



**Politecnico  
di Torino**

## **Politecnico di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica  
A.A. 2023/2024

# **Carrello cargo e frullino per bicicletta a supporto di micro attività economiche in Uganda**

Relatore:

*Prof. Walter Franco*

Correlatore:

*Ing. Marcello Rava*

Candidato:

*Mattia Ciarpella*

Ottobre 2024



## Sommario

Il lavoro di tesi riguarda la progettazione e l'analisi di un carrello cargo per biciclette e di un frullino azionato da sistema a pedali, sviluppati come tecnologia appropriata per il contesto in esame, ovvero la città di Gulu, situata nel nord dell'Uganda. L'obiettivo principale del progetto è stato lo sviluppo di un dispositivo che possa contribuire a ridurre lo spreco di frutta nei mercati, trasformando quella invenduta giornaliera in frullati e succhi, e contemporaneamente generare occupazione promuovendo pratiche di imprenditorialità sostenibile, finalizzate anche a ridurre e riciclare i rifiuti in plastica presenti in loco ed al trasporto di beni di prima necessità verso villaggi rurali. Il lavoro si è concentrato non solo nella risoluzione del problema tecnico, ma anche nell'analisi dell'impatto ambientale ed economico della soluzione proposta. In particolare, il lavoro ha richiesto una prima fase di analisi del contesto di utilizzo e delle soluzioni già sviluppate, per poi proseguire con la progettazione del mezzo in ambiente CAD, supportata da analisi agli elementi finiti. Infine, sono state eseguite valutazioni di impatto ambientale ed economico del dispositivo sviluppato.

# Indice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>GLOSSARIO DEGLI ACRONIMI.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>INTRODUZIONE.....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>1 CONTESTO SOCIOECONOMICO IN UGANDA .....</b>                                    | <b>11</b> |
| 1.1 GUERRA CIVILE E ORIGINI DELLA SITUAZIONE SOCIOECONOMICA ATTUALE .....           | 12        |
| 1.2 SVILUPPO SOCIALE, ECONOMICO E UMANITARIO .....                                  | 13        |
| 1.2.1 <i>Livello di povertà</i> .....   | 13        |
| 1.2.2 <i>Sicurezza alimentare, acqua potabile e servizi igienico-sanitari</i> ..... | 14        |
| 1.2.3 <i>Elettricità</i> .....  | 15        |
| 1.3 INFRASTRUTTURE E MEZZI DI TRASPORTO .....                                       | 16        |
| 1.3.1 <i>Modelli di biciclette utilizzati</i> .....                                 | 18        |
| 1.3.2 <i>Tricicli</i> .....   | 20        |
| 1.4 TAKATAKA PLASTICS.....  | 21        |
| <b>2 STATO DELL'ARTE.....</b>   | <b>26</b> |
| 2.1 GENERAZIONE DI POTENZA DEL CORPO UMANO .....                                    | 26        |
| 2.2 MEZZI A PEDALI CON FRULLATORE INTEGRATO .....                                   | 28        |
| 2.2.1 <i>Mezzi a pedali meccanici con frullatore integrato</i> .....                | 30        |
| 2.2.2 <i>Generatore elettrico a pedali</i> .....                                    | 35        |
| 2.3 LIMITI DEI MEZZI A PEDALI PER LA CONVERSIONE DI ENERGIA.....                    | 37        |
| 2.4 MEZZI A PEDALI CARGO .....  | 38        |
| 2.4.1 <i>Tipologie di cargo disponibili</i> .....                                   | 39        |
| 2.4.2 <i>Potenziali benefici dell'utilizzo di biciclette cargo</i> .....            | 44        |
| 2.4.3 <i>Progetti cargo in Africa</i> .....   | 45        |
| 2.5 LIMITI DEI MEZZI CARGO A PEDALI .....   | 50        |
| <b>3 SCOPI, VINCOLI DEL PROGETTO E DEFINIZIONE DEL PRODOTTO .....</b>               | <b>52</b> |
| 3.1 SCOPI DEL MEZZO A PEDALI CARGO .....  | 52        |
| 3.2 PROTOTIPI REALIZZATI DA TAKATAKA PLASTICS.....                                  | 53        |
| 3.3 VINCOLI IMPOSTI DALLE NECESSITÀ LOCALI .....                                    | 57        |
| 3.4 DEFINIZIONE DELLA TIPOLOGIA DI PRODOTTO .....                                   | 58        |
| <b>4 PROGETTAZIONE DEL CARRELLO ED ANALISI FEM .....</b>                            | <b>61</b> |
| 4.1 PROPRIETÀ MECCANICHE DEI MATERIALI E DIMENSIONI DISPONIBILI .....               | 61        |
| 4.1.1 <i>Proprietà meccaniche e di fatica del copertone di camion</i> .....         | 62        |
| 4.2 PROGETTAZIONE DEL CARRELLO .....  | 65        |
| 4.2.1 <i>Concept iniziale</i> .....   | 67        |
| 4.2.2 <i>Analisi FEM: simulazione di partenza in salita</i> .....                   | 72        |
| 4.2.3 <i>Revisioni del concept</i> .....  | 75        |
| 4.3 ANALISI FEM: SIMULAZIONE STATICA E DINAMICA DEL TRAILER .....                   | 79        |
| 4.3.1 <i>Analisi statica: partenza in salita del trailer</i> .....                  | 79        |
| 4.3.2 <i>Analisi statica: simulazione di impatto con una buca</i> .....             | 81        |
| 4.3.3 <i>Analisi dinamica: Random Vibration Analysis</i> .....                      | 84        |
| 4.3.4 <i>Analisi di vita a fatica: copertone di camion</i> .....                    | 93        |
| 4.4 PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI TRASMISSIONE DEL FRULLATORE .....                  | 95        |
| 4.4.1 <i>Prima soluzione</i> .....  | 96        |
| 4.4.2 <i>Seconda soluzione</i> .....  | 99        |
| 4.5 OTTIMIZZAZIONE DEL MODELLO .....  | 104       |
| 4.5.1 <i>Sistema di ancoraggio del carico</i> .....                                 | 104       |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.5.2    | <i>Meccanismo di aggancio del braccio di traino</i> ..... | 105        |
| 4.5.3    | <i>Modello definitivo e distinta base</i> .....           | 107        |
| <b>5</b> | <b>ANALISI DI IMPATTO AMBIENTALE ED ECONOMICO</b> .....   | <b>112</b> |
| 5.1      | ANALISI DI IMPATTO AMBIENTALE LCA .....                   | 112        |
| 5.2      | ANALISI ECONOMICA .....                                   | 116        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSIONE E SVILUPPI FUTURI</b> .....                | <b>119</b> |
|          | <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....                                 | <b>122</b> |

