programação de alguns parâmetros é efetuada neste controlador em percentagem.

Antes de introduzir os parâmetros críticos, tivemos de realizar um procedimento de leitura do ângulo da roda que obriga a que a *E-bike* esteja com a roda motora livre.

De seguida tivemos que preencher o parâmetro “*Identification Angle*” com o número 170 e pressionámos na opção “*write*” para proceder à sua gravação.

O passo seguinte foi desligar a bateria e voltar a ligar. Quando o controlador é ligado vai fazer com que a roda motora comece a girar.

Quando a roda parou de girar, fomos novamente ao programa e constatámos que o parâmetro “*Identification Angle*” estava agora em 85 o que significava, de acordo com o manual de programação, que o sistema estava estável.

Com este procedimento realizado e não havendo erros, pudemos avançar na programação.

Nesta operação constatámos que existem parâmetros que já vêm pré-definidos, não devendo ser alterados (são parâmetros específicos deste controlador).

Há outros para os quais o fabricante faculta valores recomendados para diferentes *kits* de tensão. Configurámos alguns parâmetros adaptando-os às características dos componentes utilizados.

No **Anexo 3** estão expostos alguns passos da programação do controlador.

Nas Figuras 56, 57 e 58 exibimos alguns ecrans da programação do controlador.

KMC User App

Kelly Controllers <http://www.KellyController.com>

Read success!

Configuration Wizard

Module Name	KL572125	TPS Dead High	80
User Name	qshe	TPS Fwd MAP	30
Serial Number	20051178	TPS Rev MAP	20
Software Version	01110001	Brake Type	1
Controller Volt	72	Brake Dead Low	20
Low Volt	18	Brake Dead High	80
Over Volt	89	Max Output Fre	1000
Hall Galvanometer	300	Max Speed	4000
PhaseCurr Max AD	380	Max Fwd Speed %	100
Current Percent	100	Max Rev Speed %	100
Battery Limit	100	MidSpeed Forw Speed	60
Identification Angle	85	MidSpeed Rev Speed	50
TPS Low Err	0	LowSpeed Forw	25
TPS High Err	95	LowSpeed Rev Speed	15
TPS Type	1	Three Speed	2
TPS Dead Low	20	PWM frequency	20

☒ Startup H-Pedel
☐ Brake H-Pedel
☐ NTL H-Pedel
☐ Joystick
☐ Three Gears Switch
☐ Boost
☐ Foot Switch
☒ SW Level
☒ 0,HIM;1,KIM
☐ Cruise
☐ Anti-theft
☐ Anti-Slip
☒ Change Direction

ReadZero

Vehicle Motor Read Monitor
Control COM Write Quit

Figura 56 – Interface do PC para a programação do controlador da *E-bike*.

KMC User App

Kelly Controllers <http://www.KellyController.com>

Read success!

Configuration Wizard

Motor Nominal Curr	120	0iã Hall value	6
Motor Poles	46	60iã Hall value	4
Speed Sensor Type	2	120iãHall value	5
Resolver Poles	2	180iãHall value	1
Min Excitation Current	0	240iãHall value	3
Motor Temp Sersor	0	300iãHall value	2
High Temp Cut iæ	130	Forward HA Rising	5
Resume iæ	110	Forward HA Falling	2
High Temp Striæ	100	Reverse HA Rising	3
High Temp Week %	0	Reverse HA Falling	4
Line Hall Zero	508		
Line Hall amplitude	410		
Line Hall High Err	972		
Line Hall Low Err	50		
Swap Motor Phase	0		
Resolver init angle	8129		

Vehicle **Motor** Read Monitor
Control COM Write Quit

Figura 57 – Interface do PC para a programação do controlador da *E-bike* (cont.).

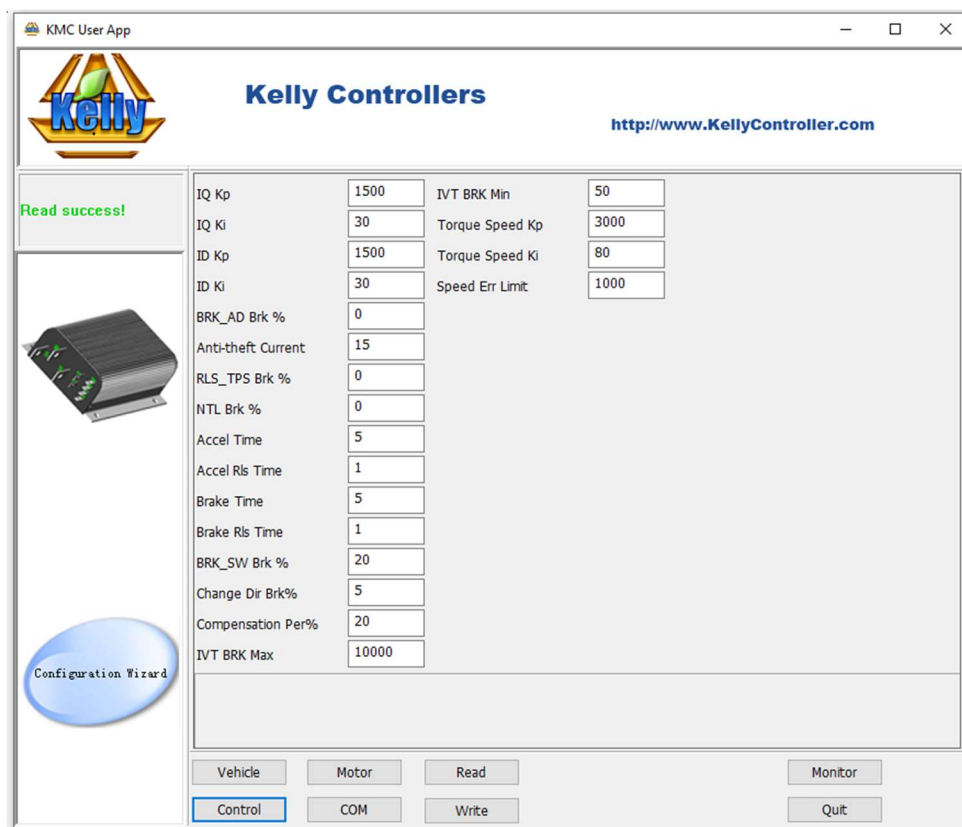


Figura 58 – Interface do PC para a programação do controlador da *E-bike* (cont.).

Programação dos parâmetros no ecrã

Na programação dos parâmetros no ecrã podemos especificar a tensão da bateria e o diâmetro da roda, sendo estes os parâmetros mais relevantes para calcular com rigor a velocidade e a potência debitada.

Na Figura 59 ilustra-se a programação do diâmetro da roda e da tensão da bateria.

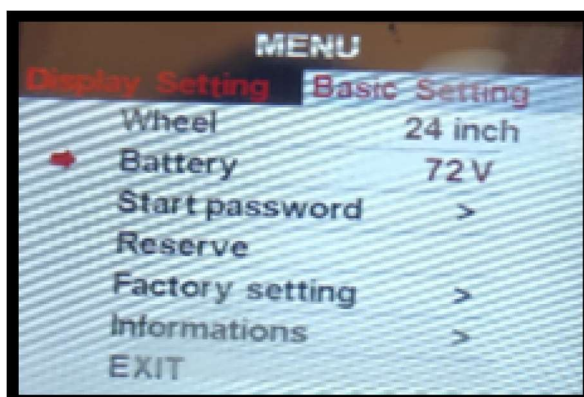


Figura 59 – Interface de programação do ecrã.

Como foi referido atrás, dispomos da possibilidade de uso de 3 níveis de assistência de potência, que terão a seguinte programação no controlador;

Nº 1. Não ultrapassar 20 km/h, sendo esta a velocidade máxima de circulação nas estradas portuguesas permitida por lei para uma *E-bike*;

Nº 2. A velocidade máxima é de 45 km/h;

Nº 3. Sem limitação de velocidade.



Figura 60 – Imagem principal do ecrã.

Na Figura 61 expõe-se o produto final do projeto, a implementação de uma *E-bike* de alto desempenho e de elevada eficiência.



Figura 61 – Aspeto final da *E-bike* implementada.

6.4 Ilustração da *E-bike*

A ilustração da *E-bike* (Figura 61) foi realizada em torno do conceito de sustentabilidade. Pretende-se transmitir que é uma solução de locomoção com baixo impacto ambiental, que pode utilizar energia proveniente de fontes renováveis e que constitui simultaneamente um meio saudável que proporciona exercício físico.

6.5 Custo da *E-bike*

A implementação desta *E-bike* teve um custo próximo de €3500.

A bateria foi construída à medida e teve o custo de €900, o motor de €450, o controlador de €150, e o quadro (com amortecedores, ecrã, banco, guiador, etc) um valor de €2000.

Conseguimos alcançar este valor porque comprámos alguns componentes no estrangeiro. Se tivéssemos comprado tudo em Portugal teria um preço mais elevado. Como por exemplo o fabrico do quadro, por não existir projeto de quadro, teríamos de realizar um com as medidas específicas do mesmo e sendo uma peça única, iria ter um custo elevado.

7. Ensaio da *E-bike*

Tendo em conta o desempenho e a autonomia a alcançar pela *E-bike*, especificadas no Capítulo 4, que constituíram os parâmetros diretores do projeto, chegamos ao momento de realizar ensaios com o protótipo implementado com vista a aferir se os mesmos são, ou não, alcançados.

Os parâmetros que pretendíamos validar com a *E-bike* eram:

1. O tempo necessário para alcançar a velocidade de 40 km/h no plano horizontal nos modos só com a propulsão do ciclista, em modo elétrico puro e em modo híbrido.
2. A velocidade máxima alcançável no plano horizontal em modo só com propulsão do ciclista, modo elétrico puro e modo híbrido.
3. Aferir se a velocidade de 40 km/h é alcançável num declive ascendente próximo dos 15%, só com a propulsão elétrica e aferir no mesmo percurso a velocidade máxima alcançável com propulsão híbrida.
4. Após recarga completa da bateria realizar um percurso longo com dificuldade média e aferir a autonomia real do protótipo.