# Indice delle figure

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1 OBIETTIVI DI SVILUPPO SOSTENIBILE (SDG) STILATI DALL'ONU (UNITED NATIONS, 2024) .....   | 8  |
| FIGURA 2 LOCAZIONE UGANDA E GEOGRAFIA INTERNA.....   | 11 |
| FIGURA 3 TREND DI POPOLAMENTO DELLE ZONE RURALI ED URBANE NEGLI ANNI (WORLD BANK, 2020B) .....   | 13 |
| FIGURA 4: TASSO DI POVERTÀ BASATO SULLA SOGLIA DI POVERTÀ INTERNAZIONALE (UNDP, 2022) .....  | 14 |
| FIGURA 5 PERCENTUALE DI ACCESSO ALL'ELETTRICITÀ IN UGANDA (IEA, 2023) .....  | 15 |
| FIGURA 6 GENERAZIONE DI ELETTRICITÀ IN UGANDA (IEA, 2023) .....  | 15 |
| FIGURA 7 RETE DELLE STRADE NAZIONALI IN UGANDA (IN ROSSO) .....  | 16 |
| FIGURA 8 ESEMPI DI STRADA NAZIONALE NON ASFALTATA (MINISTRY OF WORK AND TRANSPORT, 2013).....  | 17 |
| FIGURA 9 ESEMPIO DI STRADA ASFALTATA E MODERNIZZATA A KAMPALA, CAPITALE DELL'UGANDA (MINISTRY OF WORK AND<br>TRANSPORT, 2022) .....  | 18 |
| FIGURA 10 BICICLETTA DI TIPO ROADSTER DEL MARCHIO HERO, COMMERCIALIZZATA IN UGANDA.....  | 19 |
| FIGURA 11 ASSEMBLAGGIO DI BICICLETTE CINESI IN UN PUNTO VENDITA LOCALE NELLA CITTÀ DI GULU (BAISKELI UGANDA, 2024) .....   | 20 |
| FIGURA 12 RIFIUTI IN PLASTICA CHE OSTRUISCONO I CANALI DI SCOLO A GULU, UGANDA (BERKLEY, 2020) .....   | 21 |
| FIGURA 13 PIASTRELLE IN PLASTICA RICICLATA REALIZZATE DA TAKATAKA PLASTICS (TAKATAKA PLASTICS, 2024).....  | 22 |
| FIGURA 14 MACCHINARIO DI ESTRUSIONE REALIZZATO DA TAKATAKA IN COLLABORAZIONE CON L'UNIVERSITÀ DI GULU, UTILIZZATO<br>PER FONDERE LA PLASTICA TRITURATA (TAKATAKA PLASTICS, 2024) ..... | 22 |
| FIGURA 15 A SINISTRA "BOTTLE BANK" PER LA RACCOLTA DEI RIFIUTI IN PLASTICA, A DESTRA I CARRELLI UTILIZZATI PER IL TRASPORTO<br>DEI RIFIUTI (TAKATAKA PLASTICS, 2024) .....             | 23 |
| FIGURA 16 PROTOTIPI DI MEZZI CARGO REALIZZATI DA TAKATAKA: A SINISTRA IL PROTOTIPO DI BICICLETTA CON FRULLATORE<br>INTEGRATO E BOX CARGO ALL'ANTERIORE (BAISKELI UGANDA, 2024).....    | 24 |
| FIGURA 17 PROTOTIPI DI MEZZI CARGO REALIZZATI DA TAKATAKA: VISTA DALL'ANTERIORE (BAISKELI UGANDA, 2024).....   | 24 |
| FIGURA 18 CURVE POTENZA MECCANICA-DURATA PER DIFFERENTI TIPI DI ATTIVITÀ E INDIVIDUI (WILSON, 2004) .....  | 26 |
| FIGURA 19 RELAZIONE POTENZA-VELOCITÀ PER "UOMINI IN SALUTE" (WILSON, 2004).....  | 27 |
| FIGURA 20 ESEMPIO DI FRULLATORE ATTUATO DA MEZZO A PEDALI TRAMITE SISTEMA MECCANICO STAZIONARIO .....  | 28 |
| FIGURA 21 GENERATORE ELETTRICO COLLEGATO TRAMITE CINGHIA AL VOLANO (OKOYE, 2021).....  | 28 |
| FIGURA 22 ESEMPIO DI MEZZO A PEDALI CON SISTEMA ELETTRICO STAZIONARIO PER ALIMENTARE DISPOSITIVI.....  | 29 |
| FIGURA 23 ESEMPIO DI FRULLATORE ATTUATO TRAMITE SISTEMA MODULARE MONTATO SU UNA BICICLETTA .....   | 29 |
| FIGURA 24 SCHEMATIZZAZIONE DELLA TRASMISSIONE A FRIZIONE (BIJLI BICYCLE, 2016).....  | 30 |
| FIGURA 25 A SX PRODOTTO FENDER BLENDER PRO, A DX ESPLOSO DEL MECCANISMO DI TRASMISSIONE (ROCK THE BIKE, 2024) .....  | 31 |
| FIGURA 26 A SX IL PRODOTTO FENDER BLENDER UNIVERSALE MONTATO SU UNA BICICLETTA, A DX ESPLOSO DEL MECCANISMO DI<br>TRASMISSIONE E DEL FRULLATORE (ROCK THE BIKE, 2024) .....            | 32 |
| FIGURA 27 MODELLO CAD DEL DISPOSITIVO DI MAYAPEDAL (2010) .....  | 33 |
| FIGURA 28 A SX PROTOTIPO CON FRULLATORE A CONTATTO A CONTATTO CON LA RUOTA POSTERIORE, A DX PARTICOLARE DEL<br>MECCANISMO A FRIZIONE (BIJLI BICYCLE, 2016) .....                       | 34 |
| FIGURA 29 SCHEMATIZZAZIONE SISTEMA DI CONVERSIONE DI ENERGIA MECCANICA IN ENERGIA ELETTRICA.....   | 35 |
| FIGURA 30 RELAZIONE TRA VELOCITÀ DELLA PULEGGIA (RPM) E VOLTAGGIO PRODOTTO DAL GENERATORE (ANYANWU, 2016) .....  | 35 |
| FIGURA 31 CONVERTITORE DI ENERGIA ELETTRICA PEDAL-A-WATT.....  | 36 |
| FIGURA 32 VARIAZIONE DI EFFICIENZA DI UN GENERATORE ELETTRICO A PEDALI VARIANDO IL CARICO COLLEGATO TRA 0 E 1000 W<br>(OKOYE, 2021) .....  | 37 |
| FIGURA 33 CONFRONTO DEI COSTI TRA CITY CAR E BICICLETTA CARGO (BÖCKMANN, DUWE-SCHRINNER, KURZHÖFER, CC BY 4.0)<br>.....  | 38 |
| FIGURA 34 TRICICLO CARGO IN CONFIGURAZIONE "TADPOLE" UTILIZZATO PER ATTIVITÀ COMMERCIALE .....   | 39 |
| FIGURA 35 BICICLETTA CARGO UTILIZZATA PER IL TRASPORTO MERCI .....   | 40 |
| FIGURA 36 TRICICLO CARGO IN CONFIGURAZIONE "DELTA" UTILIZZATO PER LAST-MILE DELIVERY .....   | 40 |
| FIGURA 37 QUADRICICLO CARGO ADIBITO AL LAST-MILE DELIVERY CON PARABREZZA PER IL CONDUCENTE .....   | 41 |
| FIGURA 38 CLASSIFICAZIONE DEI MEZZI A PEDALI CARGO IN BASE ALLA DISPOSIZIONE DEL BOX (BÖCKMANN, DUWE-SCHRINNER,<br>KURZHÖFER, CC BY 4.0) .....   | 42 |
| FIGURA 39 A SINISTRA TRAILER CARGO AD UNA RUOTA, A DESTRA TRAILER CARGO A DUE RUOTE .....  | 43 |
| FIGURA 40 ATTACCO AL MOZZO POSTERIORE CON MOLLA ALL'ESTREMITÀ .....  | 43 |
| FIGURA 41 LA COOP-BIKE (EICKMANS, 2022) .....  | 45 |
| FIGURA 42 LOCALIZZAZIONE CITTÀ DI JINJA E KISUMU .....   | 46 |
| FIGURA 43 BICICLETTA CARGO REALIZZATA DA CARGOBIKE FOR AFRICA (2024) .....   | 46 |
| FIGURA 44 TRAILER AMBULANZA REALIZZATO DA BAIKELI (CREDIT: ALESSANDRO TROVATI).....  | 47 |
| FIGURA 45 TRAILER AMBULANZA DURANTE LA FASE DI UTILIZZO (CREDIT: ALESSANDRO TROVATI) .....   | 48 |
| FIGURA 46 TRAILER SCUOLABUS DURANTE LA FASE DI UTILIZZO (CREDIT: ALESSANDRO TROVATI) .....   | 48 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 47 TRICICLO CARGO ZELO (GREENFOOT AFRICA, 2024).....  | 49  |
| FIGURA 48 PRIMO PROTOTIPO REALIZZATO DA TAKATAKA, CLASSIFICATO COME LONG JOHN (BAISKELI UGANDA, 2024) .....  | 53  |
| FIGURA 49 DETTAGLIO DELLA POSIZIONE DEI CUSCINETTI SUL TUBO DI STERZO (BAISKELI UGANDA, 2024) .....  | 53  |