Para a realização dos testes não foi fácil encontrar percursos com a extensão, os declives e a regularidade do piso requeridos. Na região de Mangualde tentámos encontrar trajetos que mais se aproximassem desses requisitos sendo esses devidamente explicitados na descrição de cada teste.

Como instrumento de medida da velocidade foi utilizado o velocímetro da *E-bike* depois de calibrado com a informação fornecida pelas APP Waze e GPS Speedometer Odometer (Figura 62) e ainda confirmado pela medição da distância percorrida e o tempo despendido num percurso bem identificado. Para a medição do tempo foi utilizado um cronómetro digital.



Figura 62 – Ecrã do Speedometer Odometer.

7.1 Tempo necessário para alcançar os 40 km/h no plano horizontal

Este teste foi realizado num percurso horizontal com cerca de 100 metros de comprimento e obtiveram-se os seguintes resultados:

Modo	Velocidade	Tempo
Só com a propulsão do ciclista	10 Km/h	19 seg.
Com propulsão elétrica pura	40 Km/h	9,2 seg.
Com propulsão híbrida	40 Km/h	8,5 seg.

Neste conjunto de testes a velocidade máxima alcançada com a propulsão só do ciclista foi apenas de 10 km/h, atingidos ao fim de 19 segundos.

Este valor está muito aquém do encontrado nos cálculos expostos no Capítulo 4 (secção 4.4) e atribuímos estes fatores a:

- 1º Subestimação do coeficiente de atrito de rolamento (\vec{F}_r) dos pneus utilizados no protótipo.
- 2º Existência de maior inércia angular do protótipo devido ao atrito do motor integrado no cubo da roda traseira.
- 3º Potência fornecida pelo ciclista do teste inferior à utilizada no cálculo teórico. Está incluído nesta o binário máximo e a cadência imposta pelo ciclista.

7.2 Velocidade máxima alcançável no plano horizontal nos três modos

Este teste foi realizado num percurso com um quilómetro de extensão, com alguma irregularidade no tipo de piso, tentando agora averiguar a velocidade máxima alcançável para cada modo de propulsão, o tempo requerido e o tempo necessário para percorrer os 1000 metros, tendo obtido os seguintes resultados:

Modo	Velocidade	Tempo	Tempo (1 km)
Só com a propulsão do ciclista	10 Km/h	19 seg.	8 min. 10 seg.
Com propulsão elétrica pura	70 Km/h	18 seg.	1 min. 23 seg.
Com propulsão híbrida	72 Km/h	17 seg.	1 min. 17seg.

Podemos concluir que com os modos de propulsão elétrica pura e de propulsão híbrida, os valores que conseguimos obter são superiores aos valores identificados no Capítulo 4, onde a velocidade máxima era de 40 km/h e na realidade conseguimos alcançar velocidade superior a 70 km/h.

No modo só com propulsão do ciclista, confirmamos mais uma vez, que o valor se mantém pois tem a ver com os fatores referidos em 7.1.

7.3 Velocidade alcançável num declive ascendente próximo de 15% com propulsão elétrica pura e a propulsão híbrida

Este teste foi realizado num percurso com aproximadamente 100 metros de comprimento que evolui da cota 500 m até 515 m (declive próximo de 15%), com o objetivo de validar a velocidade máxima alcançável para este declive em modo propulsão elétrica pura e em modo propulsão híbrida.

Modo	Velocidade	Tempo
Com propulsão elétrica pura	40 Km/h	11,92 seg.
Com propulsão híbrida	42 Km/h	11,58 seg.

Pudemos concluir com este teste que nos modos de propulsão elétrica pura e de propulsão híbrida o desempenho foi o esperado, mesmo com um declive de 15% conseguiu alcançar a velocidade superior à que foi estipulada de 40 km/h. A expectativa deste teste seria a de que a *E-bike* não conseguisse atingir essa velocidade por causa do declive ser muito próximo do valor máximo estudado (na secção 4.3 e 4.5 obtivemos 23% para o modo propulsão híbrida e de 17,6% para o modo elétrico puro), mas devido à potência que este motor e o controlador conseguem debitar, próximo das 375 rpm, foi possível atingir esse objetivo.

7.4 Aferir a autonomia real do protótipo

Para a realização deste teste procedemos à recarga completa da bateria e foi realizado num percurso constituído por trajeto com subidas e descidas e com diferentes declives e retas planas. Consistiu em sair de Mangualde, ir até Carregal do Sal e voltar ao lugar de partida, percorrendo 73,6 km e com um acumulado de subidas de 833 m. Na Figura 63 podemos visualizar o percurso efetuado.

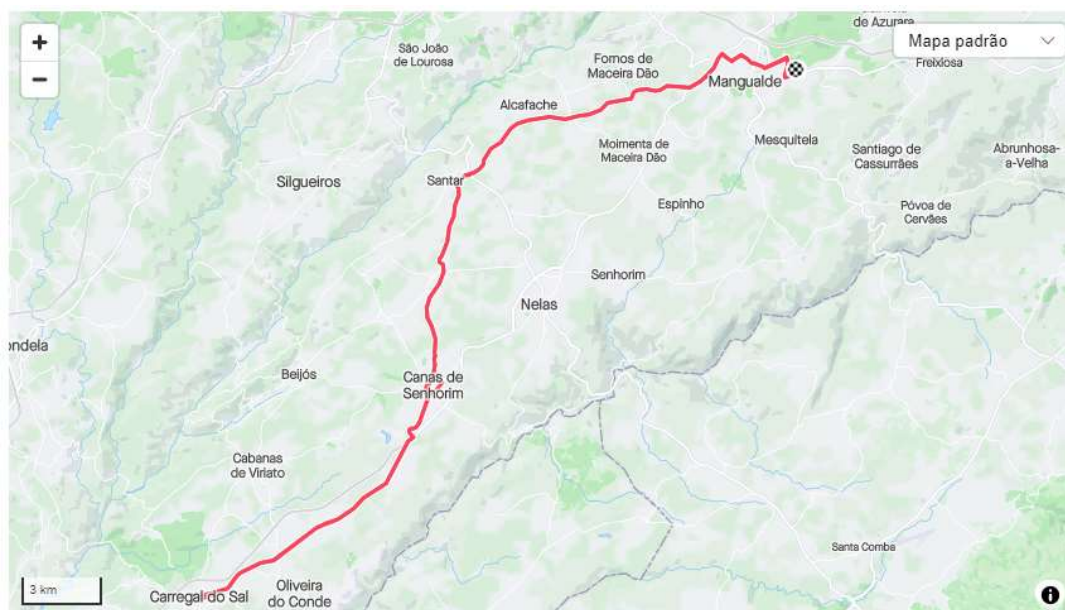


Figura 63 – Percurso efetuado para conferir a autonomia da *E-bike*. Fonte: [50].

Detalhes

📍 73,6 km 🏔️ 833 m

Figura 64 – Distância percorrida e acumulado de subidas no percurso.

Com a informação disponibilizada pela APP STRAVA podemos expor alguns valores relevantes do percurso que ajudam a perceber o seu grau de dificuldade. Expõe-se na Figura 65 o perfil dos declives deste teste.



Figura 65 – Cota em relação ao nível do mar em função da distância percorrida.

Podemos ver também na Tabela 9 a inclinação e as distâncias percorridas ao longo do percurso exposto nas Figuras 63 e 65.

Tabela 9 – Inclinação em diferentes pontos do percurso. Fonte: [50].

Nome	Distância	Dif. Elevação	Incl. Média
Subida Relógio Velho	0,40 km	18 m	4,5%
N16 (PSA)	0,85 km	12 m	-1,3%
N234 → Pedreles Climb	1,65 km	28 m	0,3%
Início ZI - Corte Alcafache	4,83 km	66 m	-1,4%
Subida bairro das flores	0,51 km	37 m	7,1%
canas	0,52 km	38 m	7,2%
Sprint da Pedreira	0,43 km	9 m	1,4%
Rotunda até Pingo Doce	1,97 km	4 m	0,1%
Rotunda Cabanas até Pingo Doce Carregal	2,03 km	4 m	0,1%
Reta do Caralinda, sentido Fiais-Carregal	0,85 km	7 m	-0,5%
Reta do Pindo Doce sentido Fiais-Carregal	0,64 km	5 m	-0,1%
Reta do Salinas sentido Fiais-Carregal	0,59 km	8 m	1,0%
Reta do Pindo Doce sentido Carregal-Fiais	0,57 km	5 m	-0,2%
Reta do Caralinda, sentido Carregal-Fiais	0,89 km	9 m	0,8%
Lapa - Casal Sancho(rotunda)	11,14 km	94 m	0,4%
cenitério-4esquinas	0,46 km	12 m	2,6%
Canas de Senhorim - Carvalhal Redondo	2,95 km	42 m	1,1%
Canas Senhorim - Casal Sancho	8,08 km	83 m	0,2%
Cruz. urgeiriça- 4 Caminhos	0,77 km	26 m	3,3%
Urgeiriça - Carvalhal	1,76 km	42 m	0,5%
Descida de Carvalhal	1,64 km	82 m	-5,0%
Carvalhal Redondo - Santar	3,69 km	87 m	-1,2%
Subida da Igreja	0,36 km	20 m	5,4%
Av. Arnaldo Almeida	1,37 km	24 m	1,6%
Subida Pedralta	0,73 km	40 m	5,4%
300m até à rotunda de pedreles	0,36 km	13 m	3,7%
Subida Zona Industrial Salgueiro	0,48 km	24 m	5,0%
Manuel do Ferro Sprint 300m	0,32 km	11 m	3,5%
Cruz da Mata Sprint	0,77 km	12 m	1,5%

No início do teste, o SOC da bateria era de 100%, percorremos 73,6 km em 2 horas e 6 minutos com uma velocidade média de 35 km/h e a velocidade máxima alcançada foi de 47 km/h.