| FIGURA 50 DETTAGLIO DEL LEVERAGGIO COLLEGATO AL TUBO DI STERZO E DEL TELAIO DEL BOX CARGO (BAISKELI UGANDA, 2024) .....                              | 54  |
| FIGURA 51 SECONDO PROTOTIPO REALIZZATO DA TAKATAKA, DI TIPO REAR LOADER (BAISKELI UGANDA, 2024).....   | 55  |
| FIGURA 52 SCHEMA DEL SISTEMA DI TRASMISSIONE ADOTTATO PER IL TRICICLO CARGO .....  | 55  |
| FIGURA 53 A SINISTRA DETTAGLIO DELLA RUOTA LIBERA, A DESTRA DETTAGLIO DELLA RUOTA COLLEGATA ALL'ALBERO (BAISKELI UGANDA, 2024).....                  | 56  |
| FIGURA 54 SPECIFICHE TECNICHE DEI PROFILATI QUADRI DISPONIBILI PRESSO TAKATAKA .....   | 61  |
| FIGURA 55 CURVA S-N DI UN COMPONENTE IN GOMMA (AL-RAHEEM, 2021).....   | 63  |
| FIGURA 56 CURVA S-N DEL COPERTONE DI CAMION ESAURITO .....   | 64  |
| FIGURA 57 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DEL CARRELLO CARGO .....   | 65  |
| FIGURA 58 VISTA IN DETTAGLIO DEI COMPONENTI DEL CARRELLO.....  | 66  |
| FIGURA 59 MODELLO CAD DELLA RUOTA DA 26" UTILIZZATA NEL TRAILER .....  | 67  |
| FIGURA 60 DIMENSIONAMENTO DELLA BASE DEL TRAILER .....   | 68  |
| FIGURA 61 SOLUZIONE ADOTTATA PER ABBASSARE L'ALTEZZA DA TERRA DEL BARICENTRO .....   | 69  |
| FIGURA 62 RINGHIERA TELESCOPICA NELLA POSIZIONE DI MASSIMA ALTEZZA .....   | 69  |
| FIGURA 63 DIMENSIONI DELLA STAFFA DI FISSAGGIO ALLA RUOTA .....  | 70  |
| FIGURA 64 DIMENSIONI DEL BRACCIO DI TRAINO .....   | 70  |
| FIGURA 65 MODELLO CAD DEL SUPPORTO PER IL FRULLATORE .....   | 71  |
| FIGURA 66 STRUTTURA DEL TRAILER CARGO: PRIMA ITERAZIONE .....  | 71  |
| FIGURA 67 MODELLO CAD DELLA RUOTA SEMPLIFICATO PER ANALISI FEM .....   | 72  |
| FIGURA 68 DISTRIBUZIONE DELLE SOLLECITAZIONI DI VON MISES SUL TRAILER: CONCEPT INIZIALE .....  | 74  |
| FIGURA 69 DISTRIBUZIONE DEGLI SPOSTAMENTI DELLA STRUTTURA: CONCEPT INIZIALE .....  | 74  |
| FIGURA 70 TRAILER CARGO: PRIMA REVISIONE .....   | 75  |
| FIGURA 71 AGGIUNTA DI ANGOLARI E STAFFE PER SUPPORTARE IL PIANALE .....  | 76  |
| FIGURA 72 TRAILER CARGO: SECONDA REVISIONE .....   | 76  |
| FIGURA 73 PARTICOLARE DEL PIANO DI SUPPORTO DEL FRULLATORE TOTALMENTE ESTESO .....   | 77  |
| FIGURA 74 TRAILER CARGO: TERZA REVISIONE .....   | 77  |
| FIGURA 75 CONFRONTO TRA LA SUPERFICIE DI SALDATURA DEL BRACCIO NEL PRIMO CONCEPT (IN ALTO) E NELL'ULTIMA REVISIONE (IN BASSO) .....                  | 78  |
| FIGURA 76 DIMENSIONI DEL BRACCIO DI TRAINO AGGIORNATE .....  | 78  |
| FIGURA 77 DISTRIBUZIONE DEGLI SPOSTAMENTI DELLA STRUTTURA: PARTENZA IN SALITA.....   | 80  |
| FIGURA 78 DISTRIBUZIONE DELLE SOLLECITAZIONI DI VON MISES SULLA STRUTTURA: PARTENZA IN SALITA.....   | 80  |
| FIGURA 79 ACCELERAZIONE VERTICALE DI UNA RUOTA CHE IMPATTA UNA BUCA (LI, 2015).....  | 81  |
| FIGURA 80 LIVELLI DI DISCOMFORT DEL GUIDATORE IN RELAZIONE ALL'ACCELERAZIONE VERTICALE SUBITA (KENNEDY, 2004) .....                                  | 82  |
| FIGURA 81 CONFIGURAZIONE DEI CARICHI E VINCOLI PER SIMULAZIONE DI IMPATTO CON BUCA .....   | 82  |
| FIGURA 82 DISTRIBUZIONE DELLE SOLLECITAZIONI DI VON MISES: SIMULAZIONE IMPATTO CON BUCA .....  | 83  |
| FIGURA 83 DISTRIBUZIONE DEGLI SPOSTAMENTI VERTICALI DELLA STRUTTURA: SIMULAZIONE IMPATTO CON BUCA .....  | 84  |
| FIGURA 84 VALORI DI SPOSTAMENTO PSD PER OGNI TIPOLOGIA DI STRADA (ISO 8608:2016).....  | 85  |
| FIGURA 85 APPLICAZIONE DEI VINCOLI: RANDOM VIBRATION ANALYSIS .....  | 87  |
| FIGURA 86 CURVA FREQUENZA-SPOSTAMENTI PSD IN SOLIDWORKS .....  | 88  |
| FIGURA 87 CONCENTRAZIONE DI TENSIONI PARASSITE NEI FORI DI FISSAGGIO .....   | 89  |
| FIGURA 88 DISTRIBUZIONE DELLE SOLLECITAZIONI DI VON-MISES RMS: ANALISI DINAMICA .....  | 90  |
| FIGURA 89 GRAFICO DI RISPOSTA FREQUENZA-TENSIONE PSD PER I NODI PIÙ CRITICI: IN ALTO IL NODO PIÙ SOLLECITATO, IN BASSO IL NODO SULLA RINGHIERA ..... | 91  |
| FIGURA 90 DISTRIBUZIONE DEGLI SPOSTAMENTI DELLA STRUTTURA: ANALISI DINAMICA.....   | 92  |
| FIGURA 91 CONFIGURAZIONE DI CARICHI E VINCOLI PER ANALISI DI VITA A FATICA .....   | 94  |
| FIGURA 92 DISTRIBUZIONE DELLE TENSIONI SUL COPERTONE: ANALISI STATICA .....  | 94  |
| FIGURA 93 RISULTATI DELL'ANALISI A FATICA SUL COPERTONE .....  | 95  |
| FIGURA 94 PARTICOLARE DELL'ALBERO DI TRASMISSIONE: SOLUZIONE 1 .....   | 97  |
| FIGURA 95 SISTEMA DI TENSIONAMENTO DELL'ALBERO DI TRASMISSIONE: SOLUZIONE 1 .....  | 98  |
| FIGURA 96 SISTEMA DI REGOLAZIONE DELL'ALTEZZA DEL FRULLATORE: SOLUZIONE 2 .....  | 99  |
| FIGURA 97 ESEMPIO DI FRULLATORE UTILIZZATO NELLA SOLUZIONE 2 .....   | 100 |
| FIGURA 98 SISTEMA DI SGANCIO DELL'ALBERO DI TRASMISSIONE: IN ALTO COPIGLIA DI FISSAGGIO SUPERIORE, IN BASSO COPIGLIA INFERIORE .....                 | 100 |
| FIGURA 99 SISTEMA DI TENSIONAMENTO: SOLUZIONE 2 .....  | 101 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 100 SISTEMA DI TRASMISSIONE COMPLETO: SOLUZIONE 2 (A SX PROTOTIPO REALIZZATO, A DX MODELLO 3D COMPLETO DI FRULLATORE) ..... | 102 |
| FIGURA 101 TACHIMETRO IN FASE DI ACQUISIZIONE .....  | 103 |
| FIGURA 102 SEZIONE DEL SISTEMA DI FISSAGGIO INSERTI-VITI AD OCCHIELLO .....  | 105 |
| FIGURA 103 PATTERN DI PRE-FORI REALIZZATI SUL PIANO DI CARICO .....  | 105 |
| FIGURA 104 SERRAGGIO DELLE PLACCHETTE DI RINFORZO .....  | 106 |
| FIGURA 105 FISSAGGIO DEL COPERTONE ALLA STAFFA DELLA RUOTA .....   | 106 |
| FIGURA 106 FISSAGGIO DEL COPERTONE AL BRACCIO DI TRAINO .....  | 107 |
| FIGURA 107 CONCEPT FINALE DEL CARRELLO: CONFIGURAZIONE DI UTILIZZO DEL FRULLATORE .....  | 108 |
| FIGURA 108 CONCEPT FINALE DEL CARRELLO: CONFIGURAZIONE DI MOVIMENTO DEL SISTEMA .....  | 108 |
| FIGURA 109 CONTRIBUTO DI EMISSIONI IN PERCENTUALE DELLE VARIE FASI DI VITA DEL TRAILER .....                                       | 115 |

## Indice delle tabelle

|  |     |
|--|-----|
| TABELLA 1 CONFRONTO DATI ECONOMICI E SOCIALI TRA ITALIA E UGANDA (WHO, 2023) (WORLDBANK, 2020A) .....    | 11  |
| TABELLA 2 VANTAGGI E SVANTAGGI DI TRAILER CARGO A UNA E DUE RUOTE .....                                  | 42  |
| TABELLA 3 SCHEMA RIASSUNTIVO DEGLI SCOPI D'UTILIZZO DEL MEZZO .....                                      | 52  |
| TABELLA 4 VANTAGGI E LIMITI DEI DUE PROTOTIPI REALIZZATI DA TAKATAKA .....                               | 56  |
| TABELLA 5 VALORE DEI VINCOLI OPERATIVI IN BASE ALLA DESTINAZIONE D'USO .....                             | 58  |
| TABELLA 6 PROPRIETÀ DELL'ACCIAIO "GRADE 210" .....   | 62  |
| TABELLA 7 PROPRIETÀ DELL'ALLUMINIO 6061-T4 E DELL'ACCIAIO AISI 304 .....                                 | 62  |
| TABELLA 8 PROPRIETÀ MECCANICHE DEI COPERTONI DI AUTO USATI .....   | 63  |
| TABELLA 9 VALORI DELLE TENSIONI NELLA CURVA S-N PER IL COPERTONE ESAURITO DI CAMION .....                | 64  |
| TABELLA 10 MASSA DEL TRAILER DOPO LE REVISIONI E RIDUZIONE PERCENTUALE .....                             | 79  |
| TABELLA 11 VALORI FREQUENZA-SPOSTAMENTO PSD PER LA TIPOLOGIA DI STRADA SELEZIONATA (ISO 8608:2016) ..... | 86  |
| TABELLA 12 FREQUENZE DI RISONANZA DEL TRAILER .....  | 88  |
| TABELLA 13 MISURAZIONI DI VELOCITÀ DELL'ASSE DEL FRULLATORE .....  | 103 |
| TABELLA 14 DISTINTA BASE DEL TRAILER .....   | 110 |
| TABELLA 15 EMISSIONI DI CO <sub>2</sub> E DEI PROCESSI NEL CICLO DI VITA DEL TRAILER .....               | 114 |
| TABELLA 16 STIMA DEI COSTI DI REALIZZAZIONE DEL TRAILER IN ITALIA ED IN UGANDA .....                     | 116 |

## Glossario degli Acronimi

| <b>Acronimo</b> | <b>Definizione</b>                             |
|-----------------|--|
| AC              | Alternating Current                            |
| CAD             | Computer-aided Design                          |
| CEO             | Chief Executive Officer                        |
| CO <sub>2</sub> | Anidride Carbonica                             |
| CS              | Coefficiente di Sicurezza                      |
| DC              | Direct Current                                 |
| ELCD            | European reference Life Cycle Database         |
| EN              | European Normalization                         |
| FEM             | Finite Element Method                          |
| GWP             | Global Warming Potential                       |
| IEA             | International Energy Agency                    |
| ISO             | International Organization for Standardization |
| LCA             | Life Cycle Assessment                          |
| LRA             | Lord's Resistance Army                         |
| MPI             | Multidimensional Poverty Index                 |
| NASA            | National Aeronautics and Space Administration  |
| ONG             | Organizzazione Non Governativa                 |
| ONU             | Organizzazione delle Nazioni Unite             |
| PET             | Polietilene Tereftalato                        |
| PSD             | Power Spectral Density                         |
| RMS             | Root Mean Square                               |
| RPM             | Revolutions Per Minute                         |
| SDG             | Sustainable Development Goals                  |
| SMAW            | Shielded Metal Arc Welding                     |
| UNDP            | United Nations Development Programme           |
| UNRA            | Uganda National Roads Authority                |
| WHO             | World Health Organization                      |



# Introduzione

Oggi giorno il tema della sostenibilità e dello spreco alimentare stanno acquisendo sempre più importanza a livello ingegneristico e a livello umano, in accordo anche con i *Sustainable Development Goals* (SDG): questi sono costituiti da 17 obiettivi (figura 1), articolati in ulteriori 169 traguardi da raggiungere entro il 2030 per contribuire allo sviluppo globale, con lo scopo di fronteggiare il cambiamento climatico e ridurre qualunque forma di povertà e disuguaglianza, garantendo allo stesso tempo la sostenibilità economica, ambientale e sociale della popolazione globale (United Nations, 2024).



Figura 1 Obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG) stilati dall'ONU (United Nations, 2024)

Si può strettamente collegare a queste tematiche anche l'oggetto di questa tesi: la progettazione e la realizzazione di una bicicletta cargo che, grazie all'energia muscolare, vada ad azionare meccanicamente un frullatore collegato ad essa; lo scopo e l'interesse di questo progetto riguarda la comunità di Gulu, città a nord dell'Uganda e seconda città più popolosa del Paese la quale è afflitta dalla presenza di una grandissima quantità di rifiuti in plastica senza la possibilità di un corretto riciclaggio e di conseguenza, la plastica viene sepolta in discariche non a norma, bruciata o disseminata per strada, dove ostruisce i canali di scolo, inquina le fonti d'acqua e forma acque stagnanti che rappresentano una minaccia per la salute pubblica.

Il Gulu Integrated Catchment Management Partnership mira a ridurre la quantità di rifiuti solidi immessi nell'ambiente e a garantire la qualità e la quantità della principale fonte idrica della città. Takataka Plastics, il principale partner del settore privato e partner di questa tesi, ricicla i rifiuti, sia organici che plastici, realizzando tramite tecnologie di stampaggio a iniezione e compressione prodotti di alta qualità e a prezzi accessibili. L'azienda contribuisce a ridurre la quantità di rifiuti nelle strade di Gulu, creando allo stesso tempo posti di lavoro e salvaguardando e stimolando gli investimenti (NatuReS, 2021).

Il progetto in questione rientra quindi nell'ambito dell'incentivazione della microimprenditorialità locale e della mobilità sostenibile, sfruttando la bicicletta per vendere i frullati realizzati con la frutta in eccesso nei mercati locali e per trasportare merci pesanti, ma anche per agevolare la raccolta dei rifiuti in plastica tramite il sistema cargo. Questi rifiuti sono utilizzati, in un'ottica di economia circolare, per la produzione di articoli in PET negli stabilimenti di Takataka plastics e poi rivenduti in un'ottica di autofinanziamento. Inoltre, il progetto ha come obiettivo anche quello di facilitare il trasporto di beni di prima necessità,

come cibo e acqua, dalla città alle comunità rurali, colmando in parte l'assenza di infrastrutture e cercando di soddisfare i bisogni fondamentali di queste comunità.

A seguito di questa panoramica, trattandosi di un contesto di povertà in cui le risorse e le tecnologie utilizzate nei sistemi produttivi tradizionali non sono disponibili o al più limitate, si evince quindi che la sfida principale nella progettazione e realizzazione di questo mezzo sia l'utilizzo di tecnologie appropriate: queste sono definite come "qualsiasi oggetto, processo, idea o pratica che soddisfa i bisogni umani pur essendo compatibile con le condizioni culturali ed economiche locali, utilizzando risorse disponibili localmente e controllate dalla popolazione locale" (ScienceDirect, 2024).



# 1 Contesto socioeconomico in Uganda

L'Uganda è uno Stato situato dell'Africa Orientale, con capitale la città di Kampala ed una popolazione di circa 47 milioni di abitanti. L'Uganda confina con la Tanzania e il Ruanda a sud, con la Repubblica Democratica del Congo a ovest, con il Sud Sudan a nord e con il Kenya a est (figura 2). L'Uganda è un Paese senza sbocco sul mare e occupa la maggior parte dell'area del Lago Vittoria, lago da cui comincia il suo flusso il fiume Nilo.

L'Uganda, ex colonia britannica, è diventata indipendente nel 1962, anno in cui è entrata nel Commonwealth, adottando l'inglese come lingua ufficiale (Autori di Wikipedia, 2024).

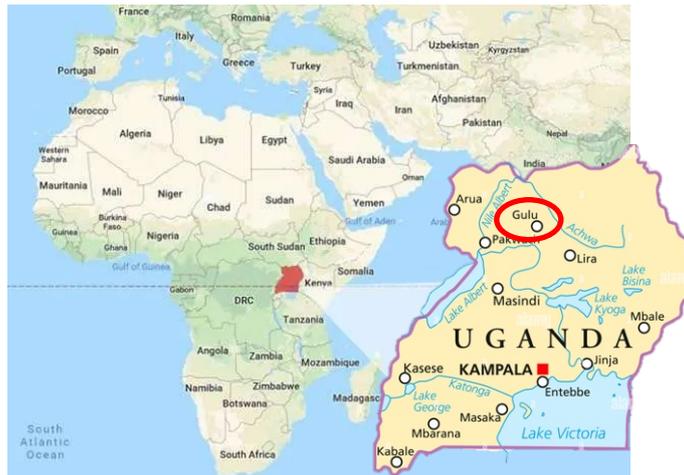


Figura 2 Locazione Uganda e geografia interna

Il Paese ha attraversato negli ultimi anni una guerra civile devastante, con il conflitto concentrato prevalentemente nel nord del Paese, tra il governo centrale e il *Lord's Resistance Army* (LRA) guidato dal ribelle Joseph Kony. Durante questo periodo, numerose persone sono state costrette a sfollare in campi per rifugiati che, pur concepiti come luoghi di protezione, si sono rapidamente trasformati in luoghi di coercizione e privazione dei diritti sia da parte del governo che dal LRA, provocando traumi e povertà alle popolazioni (Branch, 2009).