No fim do teste, o SOC da bateria era de 20%, como podemos ver na Figura 66.

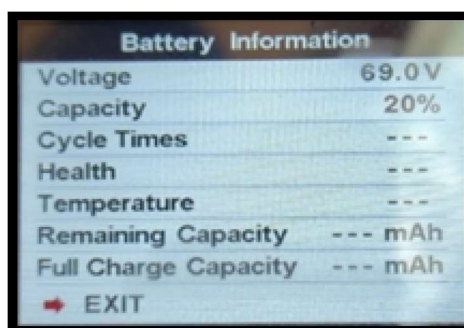


Figura 66 – Estado da bateria após realização do teste.

Após este teste a recarga total da bateria demorou 6 horas e 30 minutos e absorveu cerca de 2,3 kWh de energia da rede.

7.5 Custo da energia e das emissões indiretas de CO_2 por quilómetro

Tendo em conta os resultados obtidos com o teste real da autonomia exposto na secção 7.4, podemos calcular o consumo médio de eletricidade por quilómetro, bem como as emissões de CO_2 (indiretas) associadas, tendo em conta o *mix* de geração de eletricidade em Portugal em 2020.

Consumo de eletricidade por 100 Km

Na sessão 7.4 constatamos que para percorrer 73,6 km, o SOC da bateria passou de 100% para 20%, o que corresponde ao consumo de 80% da capacidade da bateria.

Tendo em conta a energia útil que esta pode disponibilizar (expressão 53) vemos que a energia gasta ou dispensada foi de:

$$E_{Gasta} = E_{\acute{u}til} \times 0,80 = 1670 \text{ Wh} \times 0,80 \quad [65]$$

$$E_{Gasta} = 1336 \text{ Wh}$$

Ora se em 73,6 km foram consumidos 1336 Wh, em 100 km (nas mesmas condições) seriam consumidos:

$$E_{Cons. \text{ por } 100 \text{ km}} = \frac{1336}{0,736} \cong 1815 \text{ Wh} \quad [66]$$

Mas para que a bateria possa disponibilizar essa energia, considerando que o rendimento desde a tomada até à saída da bateria é de 80%, verificamos que a energia extraída da rede é:

$$E_{Consumida} = \frac{1815}{0,8} = 2269 \text{ Wh} \quad [67]$$

Sendo este o valor do consumo real de energia por 100 Km observado no percurso onde foi realizado este teste.

Este valor é ainda de 22,69 Wh por quilómetro.

Emissões de CO_2 indiretas por quilómetro.

Tendo em conta o *mix* da geração de eletricidade no ano de 2020 em Portugal Continental que foi responsável por emissões próximas de 175 g CO_{2eq} /kWh, podemos calcular as emissões de CO_2 indiretas resultantes exclusivamente do consumo da *E-bike* [51].

$$Emiss\tilde{o}es_{100 \text{ km}} = E_{Consumida} \times Taxa \text{ emiss\~{a}o } CO_2/kWh \quad [68]$$

$$Emiss\tilde{o}es_{100 \text{ km}} = 2,269 \times 175 \text{ g}CO_2$$

$$Emiss\tilde{o}es_{100 \text{ km}} = 397,07 \text{ g } CO_2/100km$$

As emissões do CO_{2eq} atribuíveis exclusivamente ao consumo da *E-bike* são de 3,97g CO_{2eq} por quilómetro, valor que é próximo de 2,5% de um veículo automóvel citadino [52].

8. Conclusão

Com os trabalhos desenvolvidos e que conduziram à concretização desta dissertação, demonstramos que a *E-bike* implementada constitui um meio de transporte com vantagens tanto ao nível da locomoção, como da eficiência energética, da redução das emissões e da prática desportiva.

Devido aos acontecimentos económicos recentes, verifica-se que as pessoas procuram cada vez mais meios menos dispendiosos de deslocação e que os governos têm vindo a disponibilizar mais ciclovias, tanto dentro das cidades como na periferia, que permitem a deslocação dos veículos de duas rodas de forma mais rápida e segura e ainda estacionamento para velocípedes em zonas de comutação com outros meios de transporte urbano. O código da estrada tem vindo também a ser adaptado, conferindo aos ciclistas direitos idênticos aos dos motociclos e contribuindo para a maior segurança de todos.

O trabalho iniciou-se com uma minuciosa revisão do estado da arte nesta área, em seguida com a definição das especificações da *E-bike* que se pretendia implementar, ao que se seguiu a concretização do protótipo e terminou com a realização de testes de validação do seu desempenho e autonomia.

A construção do protótipo da *E-bike* não ficou muito económica devido aos requisitos de desempenho dinâmico e autonomia estipulados, os quais requeriam um motor de grande potência e uma bateria de elevada capacidade, bem como do quadro, pneus e sistemas de travagem robustos, os quais todos vieram a encarecer o protótipo.

No Capítulo 7 foram realizados ensaios para provar que os componentes escolhidos permitiam alcançar o desempenho dinâmico e a autonomia estipulados no projeto. Nos modos com propulsão elétrica pura e híbrida superámos os resultados do projeto; no modo com propulsão só do ciclista não conseguimos alcançar o valor previsto para a velocidade pelo facto de termos idealizado nos cálculos teóricos um valor da potência debitada pelo ciclista superior ao que se veio a verificar. Foram ainda calculados os custos da energia consumida por quilómetro bem como das emissões de CO₂ indiretas do uso desta *E-bike* e pudemos concluir que essas eram cerca de 2,5% de um veículo convencional.

Com este trabalho pudemos ainda concluir que com os avanços tecnológicos hoje observados nas *E-bikes*, este é um conceito com espaço para melhorias contínuas, sendo a cascata de potência/energia desde o carregador, passando pela bateria e controlador até ao motor elétrico, os alvos principais dessas melhorias.

Em trabalhos futuros de implementação de um novo protótipo deve-se privilegiar a melhoria geral da eficiência energética, com procura de componentes da cascata de potência com tecnologia de Carbetto de Silício (SiC) e na redução muito significativa do peso, com destaque para o desenvolvimento de um quadro em fibra de Carbono.

9. Referências

- [1] Iberdrola, “*Superexploração dos Recursos s Naturais*”, <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/superexploracao-dos-recursos-naturais>, acessado em fevereiro de 2022.
- [2] Fustier K., *et al.*, “*Global oil supply - Will mature field declines drive the next supply crunch?*”, Multi-Asset Natural Resources & Energy, <https://www.lemonde.fr/blog/petrole/files/2017/01/HSBC-peak-oil-report-2017.pdf> , September 2016, acessado em março de 2022.
- [3] Moolman S., “*Rise of the Electron Economy*”, <https://poweroptimal.com/rise-electron-economy/> , acessado em março de 2022.
- [4] International Energy Agency, “*Global EV Outlook 2019 - Technology report*”, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019> , May 2019, acessado em março de 2022.
- [5] Delgado J., *et al.*, “*Impacts of plug-in electric vehicles in the Portuguese electrical grid*”, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 62, Pages 372-385, July 2018, 10.1016/j.trd.2018.03.005, acessado em abril de 2022.
- [6] Bloomberg NEF’s, “*Electric Vehicle Outlook 2021*”, <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>, acessado em abril de 2022.
- [7] DR, “*Decreto-Lei n.º 102-B/2020, de 9 de dezembro*”, <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/102-b-2020-150757538>, acessado em 20 de abril de 2022.
- [8] “*The History of Ebikes*”, <https://www.radpowerbikes.com/blogs/the-scenic-route/the-history-of-ebikes>, acessado em 27/05/2022.
- [9] “*The History of Electric Bikes*”, <https://www.ebikebible.com/e-bike-facts-history-electric-bikes/>, acessado em 27/05/2022.
- [10] “*History of the Electric Bike*”, <https://electric-bike-store.co.uk/electric-bike-store-news/history-electric-bike/>, acessado em 27/05/2022.
- [11] Nguyen Ba Hung and Ocktaeck Lim; “*A review of history, development, design and research of electric bicycle*”, Applied Energy 260 (2020) 114323, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114323>, acessado em 22/06/2022.
- [12] “*SANYO ELECTRIC BIKES*”, <https://electricbikereport.com/tag/sanyo-electric-bikes/>, acessado em 15/06/2022.
- [13] “*E-BIKE MARKET - GROWTH, TRENDS, COVID-19 IMPACT, AND FORECASTS (2022-2027)*”, <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/e-bike-market>, acessado em 01/03/2022.
- [14] “*E-Bike Focus Fat-Boy – ESTGV*”, http://www.estgv.ipv.pt/mepage/2_projeto3.php, acessado em 16/06/2022.

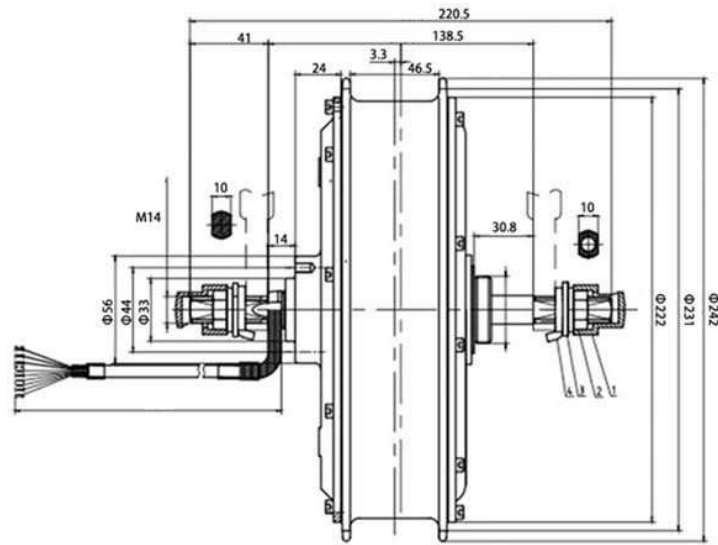
- [15] “TREK Powerfly 7”, https://www.trekbikes.com/pt/pt_PT/bicicletas/bicicletas-de-montanha/bicicletas-de-montanha-el%C3%A9tricas/powerfly, acedido em 16/06/2022.
- [16] “URTOPIA Smart E-Bike”, <https://newurtopia.de/pages/e-bike>, acedido em 6 de julho de 2022, acedido em 26/11/2022.
- [17] “Riese & Müller models”, <https://www.r-m.de/en-se/bikes/>, acedido em 26/11/2022.
- [18] Lorenzo Stilo, *et al.*; “Electric bicycles, next generation low carbon transport systems: A Survey”, Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, Volume 10, June 2021, 100347, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100347>, acedido em 20/11/2022.
- [19] Carlos Pinto “Venda de bicicletas sofre uma revolução”; https://www.mountainbikes.pt/noticias/venda-de-bicicletas-sofre-uma-revolucao_227449_102.html, acedido em 8/12/2022.
- [20] IEA 2022; “Global EV Outlook 2022 - Securing supplies for an electric future”, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>, acedido em 26/11/2022.
- [21] “Kinematics”; <https://en.wikipedia.org/wiki/Kinematics>, acedido em maio de 2022.
- [22] “Leis de Newton”; https://pt.wikipedia.org/wiki/Leis_de_Newton, acedido em março de 2022.
- [23] “Understanding Rolling Resistance”, <https://d3laewezlz9ul2.cloudfront.net/wp-content/uploads/2018/07/13142056/image8.png>, acedido em junho de 2022.
- [24] Silva, José C.; “Sistema de mobilidade elétrica de duas rodas de elevada eficiência e performance”, Dissertação de mestrado do DEE da ESTGV, acedido em 15 de junho de 2022.
- [25] Mehrdad Ehsani *et al.*; “Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles - Fundamentals, Theory, and Design”, ISBN 0-8493-3154-4, 2004, E-Book online em https://www.academia.edu/35232211/Modern_Electric_Hybrid_Electric_and_Fuel_Cell_Vehicles_Mehrdad_Ehsani, Acedido em junho de 2022.
- [26] Gelson Luz; “2022: Peso Específico do Ar (Várias temperaturas, unidades e meu Infográfico!)”, <https://www.materiais.gelsonluz.com/2018/09/peso-especifico-do-ar.html>, acedido em junho de 2022.
- [27] “Mechanics”; https://www.princeton.edu/~maelabs/hpt/mechanics/mecha_55.htm, acedido em junho de 2022.
- [28] ELSEVIER; “Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics”, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610518305762>, acedido em junho de 2022.
- [29] Researchgate; “CFD analysis of an exceptional cyclist sprint position”, may 2019, https://www.researchgate.net/publication/331366310_CFD_analysis_of_an_exceptional_cyclist_sprint_position/figures?lo=1, acedido em junho de 2022.

- [30] Dassi bikes; “*Graphene frames are coming, and they could weigh just 350g*”, <https://www.cyclingweekly.com/news/product-news/dassi-graphene-frame-260002>, acessado em 27 de junho de 2022.
- [31] Resnick, D. Halliday e K. Krane; “*Física I*”, Companhia Editorial Continental, Tercera edição: 1993; décima segunda reimpressão: 2001.
- [32] J. Larminie e J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained - Second Edition*, United Kingdom: A John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [33] Carpes, Filipe Pivetta, “*Aplicação de força no pedal em prova de ciclismo 40 km contra-relógio simulada: estudo preliminar*”, Rev. bras. Educ. Fís. Esp., São Paulo, v.19, n.2, p.105-13, abr./jun. 2005; file:///C:/Users/Joaquim%20Delgado/Downloads/16587-Texto%20do%20artigo-19737-1-10-20120522%20(1).pdf, acessado em 3 de dezembro de 2022.
- [34] Delgado, Joaquim, “*Mobilidade Elétrica - Exercícios práticos resolvidos*”, Publicação da ESTGV, 2018.
- [35] Pro racing; “*ROUE AVANT*”; https://www.proracingservice.com/129521-large_default/roue-avant-did-21-yamaha-yz-yzf-wrf-1999-2021.jpg, acessado em maio de 2022.
- [36] Grin Technologies; “*Simulate*”; https://ebikes.ca/tools/simulator.html?motor=MX4504&hp=120&motor_b=9C212_6T_SA&hp_b=120&batt=cust_72_0.2_29&cont=cust_72_120_0.03_V&wheel=18i&add=false&blue=Nm&axis=rpm&mass=115&frame=mtn_tuck, acessado em maio de 2022.
- [37] Rosimar Helena; “*Ciclista em bicicleta de montanha*”, <https://br.pinterest.com/pin/623607879646219604/>, acessado em maio de 2022.
- [38] “*Pedal 44 dentes*”, https://www.ciadopedal.com.br/19865-thickbox_default/pedivela-com-engrenagem-single-44-dentes-preta-longheng.jpg, acessado em março de 2022.
- [39] “*Roda dentada*”, <https://www.pieces-rieju.com/images/stories/virtuemart/product/pignon-am6-12-dents-005.580.6070.jpg>, acessado em junho de 2022.
- [40] Xin Li et al; “*Review on comprehending and enhancing the initial Coulombic efficiency of anode materials in lithium-ion/sodium-ion batteries*”, Elsevier Nano Energy, Volume 77, November 2020, 105143.
- [41] Zé Lisboa, “*A importância da altura e do comprimento de uma bicicleta. (as dimensões do quadro)*”, <https://bicicletascardoso.wordpress.com/2020/09/27/quadros/>, acessado em junho de 2022.

- [42] MTB Brasília, " *A importância da geometria na construção dos quadros de bicicleta*", Tilt. Disponível em: <https://www.mtbbrasil.com.br/2015/07/26/a-importancia-da-geometria-na-construcao-dos-quadros-de-bicicleta/>, acessado em dezembro 2021.
- [43] Tuvalum, " *AVERIGUA CUÁL ES TU TALLA DE BICICLETA PERFECTA*", Tilt. Disponível em: <https://tuvalum.pt/info/guia-tamanhos-bicicleta>, acessado em dezembro 2021.
- [44] Vector, " *Vector Typhoon E-Bike Frame* ", <https://vectorebike.com/frames/vector-frame>, acessado em junho de 2022.
- [45] R. Araújo, " *Desenvolvimento de uma Bicicleta Elétrica*", Universidade do Minho, 2012. Disponível em: <http://intranet.dei.uminho.pt/gdmi/galeria/temas/pdf/52680.pdf>, acessado em novembro 2021.
- [46] Pedro Areias, " *Sistema de Equilíbrio de Células de Iões de Lítio*" Disponível em: https://sigarra.up.pt/ffup/pt/pub_geral.show_file?pi_doc_id=56182, acessado em dezembro 2021.
- [47] INNER MOUNTAIN OUTFITTERS, " *LG 21700 INR21700M50LT 5000mAh High Discharge Flat Top* ", <https://www.innermountainoutfitters.com/products/lg-21700-inr21700m50lt-5000mah-high-discharge-flat-top>, acessado em junho de 2022.
- [48] " *Placa de proteção de bateria de lítio 20s bms 72v 3.7v* ", <https://pt.aliexpress.com/item/4000272722788.html?gatewayAdapt=glo2bra>, acessado em junho de 2022.
- [49] Kellycontrollers.eu, " *KLS7212S* ", <https://www.kellycontrollers.eu/kls7212s>, acessado em junho de 2022.
- [50] STRAVA, " *Rota de ciclismo* ", <https://www.strava.com/routes/3050446265354987518?v2=true>, acessado em janeiro de 2023.
- [51] Agência Portuguesa do Ambiente, " *Fator de Emissão da Eletricidade – 2022* ", https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Inventarios/2022FEGEEEletricidade.pdf, acessado janeiro de 2023.
- [52] Atualidade Parlamento Europeu; " *Emissões de dióxido de carbono nos carros: factos e números (infografia)* ", <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20190313STO31218/emissoes-de-co2-dos-carros-factos-e-numeros-infografias>, acessado em janeiro de 2023.

Anexos

Anexo 1 – Motor Eléctrico



Max load speed	48V	60V	72V	84V	96V
3T	560r	700r	840r	980r	1120r
4T	430r	535r	645r	750r	860r
5T	350r	435r	525r	610r	700r

The above data is for reference only!



Rated Voltage	60/72V	Dropout	142mm
Rated Power	3000W	Brake Type	Disk Brake
Wheel Diameter	17-28"	Cabling Route	Shaft side Left
Rated Speed	60-70	Freewheel	6S
Magnet Poles(2p)	23	Operating Temperature	-20-45℃
Hallsensor	Double	Efficiency (%)	≥ 83%
Temp Sensor	Optional	Noise Grade (DB)	≤ 55
Position	Rear Wheel	iP Grade	IP54
Construction	Gearless Motor	Salt Spray Teat Standard(h)	24/96

The motor is recommended for all bikes built for a sporty driving experience. It has the best price-performance ratio and offers the best chance of future drive expansion. The optimal controller should be 45A with a voltage of 48 or 60V (We highly recommend SINUS controller) so that the motor will heat the least at the highest power. The 16x4 motor version is the most universal coil combining high maximum speed and high torque. We recommend such a winding when converting a classic bicycle to its electric sports version.

The optimal selection of the Mxus 3K motor depending on the size of the rim is as follows:

- up to 24" = faster 21x3 (3T) winding
- 26" = 16x4 universal (4T)
- 27.5 / 28/29" = 12x5 (5T) low speed

The motor has two spare sets of Hall sensors! Every day we drive with one set connected. In the event of a failure of Hall sensors, we can connect a second set.