Successivamente, la ricostruzione dell'Uganda è stata guidata da politiche neoliberali, che hanno cercato di rilanciare l'economia e ridurre la povertà. Tuttavia, queste politiche hanno avuto esiti ambivalenti: da un lato hanno contribuito a una certa stabilità macroeconomica, dall'altro hanno esasperato le disuguaglianze sociali e favorito gli interessi stranieri a discapito delle comunità locali (Goodfellow, 2022). Questa dinamica ha trasformato l'Uganda in un'economia autoritaria, con un controllo delle risorse sempre più dominato da Paesi stranieri, lasciando la popolazione locale in condizioni di marginalità e precarietà: per meglio chiarire questo aspetto si riporta in Tabella 1 un confronto tra i dati socioeconomici italiani e ugandesi.

|  | <b>Italia</b>           | <b>Uganda</b>           |
|--|-------------------------|-------------------------|
| <b>PIL pro capite</b>                        | 34.776 \$               | 964,40 \$               |
| <b>Grandezza geografica</b>                  | 302,074 km <sup>2</sup> | 241,038 km <sup>2</sup> |
| <b>Popolazione</b>                           | 58,94 milioni           | 47,25 milioni           |
| <b>Aspettativa di vita</b>                   | 82,7 anni               | 62,7 anni               |
| <b>Popolazione &lt; 15 anni</b>              | 12,5%                   | 45%                     |
| <b>Operai agricoli</b>                       | 1,7%                    | 82%                     |
| <b>Costo del lavoro orario (carpenteria)</b> | 29,4 €                  | 0,82 €                  |

Tabella 1 Confronto dati economici e sociali tra Italia e Uganda (WHO, 2023) (WorldBank, 2020a)

## 1.1 Guerra civile e origini della situazione socioeconomica attuale

Per comprendere meglio il contesto attuale in cui si trova la popolazione ugandese e come questo ha avuto origine bisogna necessariamente fare cenno alla complessa situazione politica in Uganda durante gli anni '80 e '90 ed alle guerre civili che questa ha scaturito: per fare ciò viene riportato di seguito un riassunto tratto dal report di Human Rights Watch (2005).

Il conflitto tra il *Lord Resistance Army* (LRA) ebbe inizio poco dopo che il *National Resistance Army* (NRA), guidato dall'attuale presidente Yoweri Museveni, prese il potere nel 1986. I soldati sconfitti del governo deposedo fuggirono verso i loro luoghi di origine nel nord dell'Uganda e in molti casi continuarono a combattere il nuovo governo. La relazione tra il governo di Museveni e le comunità del nord si inasprì ulteriormente a causa della strategia anti-insurrezione portata avanti da Museveni per contrastare i ribelli, attraverso lo sfollamento forzato del 90% della popolazione del nord in campi protetti: in questi campi le gravi restrizioni alla libertà di movimento, gli abusi continui da parte delle forze militari governative e la detenzione, senza processo, di civili sospettati di collaborare con i ribelli dell'LRA furono i principali motivi che portarono ad un sentimento antagonista verso il governo centrale.

Alla fine degli anni '80, l'LRA aveva un certo sostegno popolare, ma il suo sostegno diminuì nei primi anni '90 ed, in risposta alla formazione da parte del governo di milizie locali e di questi campi per sfollati (nati per proteggere i civili e parte di una strategia del governo mirata a rimuovere la popolazione dalle aree rurali in cui operavano i ribelli), condusse una campagna di sequestri, omicidi e mutilazioni di civili, considerando tutti coloro che vivevano nei campi alleati o sostenitori del governo. Nonostante la presunta sicurezza fornita da questi campi profughi, l'LRA ha quindi regolarmente condotto devastanti attacchi su di essi.

La risoluzione militare del conflitto nel nord dell'Uganda è stata lunga e faticosa e le sue principali vittime rimangono le popolazioni del nord dell'Uganda. A metà del 2005, più di 1,9 milioni di persone sono state sfollate internamente nel nord dell'Uganda, UNICEF inoltre stima che più di 20.000 bambini siano stati rapiti nel corso del conflitto dal 1986 per servire come bambini-soldato e schiavi sessuali. Anche se la maggior parte dei rapiti, sia bambini che adulti, è fuggita, molti sono rimasti per anni con l'LRA, rimanendo psicologicamente e spesso fisicamente segnati dal trattamento subito e costretti a infliggere.

È importante però sottolineare che le violenze non sono state perpetrate esclusivamente dai ribelli dell'LRA, ma anche dai soldati governativi, i quali hanno commesso gravi abusi contro la popolazione civile come il furto di terre e bestiame, che ha ulteriormente impoverito le comunità locali; Inoltre, nonostante il termine della guerra civile, la violenza da parte delle milizie governative continua a manifestarsi in forme diverse, come il taglio impunito di alberi o la sottrazione del carbone, atti che rappresentano una continuazione delle violazioni dei diritti delle comunità locali.

Gulu, città a nord dell'Uganda e luogo del caso studio di questa tesi, ha avuto la sua massiccia espansione proprio a seguito della formazione dei campi profughi da parte del governo centrale e la sua comunità ha fortemente risentito di questo conflitto e delle violenze subite sia da parte dell'LRA che dai soldati governativi fino agli inizi degli anni 2000.

## 1.2 Sviluppo sociale, economico e umanitario

La situazione sociale e umanitaria in Uganda, reduce dai sanguinosi conflitti descritti nel paragrafo 1.1, è in uno stato di profonda incertezza e, a causa delle politiche economiche intraprese dal governo centrale ugandese, sta vivendo un periodo di forte trasformazione, che finora ha portato ad un arricchimento di una parte della popolazione e la riduzione in povertà della maggior parte restante, favorendo inoltre gli interessi stranieri a discapito delle comunità locali.

Secondo quanto riportato dalla World Bank (2020b) la Nazione sta vivendo un importante incremento demografico che si protrarrà nei prossimi decenni: nello scenario più probabile, la popolazione dell'Uganda, attualmente stimata in 47 milioni di persone, raddoppierà almeno tra il 2020 e il 2060, raggiungendo i 104 milioni di persone. Questa crescita della popolazione sarà accompagnata anche da una significativa migrazione dalle aree rurali a quelle urbane: la motivazione principale della migrazione verso i contesti urbani è quella di guadagnare denaro per contribuire al mantenimento della famiglia; una ricerca commissionata dall'Organizzazione Internazionale per le Migrazioni (OIM) in Uganda mostra inoltre che già ora migliaia di persone sono costrette a spostarsi a causa dei cambiamenti climatici e del degrado ambientale (UNDP, 2022).

Nel 2020 si stima che circa 34 milioni di persone vivevano nelle aree rurali del Paese, mentre i centri urbani ospitavano circa 11 milioni di persone, quasi il 25% della popolazione (figura 3). Secondo le proiezioni, tuttavia, entro il 2060 la popolazione urbana dell'Uganda supererà quella rurale, con stime di 53 milioni di persone che vivranno nei centri urbani e 51 nelle aree rurali. In particolare, gran parte della crescita della popolazione urbana deriverà dalla migrazione dalle zone rurali a quelle urbane, dato che l'attuale tasso di fertilità nelle aree rurali è molto più alto di quello delle aree urbane - una media di 5,9 nascite per donna nelle aree rurali rispetto alle 4,0 nascite per donna nelle aree urbane.

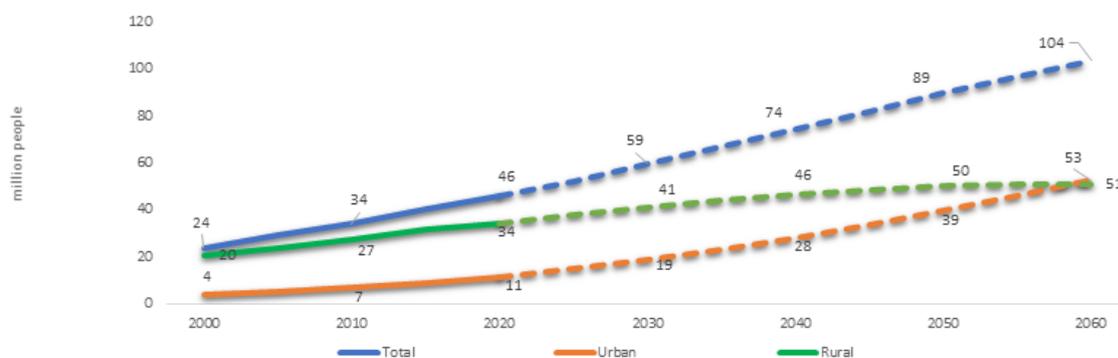


Figura 3 Trend di popolamento delle zone rurali ed urbane negli anni (World Bank, 2020b)

### 1.2.1 Livello di povertà

Secondo quanto analizzato dalla UNDP (2022) negli ultimi 30 anni, il tasso di povertà in Uganda basato sulla soglia di povertà nazionale è sceso dal 56% nel 1993 al 20,3% nel 2019, grazie principalmente al miglioramento dei redditi agricoli delle famiglie povere.

Nonostante ciò, però, l'Uganda rimane uno degli Stati più poveri al mondo e il tasso di povertà negli ultimi 5 anni ha visto un incremento, principalmente dovuto alla pandemia di COVID-19. Inoltre, il dato riportato sopra tiene in considerazione solamente la soglia di povertà nazionale, mentre considerando l'indice *Multidimensional Poverty Index* (MPI), di cui il governo ugandese ha rilasciato un report, si può notare come la percentuale sia più che doppia in quanto, tramite questo indice, non si va a considerare solamente l'aspetto economico ma anche quelli di salute, standard di vita ed educazione: nell'anno fiscale

2019/2020 il MPI si attestava al 42,1%, evidenziando disparità di genere tra uomini e donne ma anche disparità regionali con le regioni più a nord aventi un indice più elevato (63%) rispetto a quelle più vicine alla capitale, così come per le persone residenti in zone rurali rispetto alle zone urbane.

Infine, analizzando il tasso di povertà basato sulla soglia di povertà internazionale, fissata a seguito dell'aumento dell'inflazione a 2,15 \$ per persona per giorno, questo si attesta per l'anno 2023 al 42,1%, in linea con l'MPI, ma la World Bank prospetta una diminuzione per l'anno 2024 (figura 4).

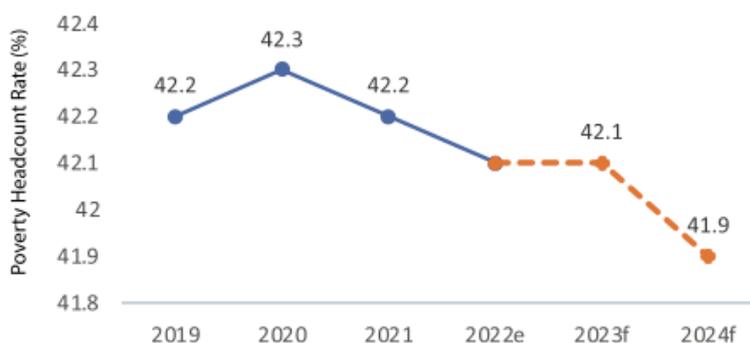


Figura 4: Tasso di povertà basato sulla soglia di povertà internazionale (UNDP, 2022)

### 1.2.2 Sicurezza alimentare, acqua potabile e servizi igienico-sanitari

Secondo la *United Nations Food and Agriculture Organization* (FAO) il terreno agricolo fertile ugandese ha il potenziale per sfamare 200 milioni di persone, ma, nonostante ciò, la sicurezza alimentare della popolazione rimane un obiettivo ostico per l'Uganda: infatti, dell'80% del territorio coltivabile dello Stato, solamente il 35% viene effettivamente utilizzato per produrre cibo. Nel 2022, il quotidiano *Daily Monitor* ha dichiarato che tra le famiglie di *karimojong*, popolazione dedita all'agricoltura nella regione a nord-est dell'Uganda, 8 su 10 non avevano cibo o al più limitato, ed il governo ha dichiarato che nello stesso anno malattie legate alla fame hanno ucciso più di 900 residenti (UNDP, 2022).

Inoltre, si aggiunge a questo contesto già critico l'aumento dei prezzi, dovuto ai conflitti geopolitici, delle materie prime come grano e mais che riducono ulteriormente il potere di acquisto delle famiglie ugandesi.

Per quanto riguarda l'accesso a fonti di acqua potabile e servizi igienico-sanitari, il governo ugandese ha avviato numerosi programmi di sviluppo e miglioramento delle infrastrutture: nel 2020 la popolazione con accesso a fonti di acqua potabile è stata stimata intorno all'83%, valore superiore rispetto a tutti i paesi confinanti e alla media dell'Africa Subsahariana, mentre la percentuale di popolazione con accesso a servizi igienico-sanitari si attestava al 37%, in questo caso in deficit rispetto agli altri Paesi vicini e alla media Africana (UNDP, 2022).

### 1.2.3 Elettricità

L'accesso limitato a fonti di energia rappresenta un forte limite allo sviluppo economico e sociale dell'Uganda. Nonostante gli sforzi promossi e la crescita costante di infrastrutture, secondo la *IEA* (2023), la percentuale di persone con accesso all'energia elettrica nel 2022 si attestava al 31% a livello nazionale, con forti disparità tra le aree urbane, dove il tasso di elettrificazione è del 77%, e le aree rurali, dove scende drasticamente al 17% (figura 5). Questo rappresenta uno dei tassi di elettrificazione più bassi al mondo, con circa 33 milioni di persone ancora prive di accesso all'elettricità, di cui 30 milioni nelle aree rurali.

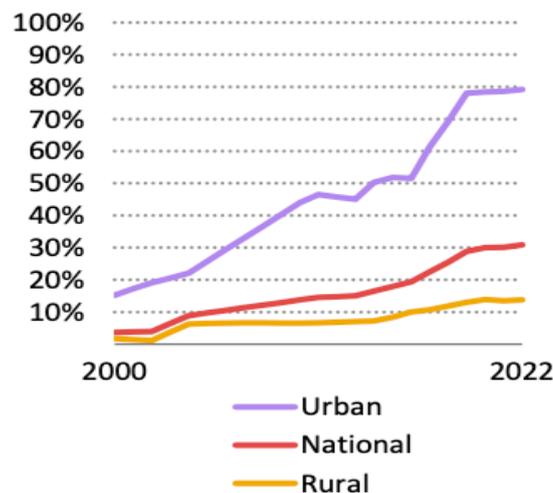


Figura 5 Percentuale di accesso all'elettricità in Uganda (*IEA*, 2023)

Come mostrato in figura 6, l'energia idroelettrica rappresenta il 90% della generazione di elettricità in Uganda, seguita dall'energia fornita dalle centrali termiche alimentate a biomasse (7%), dall'energia solare (2%) e dall'olio combustibile (1%). Nel 2021, la capacità installata del paese era di 1,35 GW, con una domanda di picco domestica di 785 MW.

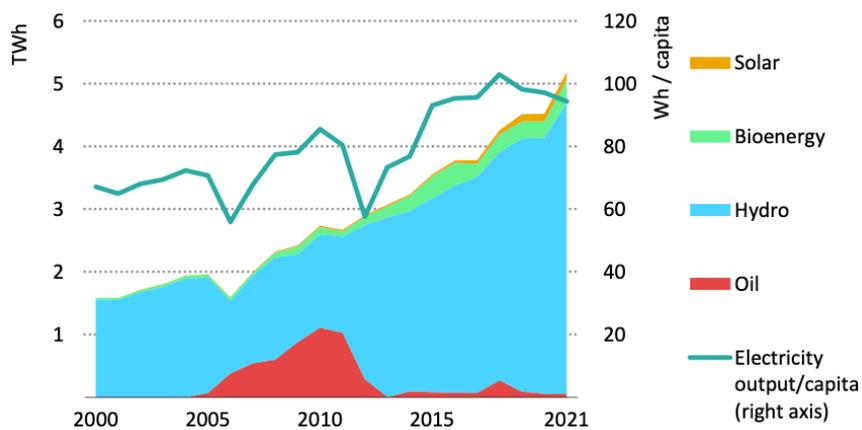


Figura 6 Generazione di elettricità in Uganda (*IEA*, 2023)

Nonostante la capacità superiore alla domanda, la percentuale di accesso all'elettricità così bassa è dovuta in gran parte agli elevati costi di installazione di impianti domestici, connessione alla rete ed al costo dell'energia, circa tre volte superiore rispetto a Europa e Stati Uniti: difatti, anche chi ha accesso alla rete elettrica, alle volte è costretto ad utilizzare generatori a gasolio per sopperire a momentanee mancanze dovute agli elevati costi dell'elettricità. Tutto ciò influisce negativamente sulla produttività agricola ed economica, negando alla popolazione possibilità di sviluppo e di miglioramento delle condizioni di vita ed affliggendo anche settori di primaria importanza come l'istruzione e la sanità.