High-quality Mxus motor. This is the latest version of the motor, the so-called "v3-Turbo"

- Winding: 16x4 = 4T
- Torque per Ampere: 4T = 1.07Nm / A
- RPM to Volt (Kt): 4T = 8.9 Kv
- motor type: 16x4, under 36 spokes
- Nominal power: 3000W at 60V
- Supply voltage: 24-120V
- Maximum continuous current: 50A
- Maximum continuous power: up to 5000W (~ 50-65A)
- Maximum instantaneous power: up to 7000W (80-90A)
- Speed for the 26" rim: about 1 km / h for each 1V of power supply
- Torque: 125Nm
- Weight: 9.4 kg
- Fork spacing (dropout): 145mm (read below)
- Sensor: yes
- Freewheel installation: classic screw-on, 1-5s
- Number of magnets: 46 (23 pairs)

Anexo 2 – Bateria

General Information

Scope: This product specification defines the requirements of the rechargeable lithium ion battery to be supplied to the Customer by LG Chem.

Product classification: Cylindrical rechargeable lithium ion battery

Model name: INR21700 M50

Nominal Specification

Item	Condition / Note	Specification
2.1 Energy	Std. charge / discharge	Nominal 18.20Wh Minimum 17.60Wh
2.2 Nominal Voltage	Average	3.63V
2.3 Nominal Shipping SOC		30%
2.4 Standard Charge (Refer to 4.2.1)	Constant current Constant voltage End current(Cut off)	0.3C (1,455mA) 4.2V 50mA
2.5 Max. Charge Voltage		4.20 ± 0.05V
2.6 Max. Charge Current	0 ~ 25℃	0.3C (1,455mA)
	25 ~ 50℃	0.7C (3,395mA)
2.7 Standard Discharge (Refer to 4.2.2)	Constant current End voltage(Cut off)	0.2C (970mA) 2.50V
2.8 Max. Pulse Discharge Power	Pulse Power(10sec), 25 °C ± 2 °C	≤ 80W (SOC 80%)
2.9 Max. Discharge Current	-30 ~ -20℃	0.2C(970mA)
	-20 ~ 5℃	0.3C(1,455mA)
	5 ~ 45℃	1.5C(7,275mA)
	45 ~ 60℃	1.5C(7,275mA)
2.10 Weight	Without washer	68.0 ± 1.0 g
2.11 Storage Temperature (for shipping state)	1 day	-40℃
	1 month	-20 ~ 60℃
	3 months	-20 ~ 45℃
	1 year	-20 ~ 20℃

4.3 Electrical Specification

Item	Condition	Specification
4.3.1 Initial AC Impedance	Cell shall be measured at 1kHz after charge per 4.2.1.	$\leq 25 \text{ m}\Omega$, without PTC
4.3.2 Initial DC Resistance	Cell shall be charged per 4.2.1 and discharged to the SOC (states of charge) 50%. Measurement of internal impedance under DC loads at constant current of 0.5C for 30 sec at $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.	$30 \pm 6 \text{ m}\Omega$, without PTC
4.3.3 Initial Energy	Cells shall be charged per 4.2.1 and discharged per 4.2.2 within 1h after full charge.	$\geq 17.6 \text{ Wh}$
4.3.4 Cycle Life	Cells shall be charged and discharged per 4.2.3 for 500 cycles. A cycle is defined as one charge and one discharge. 501st discharge energy shall be measured per 4.2.1 and 4.2.2.	$\geq 80\%$ (of Wh_{\min} in 2.1)
4.3.5 Self discharge	Cells shall not show evidence of internal short circuits or high self-discharge rates upon receipt. Non-conforming cells will be identified by measuring OCV of minimum 100 cells from a given lot to determine the nominal OCV for that lot of cells at the time of measurement. Cells that deviate more than 5 standard deviation from the mean lot OCV will be rejected and returned to LG for replacement.	

4.4 Environmental specification.

Item	Condition		Specification
4.4.1 Storage Characteristics	Cells shall be charged per 4.2.1 and stored in a temperature-controlled environment at $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ for 30 days. After storage, cells shall be discharged per 4.2.2 to obtain the remaining energy*.		Energy remaining rate $\geq 90\%$ (Wh_{\min} in 2.1)
4.4.2 High Temperature Storage Test	Cells shall be charged per 4.2.1 and stored in a temperature-controlled environment at 60°C for 1 week. After storage, cells shall be discharged per 4.2.2 and cycled per 4.2.3 for 3 cycles to obtain recovered energy**.		No leakage, Energy recovery rate $\geq 80\%$
4.4.3 Thermal Shock Test	65°C (8h) \leftarrow 3hrs \rightarrow -20°C (8h) for 8 cycles with cells charged per 4.2.1 After test, cells are discharged per 4.2.2 and cycled per 4.2.3 for 3 cycles to obtain recovered energy.		No leakage Energy recovery rate $\geq 80\%$
4.4.4 Temperature Dependency of Capacity	Cells shall be charged per 4.2.1 at $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ and discharged per 4.2.2 at the following temperatures.		
	Charge	Discharge	Energy
	25°C	-10°C	70% of Wh_{ini}
		0°C	80% of Wh_{ini}
		25°C	100% of Wh_{ini}
		60°C	95% of Wh_{ini}

Anexo 3 – Controlador

Overview

This manual introduces the Kelly Small sinusoidal wave brushless BLDC motor controllers' features, their installation and their maintenance. Read the manual carefully and thoroughly before using the controller. If you have any questions, please contact the support center of Kelly Controls, LLC. Kelly's programmable motor controllers provide efficient, smooth and quiet controls for electric motorcycles, golf carts and go-carts, as well as industrial motor control. It is mainly supposed to solve noise problems of BLDC motor driving application. The KLS-S motor controller must be based on hall sensors type. KLS-S controller can not support sensorless brushless motor for now. Compared to the traditional trapezoidal waveform control technology, this technique based on sinusoidal wave driving technology to reduce the operation noise and 1/3 switching loss, which well meets the noise reduction and efficiency requirements in the application of DC brushless motor. It uses high power MOSFET's and, SVPWM and FOC to achieve efficiencies of up to 99% in most cases. A powerful microprocessor brings in comprehensive and precise control to the controllers. It also allows users to adjust parameters, conduct tests, and obtain diagnostic information quickly and easily. People can program the KLS controller on PC software and Android App. There is one more choice for customers to program KLS controller now. The APP software is based on Tablet with Android OS. Customers may add a Z-TEK USB to RS232 cable for programming KLS controller if they want to use Android Tablet. Both PC software and Android APP can provide one screen to monitor the controller parameters. Sometimes people can use a small Android Tablet as display device

General functions

- (1) Extended fault detection and protection. The LED flashing pattern indicates the fault sources. Customers can read the error code in PC software or Android Tablet also.
- (2) Monitoring battery voltage. It will stop driving if the battery voltage is too high and it will progressively cut back motor drive power as battery voltage drops until it cuts out altogether at the preset "Low Battery Voltage" setting.
- (3) Built-in current loop and over current protection.
- (4) Configurable motor temperature protection range.
- (5) Current cutback at low temperature and high temperature to protect battery and controller. The current begins to ramp down at 90 °C case temperature, shutting down at 100 °C.
- (6) The controller keeps monitoring battery recharging voltage during regen braking.
- (7) Maximum reverse speed and forward speed can be configured between 20% and 100% respectively and separately.
- (8) A 4pin connector to RS232 port and a Z-TEK USB to RS232 cable allows for configuration, programming and software upgrades using the tablet which must be based on Android OS now. People can do the same things on PC software by using a standard USB to RS232 cable instead.
- (9) Provision of a +5 volt and +12 volt output to supply various kinds of hall sensors.
- (10) 5 switch inputs which are activated by connection to 12V. Default to throttle switch, brake switch, reversing switch, forward switch and Boost switch.

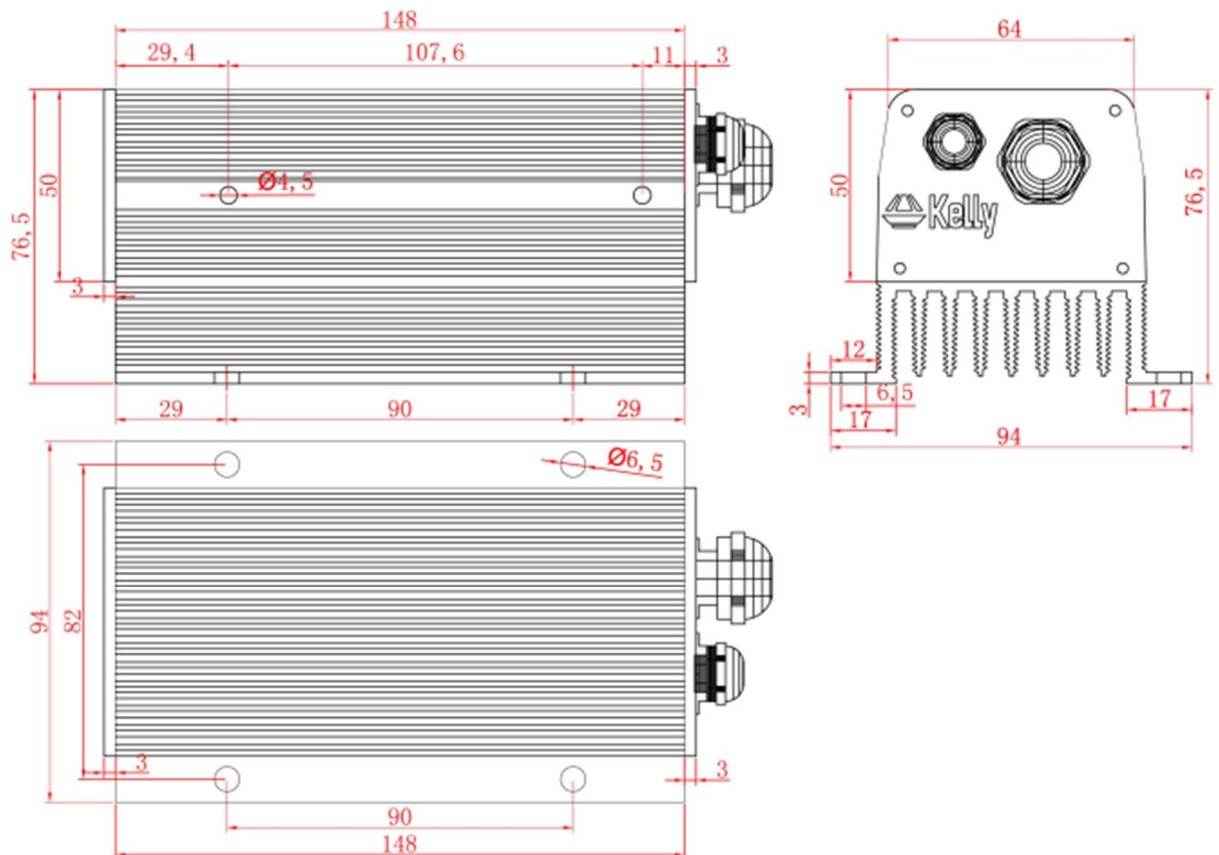
- (11) 3 analog 0-5V inputs that default to throttle input, Brake analog input and motor temperature input.
- (12) Copy signal of one of hall sensors.
- (13) Configurable boost switch. Enables the maximum output power achievable if the switch is turned on. The effect is the same as full throttle position even if you don't turn throttle at all.
- (14) 12V brake switch input used different port from motor temperature sensor. You can use both brake switch and motor temperature sensor functions at the same time on the latest version. Pin 25 is 12V brake switch input port. Pin 1 is motor temperature sensor input port.
- (15) Optional joystick throttle. A bi-symmetrical 0-5V signal for both forward and reversing.
- (16) Configurable motor over-temperature detection and protection with the recommended thermistor KTY84-130/150 or KTY83-122.
- (17) 3 hall position sensor inputs. Open collector, pull up provided.
- (18) Brake analog regen mode. This regen mode doesn't need brake switch to support any more on KLS controller. Only available from software version 0106 or advanced version. KLS controller can not support reflashing firmware by default.
- (19) Enhanced regen brake function. A novel ABS technique provides powerful and smooth regen. The regen can happen at any speeds until zero speed.
- (20) Cruise control. Only can be activated in reversing direction.
- (21) Bluetooth function. Required a small Bluetooth converter which needs to be purchased in addition from our website. This small converter is only useful for KLS controller.