### 1.3 Infrastrutture e mezzi di trasporto

Per individuare le necessità nella progettazione e realizzazione della bicicletta oggetto di questa tesi, nonché il suo scopo, è necessario comprendere lo stato attuale delle infrastrutture per il trasporto nelle zone urbane e rurali e la percentuale e la percezione sull'utilizzo dei sistemi a pedali nel territorio ugandese nonché i principali modelli utilizzati. A causa della parziale mancanza di informazioni recenti e aggiornate, quelle riportate in questo paragrafo sono state tratte dal report redatto dal Ministero del Lavoro e dei Trasporti ugandese (Ministry of Work and Transport, 2013): pertanto, è ragionevole supporre un'evoluzione di quanto riportato.

Secondo l'Autorità Nazionale delle Strade dell'Uganda (UNRA), l'infrastruttura per il trasporto su strada in Uganda comprende circa 64.500 km di strade, di cui circa 20.000 km di rete stradale nazionale (figura 7), 12.300 km di strade distrettuali, 2800 km di strade urbane e 30.000 km di strade di accesso comunitario. Tutte queste strade sono utilizzate da pedoni e ciclisti. Alcune strade nazionali recentemente costruite o potenziate hanno carreggiate designate per l'uso da parte di pedoni e biciclette (e per emergenze veicolari).



Figura 7 Rete delle strade nazionali in Uganda (in rosso)

Tuttavia, la grande maggioranza delle strade dell'Uganda non ha infrastrutture specificamente progettate per l'uso da parte di pedoni o ciclisti: questi devono condividere le corsie con il traffico motorizzato. Oltre alla rete stradale, ci sono i numerosi sentieri rurali che collegano le persone delle zone rurali alla rete stradale e anche alle loro fonti d'acqua, campi, foreste e strutture locali, molti di questi sentieri hanno solamente delle semplici passerelle.

Per quanto riguarda le strade nazionali, un aggiornamento del Ministero dei Trasporti del 2022 (Ministry of Work and Transport, 2022), chiariva come solo il 26,6% di queste strade fossero asfaltate, individuando quindi che quasi il 75% si trovava in uno stato non asfaltato

e chiarendo inoltre che la maggior parte di queste si trovava in uno stato di manutenzione scadente.

Sulle vecchie strade asfaltate, le spalle spesso sono estremamente irregolari e gravemente erose. Il deflusso di sedimenti dalle strade laterali ostruisce frequentemente il bordo della carreggiata, inoltre risulta difficile camminare su tali superfici e il passaggio di biciclette è quasi impossibile, quindi, ciclisti e pedoni usano la carreggiata muovendosi tra i mezzi. Dove la strada è trafficata, i pedoni sviluppano spesso percorsi informali ai lati delle strade per evitare il traffico mentre, a causa delle superfici irregolari e dei canali di drenaggio, questi sono raramente adatti ai ciclisti.

Per quanto riguarda invece le strade non asfaltate queste presentano spesso aree percorribili in entrambi i sensi di marcia relativamente piccole e spalle con pendenze lunghe e ripide (figura 8): quando c'è traffico, la strada non è percorribile per le biciclette poiché queste hanno grandi difficoltà a viaggiare sui lati ripidi, difficoltà che si accentuano quando è bagnato o quando c'è molta polvere rendendo la strada scivolosa e poco sicura.



*Figura 8 Esempi di strada nazionale non asfaltata (Ministry of Work and Transport, 2013)*

Nonostante ciò si stanno diffondendo molto rapidamente strade più moderne (figura 9), grazie alla costruzione di nuove o potenziamento delle vecchie, con bordi carreggiata regolari e semi asfaltati, adatti alla percorrenza di pedoni e ciclisti: infatti il governo Ugandese ha previsto uno standard per la costruzione di queste strade e sta investendo molti soldi, grazie anche al sostegno economico di Paesi come la Cina, in modo tale da incentivare e facilitare l'utilizzo di mezzi a pedali e l'attraversamento pedonale.



Figura 9 Esempio di strada asfaltata e modernizzata a Kampala, capitale dell'Uganda (Ministry of Work and Transport, 2022)

La necessità di potenziare l'infrastruttura garantendo sicurezza ed accessibilità per pedoni e ciclisti è dovuta in gran parte ai metodi di spostamento utilizzati dalla popolazione: come riportato da un articolo pubblicato da *The Guardian* (The Guardian, 2015), circa il 60% degli spostamenti giornalieri avvengono a piedi o in bicicletta, nonostante i rischi legati alla sicurezza descritti sopra; questa preferenza negli spostamenti, nonostante i notevoli pericoli, avviene perché la maggior parte delle persone che utilizzano le proprie biciclette su strada sono coloro che vivono in uno stato di povertà e non hanno altra possibilità se non utilizzare questa tipologia di trasporto e, riprendendo i dati sulla povertà discussi nel paragrafo 1.2.1, si può notare come il problema di garantire mezzi di trasporto a pedali affidabili ed un'infrastruttura sicura sia di primaria importanza. Infine, questa disuguaglianza sociale nei mezzi di trasporto utilizzati comporta un ulteriore problema di percezione, infatti la popolazione più benestante è restia nell'utilizzo di biciclette per gli spostamenti, nonostante i comprovati benefici a livello di salute che esse portano, in quanto queste vengono considerate un mezzo di trasporto per i più poveri. Per superare questo problema diverse associazioni, locali ed internazionali, hanno realizzato dei "cycling club" con lo scopo di sensibilizzare la popolazione attraverso workshop, gare ed esperienze in bicicletta: il progetto *Kampala cycling* (Kampala Cycling, 2024) è un esempio virtuoso di questi il quale, focalizzandosi sui più giovani ed attraverso gare, allenamenti e gite, utilizza il ciclismo per sviluppare il loro carattere e migliorare la loro condizione, consentendo loro di esprimere il proprio potenziale e di superare la povertà.

### 1.3.1 Modelli di biciclette utilizzati

Esistono molti modelli di biciclette attualmente in uso in Uganda: una parte di queste provengono da iniziative di ONG internazionali le quali importano container di biciclette, solitamente di seconda mano, dagli stati più sviluppati nei quali queste non vengono più utilizzate per vari motivi; tuttavia, i modelli più utilizzati sono biciclette di importazione indiana o cinese. La maggior parte di queste biciclette hanno un design rimasto invariato dagli anni '50, difatti non hanno marce e presentano freni a leve e bacchetta e tubi trasversali tra manubrio e sella (modello roadster): queste sono generalmente robuste e vengono adattate per montare un portapacchi posteriore.

I marchi indiani principalmente utilizzati in Uganda sono Hero e Roadmaster, le cui biciclette (figura 10) vengono spesso acquistate usate in modo da avere una spesa minore rispetto al prezzo iniziale di circa 65 \$ (Ministry of Work and Transport, 2013).



*Figura 10 bicicletta di tipo roadster del marchio Hero, commercializzata in Uganda*

La bicicletta Hero, così come la Roadmaster, presenta uno stile roadster con un tubo longitudinale per aumentare la rigidità, ruote dal diametro di 70 cm, un cambio a singola velocità, cerchi in acciaio, un telaio realizzato in tubi di acciaio a basso tenore di carbonio e un sistema frenante a leve e bacchetta. Pesa circa 22 kg considerando il portapacchi posteriore, presenta basse tolleranze di accoppiamento così come un rapporto di trasmissione molto elevato e viene venduta in una singola misura, non adattabile alle differenti altezze (Morris, 2008).

Per quanto riguarda invece i marchi cinesi, il principale produttore di biciclette roadster utilizzate nel Paese risulta essere Phoenix, ma a causa della bassa qualità costruttiva e robustezza risulta poco apprezzato ed utilizzato dalla popolazione ugandese. Negli ultimi anni si sta sviluppando nelle zone urbane anche il mercato delle mountain-bike con marce, che tuttavia rimangono una rarità.

La potenziale domanda di biciclette in Uganda è molto alta, soprattutto nelle aree rurali, ma poiché le biciclette sono costose rispetto ai redditi percepiti, l'effettiva domanda economica è rimasta piuttosto statica nel tempo. Le biciclette sopraccitate, quando acquistate nuove, sono generalmente spedite in scatole in uno stato parzialmente assemblato (generalmente da tre a cinque in una scatola) e vengono montate nel punto vendita in loco (figura 11): questo permette ai produttori di facilitare e ridurre i costi del trasporto in quanto queste occupano meno spazio rispetto allo stesso numero di biciclette già completamente assemblate.