Specifications

- Frequency of Operation: 10KHz or 20KHz.
- Standby Battery Current: < 0.5mA.
- 5V or 12V Sensor Supply Current: 40mA.
- Controller supply voltage range: PWR, 18V to 90V for controllers rated equal or lower than 72V.
- Supply Current, PWR, 30mA Typical.
- Configurable battery voltage range, B+. Max operating range: 18V to 1.25*Nominal Voltage.
- Standard Throttle Input: 0-5 Volts (3-wire resistive pot), 1-4 Volts (hall active throttle).
- Throttle Input: 0-5 Volts. Can use 3-wire pot to produce 0-5V signal.
- Main Contactor Coil Driver < 2A.
- Full Power Operating Temperature Range: 0 °C to 70 °C (MOSFET temperature).
- Operating Temperature Range: -40 °C to 100 °C (MOSFET temperature).
- Max Battery Current : Configurable.

Kelly KLS-S Brushless Motor Controller			
Model	10 seconds Current(Amp)	Continuous Current(Amp)	Voltage(Volt)
KLS4812S	120	50	24-48
KLS7212S	120	50	24-72
KLS6018S	240	100	24-60
KLS6025S	300	120	24-60
KLS6030S	350	150	24-60
KLS7218S	200	80	24-72
KLS7230S	300	120	24-72
KLS7240S	350	150	24-72
1.48V model: range of the battery voltage is 24V-48V. 1.60V model: range of the battery voltage is 24V-60V. 3.72V model: range of the battery voltage is 24V-72V.			

Mounting the Controller



Pin-out do controlador

DJ7091Y-2.3-11 Pin Definition

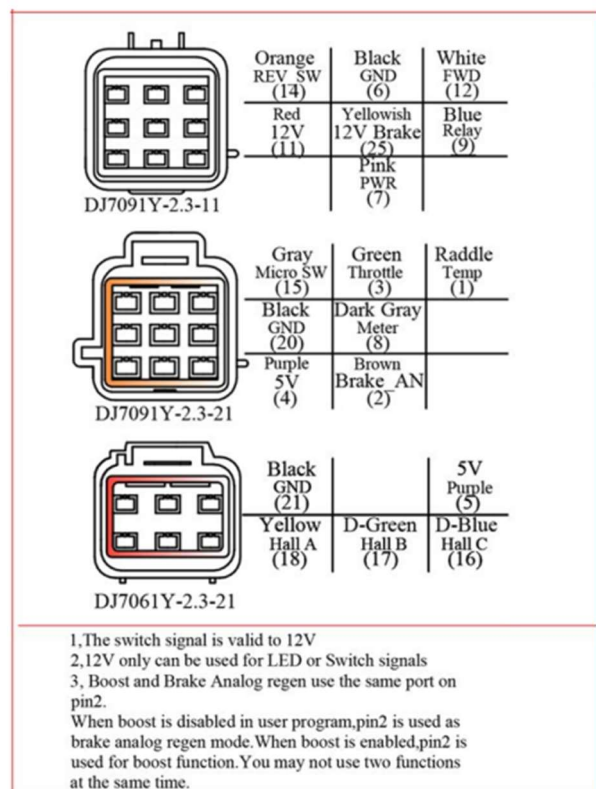
- (14) REV_SW: Reverse switch input. Orange
- (6) RTN: Signal return or power supply return. Black
- (12) FWD: Forward switch White
- (11) 12V: 12V Source Red
- (9) Relay: Main contactor driver. Blue
- (7) PWR: Controller power supply (input). Pink
- (25) 12V brake

DJ7091Y-2.3-21 Pin Definition

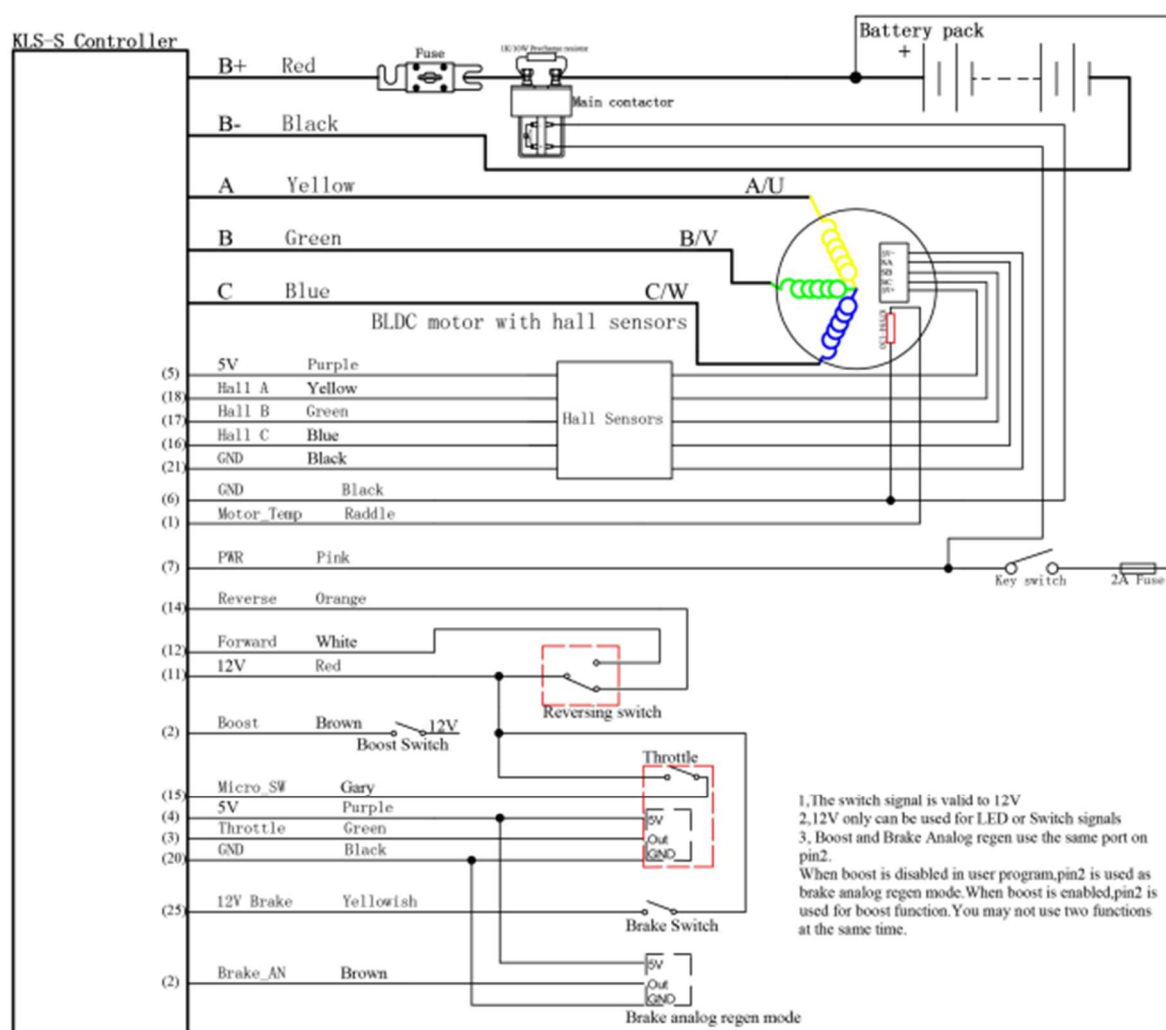
- (15) Micro_SW: Throttle switch input. Gray
- (3) Throttle: Throttle analog input, 0-5V. Green
- (1) Temp: Motor temperature sensor input. Raddle.
- (20) RTN: Signal return. Black
- (8) Meter: Copy signal of hall sensors. Dark Gray
- (4) 5V: 5V supply output, <40mA. Purple
- (2) Brake_AN : Brake variable regen or Boost function. Brown

DJ7061Y-2.3-21 Pin Definition

- (21) RTN: Signal return. Black
- (5) 5V: 5V supply output, <40mA. Purple
- (18) Hall A: Hall phase A. Yellow
- (17) Hall B: Hall phase B. Dark Green
- (16) Hall C: Hall phase C.



Esquema elétrico genérico da *E-bike*



Programação do controlador

Programmable Parameters

KLS Configuration program allow users to set parameters according to the vehicle actual working environment so as to be at its best.

The default parameters of the controller are not recommended for all applications. Make sure set the proper parameters before making any test to avoid danger.

Customers can do program on PC software or Android App. The Android Tablet is preferred. First of all, people need to do Identification angle function for KLS controller before running the motor. The controller needs to be connected to batteries, motor and throttle before Identification operation. That is to say, it is not enough to connect only power supply(PWR=pin7) to batteries for Identification Angle operation.

Please download the instruction how to use Identification angle function from our website.

www.kellycontroller.com/support.php

4.1 Step 1

(1)Low Volt: The min voltage of reporting this fault - Range 18~90

Controller will not operate when battery voltage is near the value so as to protect battery.

Suggestion: Set according to the practical situation. By default, it is set at 18V.

(2)Over Volt: The max voltage of reporting this fault - Range 18~90

Controller will not operate when battery voltage is higher than the value so as to protect battery and controller.

Suggestion: Set according to the practical situation.

By default, It is 60V for 48V controller. It is 80V for 60V controller. It is 90V for 72V controller.

Controller Rated voltage	Under Voltage Range (V)	Over Voltage Range(V)
48V	18~60	18~60
60V	18~80	18~80
72V	18~90	18~90

Figure 4.1

(3) Current Percent: Phase Current Percent. Range: 20~100

Functional description: The max motor current is (The Value * Peak Current of the Controller).

Suggestion: Factory default

(4) Battery Limit: Battery Limit Current, Limit the max value of Battery Current. Range: 20~100 Functional description: Set max battery current so as to protect battery. A lower value means a lower battery output current and better protective effect. But excessively low value will affect acceleration. Suggestion: Factory default is 100%.

(5) Identification Angle: Please download the instruction to how to use Identification angle function from the website.

If you can read 85 in Identification Angle item, that is to say, the system is stable and normal. Please fill in 170 for Identification Angle item in user program. Then please click Write button in user program. Please wait a few seconds before restart the power supply. You will see some info on Monitor screen after power supply is reset. If you see Reset error on the Monitor screen, that is to say, the auto_Identification is finished. You can see 85 in the Identification Angle item again. And the controller will blink error code. This is normal. Please reset the power supply again. Then everything will be fine. The motor is ready to be driven by the KLS controller. Range: 85 or 170, nothing else.

(6) TPS Low Err: Hall active pedal, if lower than the value, report the fault of TPS Type. Range: 0~20

(7) TPS High Err: Hall active pedal, if higher than the value, report the fault of TPS Type. Range: 80~100

As you may know, the output of hall throttle from Kelly is about from 0.86V to 4.2V. Our controller will report 3.3 error code if the output of hall throttle is below 0.5V or above 4.5V by default. The controller will think the hall throttle is shorted or damaged if the output is beyond the range from 0.5V to 4.5V.

You can adjust the threshold voltage below or above 0.5V. The controller will report the 3.3 code to protect the system according to different types of hall throttle. Because there are many different hall throttle suppliers in the world. The initial output can not be always in the range of 0.5V to 4.5V.

But it doesn't make any differences if you choose 0-5V or 3-wire pot for the throttle type. That is to say, these two settings are only useful for hall active throttle or pedal when you chose throttle type at 2.

As the same goes, it is valid to adjust the high threshold voltage above 4.5V or below 4.5V. Usually the hall output voltage is 4.2V Max. If you adjust it to lower value which is near 4.2V, it may trigger the error code in normal way.

(8) TPS Type: TPS Type, 1:0-5V 3-wire 0-5K pot, 5K is normal, 2K-20K can be used; 2: Hall active throttle or pedal. Range: 1~2

(9) TPS Dead Low: TPS Dead Zone Low. Range: 5~40

Functional description: Set throttle effective starting point

Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is $20\% \times 5V = 1.0V$. (10) TPS Dead High: TPS Dead Zone High. Range: 60~95

Functional description: Set throttle effective ending point

Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is $80\% \times 5V = 4.0V$.

(11) Brake sensor type: Brake sensor type for brake variable regen mode: 1:0-5V 3-wire 0-5K pot, 5K is normal, 2K-20K can be used; 2: Hall active throttle or pedal.

Range: 1~2

(12) Brake sensor Dead Low: Brake sensor Dead Zone Low. Range: 5~40

Functional description: Set throttle effective starting point. Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is $20\% \times 5V = 1.0V$.

(13) Brake sensor Dead High: Brake sensor Dead Zone High. Range: 60~95

Functional description: Set throttle effective ending point. Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is $80\% \times 5V = 4.0V$.

(14) Max output Fre: Max output frequency. Unit: Hz

Functional description: It will affect the top speed of the motor. Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is 1000Hz. Please don't set it 1000Hz above.

(15) Max Speed: Max Speed [rpm]. Range: 0~15000 By default, it is set at 4000. Software version 0109 can support 15000RPM settings in user program.

(16) Max Fwd Speed %: The forward speed of the percentage of maximum speed. Range: 20~100 By default, it is set at 100%

(17) Max Rev Speed %: The reverse speed of the percentage of maximum speed. Range: 20~100 By default, it is set at 100%

(18) PWM Frequency: Frequency of PWM operation. Unit: KHz Functional description: 20KHz is better for hub motor with strict quiet control. Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is 20KHz. Please don't set it 20KHz above.

Value Range: 10KHz or 20KHz

(19) Start-up H-Pedal:

Value range: Enable and Disable

Functional description: If enabled, the controller will detect the current pedal status at power up. If throttle got effective output, the controller will report fault and not operate.

Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is Enable.

(20) Brake H-Pedal: Releasing Brake High Pedal Disable

Value range: Enable and Disable

Functional description: If enabled, the controller will detect the current pedal status when release the brake. If throttle got effective output, the controller will report fault and not operate.

Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is Disable.

(21) NTL H-Pedal: Neutral position High Pedal Disable. Only useful when Three gears switch function is enabled.

If enable, the controller will detect the current pedal position or signal When the switch is in neutral position.

If the throttle got effective output signal, the controller will not operate and report fault code.

Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is Disable.

(22) Joystick function:

If enable, the controller can drive the motor on two directions without using any reversing switch. Just one single throttle can drive the motor on forward and reversing direction. The stick shift throttle firmware can be called wig-wag or joystick operation. It is only a software

function. Usually It is useful for electric boat project. You still can use the common 0-5K pot or 0-5V throttle for the controller. If you don't choose the joystick, you operated the throttle in this way. The motor speed will increase when the throttle is from 0V to 5V.

If you enable joystick for this controller in user program, you will start the motor from 2.5V position. 2.6V to 5V is forward. 2.4V to 0V is backward. 2.4V to 2.6V is the throttle dead zone. Customers can adjust the throttle dead zone in user program also.

Please note the common throttle will spring back to original position if you release the throttle. Suggestion: factory default is Disable.

(23) Three Gears switch: It is used for function of F-N-R control.

Please check the wiring diagram in the manual for F-N-R control. Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is Disable.

(20-A) Three Gears Switch

Value range: Enable and Disable

Functional description: If enabled, the Forward switch will be activated. Please see figure 4.1.

Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is Disable. (20-B) Foot Switch

Value range: Enable and Disable

Functional description: If enabled, the foot switch will be activated. The controller will not accept the throttle signal if the foot switch is turned off. Please see figure 4.1.

Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is Disable.

Configuration		Pin Status			Running Status
Forward Switch	Foot Switch	FWD_SW (12)	REV_SW (14)	Foot (15)	
Enable	Disable	OFF	OFF	x	Neutral
		OFF	ON	x	Reverse
		ON	OFF	x	Forward
		ON	ON	x	Neutral
Disable	Enable	x	OFF	OFF	Can't operate
		x	ON	OFF	Can't operate
		x	ON	ON	Reverse
		x	OFF	ON	Forward
Disable	Disable	x	OFF	x	Forward
		x	ON	x	Reverse

Note: X means can be on or off

Figure 4.2

(24) Boost: If enabled, the controller will output max power for a while.

Boost function is just full throttle position when you turn on boost switch even if the throttle is not operated at all.

The boost function is still based on limiting of the motor current and battery current settings in user program.

If disabled, the controller can provide brake sensor regen mode on the same pin as pin2. In simple, boost and brake analog regen used the same pin as pin2.

Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is Disable. So the default function is brake variable regen mode.

(25) Foot switch: It is used for microswitch. If enabled, the controller will only accept the throttle

signal after received the valid foot switch signal. If there is no foot switch signal, the controller will ignore the throttle signal.

Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is Disable.

(26) Cruise Control: Value range: Enable and Disable

If enable, if you hold throttle at certain position about 3-4 seconds, the controller will get into Cruise control. The Cruise function can not be activated in reversing direction.

Release throttle and turn the throttle again or turn on the brake switch will make the Cruise control quit. Suggestion: factory default is Disable.

(27) Change Direction:

If the direction is not what you expected after finish the Identification angle operation, please just choose Change Direction item.

Please click Write button to activate Change Direction function. The motor direction will be what you expected after the power supply is reset. Suggestion: factory default is Disable.

4.2 Step 2

(1) Motor Poles: Motor Poles, The pair pole number*2. Range: 2~128

Suggestion: Set according to the real motor poles on the nameplate of the motor, factory default is at 8.

(2) Speed Sensor Type: Speed Sensor Type, 2:Hal, 3:Resolver, 4:Line Hall. Range: 2~4

Different sensors type. By default, it is set at 2

If you have a motor with 5V, Sin/Cosin, GND speed sensors, please choose it at 4. And please inquire the KLS-8080IPS model before ordering.

(3) Resolver Poles: Resolver Poles, The pair pole number*2. Range: 2~32

It is only used for the Resolver sensor type.

(4) Motor Temp Sensor: Motor Temp Sensor, 0:None, 1:KTY84-130 or 150. Range: 0~1

High Temp Cut Out °C: Motor High Temp Cut Out, nominal value 130°C. Range: 60~170

Resume ° C: Motor High Temp Resume Temp, nominal value 110 ° C. The controller will resume work when the motor temp is at 110 degrees inside. Range: 60~170

(5) Line Hall Zero: It is only useful when the speed sensor is at 4.

Zero-Crossing point of Sine/Cosine linear hall sensors output signal. Usually the Sine/Cosine speed sensor supplier provided sensors with 2.5V or 3.0V zero-crossing point.

You can change it back between 2.5V and 3.0V if the motor can not run.

Suggestion: Set according to the practical situation, factory default is 613(3.0V) for Mars 1114/1115/1302/1304 from Motenergy company.

Value Range:0-1023 maps 0-5V

(6) Line Hall Amplitude: The position signal based on Zero-crossing point. It is only useful when the speed sensor is at 4.

For example, if the Line hall Amplitude is 1.1V, the signal output of Sine/Cosine sensors is from 1.9V to 4.1V. ($3-1.1=1.9V$; $3+1.1V=4.1V$)

Value Range:0-1023 maps 0-5V

(7) Line Hall High Err: It is only useful when the speed sensor is at 4.

If the signal output of Sine/Cosine speed sensor is above this setting, the controller will report hall error. Please adjust Line Hall High Err to a higher value to eliminate this error.

Value Range:0-1023 maps 0-5V

(8) Line Hall Low Err: It is only useful when the speed sensor is at 4. If the signal output of Sine/Cosine speed sensor is below this setting, the controller will report hall error also. Please adjust Line Hall Low Err to a lower value to eliminate this error.

Value Range:0-1023 maps 0-5V.

4.3 Step 3

(1) RLS_TPS Brk %: RLS TPS Braking Percent, the percent of Releasing Pedal BRK in max braking. Range: 0~50

This is used to adjust the regen current of releasing throttle regen mode type. The regen will happen as long as the throttle is released completely.

Factory set is 0

(2) NTL Brk %: NTL Braking Percent, the percent of Neutral Braking in max braking. Range: 0~50. Only useful when you enable Three gears switch in user program. The regen will happen when you turn F-N-R switch from Forward or backward to Neutral position. Factory set is 0

(3) Accel Time: Accel Time, the time of TPS Torque from 0 to max, accuracy 0.1s, 5 is equal to 0.5s. Range: 1~250. Factory set is 10

(4) Accel Rls Time: Accel Release Time, the time of TPS Torque from max to 0, accuracy 0.1s. Range: 1~250 Factory set is 1

(5) Brake Time: Brake Time, the time of Brake Torque from 0 to max, accuracy 0.1s. Range: 1~250 Factory set is 15

(6) Brake Rls Time: Brake Release Time, the time of Brake Torque from max to 0, accuracy 0.1s. Range: 1~250 Factory set is 1

(7) BRK_SW Brk %: BRK_SW Braking Percent, the percent of BRK_SW in max braking. Range: 0~50

The brake switch regen mode. You have to turn on the brake switch after the throttle is released for the regen to occur. Factory set is 10

(8) Brake Analog regen Brk%:It is used to adjust the max regen percentage of brake variable regen mode. This regen mode doesn't need brake switch to support any more for KLS controller.

(9) Torque Speed KP: Speed Percent Kp in Torque Mode. Range: 0~10000 Factory set is 3000
Torque Speed KI: Speed Integral Ki in Torque Mode. Range: 0~500 Factory set is 80
Speed Err Limit: Speed Error Limit in Torque Mode. Range: 50~4000 Factory set is 1000.

These three parameters are used for PID adjustment. If you think the acceleration performance is very very strong, please adjust them to a lower value respectively.

(10) Change Dir brake: Value range: Enable and Disable

It is only useful when you Enable the joystick function. If you want to get swift direction changing by using joystick function, you may enable Change Dir brake item in user program.

It will help the motor change the direction of motor quickly after you shift throttle from 0V to 5V, or from 5V to 0V.

Suggestion: factory default is Disable.

Note: Thermistor is optional. Default to KTY84-130/150 or KTY83-122

Anexo 4 – Ecrã

Product Name

- TFT display
- Model: APT TFT 750C

Electrical Parameters

- 3.2inch IPS screen
- 24V/36V/48V/52V battery supply
- Rated operating current: 40mA
- Off leakage current < 1uA
- Max output current to controller: 100mA
- Operating temperature: -20~70 °C, Storage temperature: -30~80 °C

Dimensions & Material

- Product shell is ABS, transparent window is made with high strength Acrylic.
- Dimensions : host/L110mm*W68.2mm*H68mm



Programação do *ecrã*

Functional Description

7.1 Power On/Off

Press and hold Power button for 1 second can turn on/off the display. The Display can automatically shut down when there is no operate & ride for X minutes (X could be 0~9) .

*If the display has been set password power on, you need to input the right password before start.

7.2 Assist level operating

Short press UP/DOWN button can change the assist level. Top assist level is 9, 0 for neutral. Level quantities can be adjusted according to the customer requirements.

7.3 Speed mode switch

Short press MENU button can change the speed mode, Speed->AVG Speed->MAX Speed.

*If there is no operation for 5 seconds, display will return Speed (Real-Time) display automatically.

7.4 Mileage mode switch

Short press POWER button can change the mileage mode, Trip->ODO-> Time.

7.5 Headlight/backlight On/Off

Press and hold UP button for 1 second can turn on/off the headlight, and the scree will switch to the corresponding mode.

*The motor does not work when the battery voltage is low, Display still can keep the headlight on for a while when E-bike is in riding.

7.8 Data cleanup

Press and hold UP & DOWN buttons together for 1 second can reset several temporary data, temporary data include AVG Speed / MAX Speed / Trip / Time.

* These temporary data can't be erased by power off.

8. Parameter setting

Double press MENU button (press interval less than 0.3 second) can get into setting menus, press UP/DOWN buttons to change the parameter setting, press MENU button can switch to next item. Double press

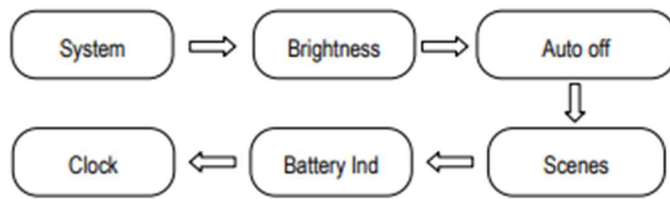
MENU button will exit from menu.

* Display will automatically quit menu when there is no operation for 30 seconds.

* For safety reasons, display can't get into MENU when riding.

* Display will quit MENU when start riding.

The order of parameters are as follow



8.1 System: Press Up / Down button to switch between Metric / Imperial.

8.2 Brightness: Press Up / Down button to change the brightness of the backlight, I is darkness , IIIII is brightness.

8.3 Auto off: Press UP/DOWN button to change the auto power off time, from 1 to 9 or OFF, the number represent time (minutes) to shutdown, default value is 5 minutes.

8.4 Scenes: Press UP/DOWN button to change the scenes

8.5 Battery Ind: Press UP/DOWN button to change the battery indicator, Voltage / Percentage / OFF. *Accurate percentage needs communication with battery

8.6 Clock: Clock setting, press MENU button get into the clock setting menu, press UP/DOWN button to set Year/Month/Day/Hour/Min/Sec.

8.7 Wheel: Press UP/DOWN can change the wheel setting, optional wheel diameter is 16/18/20/22/24/26/27/27.5/28/29/30/31 inch, 51cm~255cm represent wheel circumference (this needs controller support).

8.8 Battery: Press UP/DOWN will change battery voltage setting, optional value is 24V/36V/48V/UBE, UBE means user define value.

8.9 Start password: Press MENU button get into the password setting menu. If you had set Start input ON, you must input right password before power on, password is accorded to your setting.

8.10 Advance setting: Press MENU button can get into the advance setting menu, default password is '1919'.

8.11 Speed limit: Press UP/DOWN will change speed limit, range 10km/h~60km/h. Default value is 25km/h.

8.12 Current limit: Press UP/DOWN will change current limit, range 6A~50A. Default value is 15A.

8.13 Poles in motor: Magnetic poles inside the motor, press UP/DOWN will change pole number, range 0~15.

8.14 Start after poles: How many poles (speed sensor) need to be detected by controller before starting motor. Default value is 3.

8.15 Clockwise start: This parameter represent speed sensor turn direction, default value is Y (forward).

8.16 Throttle 6km: this parameter can set the throttle function, N represent max speed, Y represent 6Km.

8.17 Throttle Level: This parameter is functional when Throttle 6KM set N, Press UP/DOWN will change Y/N, N represent Throttle start max speed, Y represent throttle's speed is accorded to the assist level.

8.18 Start mode: Pow/ECO/STD represent Power/ECO/Standard, STD (default). Power mode means use maximum current when speed up, ECO mode means use minimum current.

8.19 Assist levels: This parameter can customize assist levels, options are 3/5/9/UBE, UBE represent factory default settings.

8.21 Factory setting: Press MENU button enter Restore Factory Settings item, set YES will restore all parameter to factory settings.

8.22 Information: Show information of the E-bike.

8.23 Product info: Get into this item can show hardware version software version

8.24 Battery info: Get into this item can show all information of battery, including Voltage, Capacity. [Cycle times, Health, Temperature of battery, Remaining Capacity, Full Charge Capacity, these items are invalid.] *These information needs to be supported by battery communication.