Figura 11 assemblaggio di biciclette cinesi in un punto vendita locale nella città di Gulu (Baiskeli Uganda, 2024)

La produzione di queste biciclette da parte di produttori locali risulta inoltre economicamente svantaggiosa in quanto non si riuscirebbe a raggiungere l'economia di scala ed i bassi costi di manodopera di nazioni come Cina e India, e queste spese maggiorate si rifletterebbero sul prezzo di vendita che risulterebbe troppo elevato per i redditi locali.

Un esempio negativo che permette di comprendere i reali bisogni della popolazione ugandese in merito alle specifiche delle biciclette risulta essere la bicicletta modello California: questa bicicletta ha cambi di velocità ed è stata progettata da un ingegnere Ugandese appositamente per il mercato locale e per risultare moderna, efficiente ed affidabile ed, attraverso l'utilizzo di componenti durevoli ma economici, il suo costo risultava essere accessibile; tuttavia, l'accoglienza in Uganda è stata deludente, anche a un prezzo ridotto. Questa esperienza fa comprendere come la principale domanda in Uganda sembra essere per biciclette a basso costo (priorità massima) che siano robuste e facili da mantenere, a discapito di estetica e modernità (Ministry of Work and Transport, 2013).

La massima priorità di mantenere i costi il più bassi possibile è osservabile anche dallo stato di manutenzione di queste biciclette durante il loro utilizzo, infatti, secondo quanto riportato dal *Ministry of Work and Transport* (2013), un gran numero di queste non aveva blocchi freno anteriori e pneumatici gravemente danneggiati e usurati, inoltre una parte non possedeva nemmeno i pedali. I problemi legati alla riparazione erano di tipo prettamente economico in quanto le parti di ricambio erano disponibili nelle officine locali ad un prezzo ragionevole, ma le biciclette potevano funzionare anche senza di queste

### 1.3.2 Tricicli

In Uganda, l'uso principale dei tricicli è per le persone disabili: questi, per la maggior parte realizzati localmente, sono sotto forma di *hand-bike*. Le persone che non possono camminare facilmente utilizzano i tricicli con pedali sul manubrio per la mobilità personale e anche per generare reddito, sia nelle aree urbane che rurali: consentono a uomini e donne disabili di accedere ai luoghi di lavoro, alle strutture sanitarie, ai servizi amministrativi e di sviluppare attività commerciali come l'attività dei "boda-boda", una tipologia di corriere/tassista in bicicletta molto utilizzato in Uganda. Il principale motivo della diffusione di questi sistemi di trasporto per le persone disabili è che questi sono molto più robusti e stabili delle sedie a rotelle ed offrono un maggiore grado di protezione fisica rendendoli

adatti sia all'uso su marciapiedi che su strade: infatti, data la scarsa presenza di rampe di accesso per disabili sui marciapiedi e la ridotta grandezza che questi offrono, la maggior parte dei tricicli viene utilizzata sulle strade allo stesso modo delle biciclette.

## 1.4 Takataka plastics

Takataka plastics (2024) è un'impresa sociale con sede a Gulu, in Uganda, ed è il partner locale di questo progetto di tesi: grazie a loro si procederà alla costruzione ed utilizzo del prototipo di mezzo a pedali cargo con frullatore in loco, nonché sono risultati indispensabili per ricevere riscontri e necessità della comunità locale.

L'azienda è stata fondata nel 2020 a Gulu da Peter Okwoko, ex docente in ambito IT all'università di Gulu, e Paige Balcom, PhD in Ingegneria Meccanica presso l'università di Berkley in California, ed impiega circa 60 collaboratori tra la popolazione locale per le loro operazioni.

Per comprendere l'obiettivo ed il lavoro dell'impresa, bisogna introdurre il problema dei rifiuti in plastica che affligge l'Uganda: ogni giorno, infatti, vengono prodotti circa 600 tonnellate di rifiuti in plastica e circa il 50% non viene raccolto, percentuale che aumenta all'80% per la città di Gulu (Berkley, 2020). Questa città è infatti afflitta dalla presenza di una grandissima quantità di rifiuti in plastica che non vengono riciclati e che, accumulandosi per le strade, rendono la città un vero e proprio "contenitore" di rifiuti creando un grande problema per la salute pubblica: la maggior parte della plastica viene bruciata, rilasciando agenti cancerogeni e CO<sub>2</sub>, oppure viene gettata in discarica e finisce per ostruire i canali di scolo (figura 12), causando allagamenti e zone stagnanti dove si riproducono le zanzare portatrici di malaria, oppure viene sotterrata nel terreno ed inquina le coltivazioni o viene ingerita dagli animali al pascolo (NatuReS, 2021).



Figura 12 Rifiuti in plastica che ostruiscono i canali di scolo a Gulu, Uganda (Berkley, 2020)

L'impianto di riciclo più vicino si trova a circa sei ore di auto da Gulu e risulta perciò economicamente svantaggioso, inoltre il PET, materiale di cui sono composte le bottiglie in plastica, a causa delle sue proprietà chimiche è difficilmente processabile ed i macchinari hanno un costo di acquisto troppo elevato per il governo locale, infine Stati come India e Cina hanno bloccato l'importazione di rifiuti in plastica dagli Stati africani esasperando ulteriormente il problema.

Per fronteggiare questo problema, l'impresa Takataka plastics ha sviluppato un sistema di *up-cycling* del PET per produrre oggetti di uso comune (in un'ottica di economia circolare) come stand per smartphone, vasi e, durante la pandemia COVID-19, maschere per il viso, ma il loro principale prodotto ad oggi sono le piastrelle per muri (figura 13), più economiche e resistenti rispetto il corrispettivo in ceramica, personalizzabili in forma e colore ed installabili tramite colla: queste vengono vendute a negozi locali o costruttori edili garantendo, anche grazie al boom edilizio della città, la sostenibilità finanziaria dell'azienda (TakaTaka Plastics, 2024).



Figura 13 Piastrelle in plastica riciclata realizzate da Takataka Plastics (TakaTaka Plastics, 2024)

I rifiuti in PET sono tutti raccolti localmente nella città di Gulu, non richiedendo così costi di trasporto e sviluppando un modello locale per eliminare gli scarti, inoltre i macchinari utilizzati per la produzione di questi oggetti sono stati progettati appositamente dai due fondatori dell'impresa basandosi su progetti open-source, ma modificandoli in modo da adattarsi alle parti e alle tecniche di fabbricazione disponibili in loco (figura 14): questo ha permesso di realizzare macchinari localmente e ridurre i costi ad  $\frac{1}{4}$  di quelli necessari ad importarli dall'estero, e renderli anche facilmente riparabili e replicabili in altri parti dell'Uganda e dell'Africa orientale.



Figura 14 Macchinario di estrusione realizzato da Takataka in collaborazione con l'Università di Gulu, utilizzato per fondere la plastica triturata (TakaTaka Plastics, 2024)

Infatti, il loro processo che parte dalla raccolta della plastica, che poi viene selezionata, tritata ed infine fusa per produrre oggetti tramite tecniche di stampaggio ad iniezione/compressione è totalmente scalabile, ed uno degli obiettivi dell'azienda è proprio quello di espandere le proprie operazioni in altre parti del Paese.

L'azienda è molto attiva anche nel coinvolgere la comunità di Gulu, sia assumendo giovani ingegneri ed operai locali sia sensibilizzando la popolazione sul tema dei rifiuti e del corretto riciclo: infatti Takataka ha realizzato una soluzione economica e sostenibile per incentivare il riciclo da parte della popolazione, i "bottle banks" (figura 15), ossia dei contenitori metallici i quali permettono alla comunità di differenziare correttamente la plastica gettandola al loro interno ed evitare che questa vada insieme ad altri rifiuti inquinando ulteriormente.

Questi contenitori vengono posizionati in luoghi pubblici come scuole, mercati e ospedali e quando questi si riempiono i giovani li svuotano ed utilizzano dei carrelli per consegnare i rifiuti a Takataka (figura 14) dove, in base ai chilogrammi consegnati, ricevono una quota di denaro (NatuReS, 2021).



Figura 15 a sinistra "bottle bank" per la raccolta dei rifiuti in plastica, a destra i carrelli utilizzati per il trasporto dei rifiuti (TakaTaka Plastics, 2024)

L'azienda ha recentemente sviluppato anche dei prototipi di biciclette e tricicli cargo per ridurre l'impatto ambientale del trasporto di questi rifiuti (figura 16 e 17): sono stati testati differenti tipologie di cargo per individuare la soluzione più maneggevole ed affidabile ed è stato anche realizzato un prototipo di bicicletta con frullatore integrato sfruttando i processi produttivi dell'azienda per la realizzazione, tramite plastica riciclata, delle pareti del box cargo e del pianale di appoggio del frullatore.



*Figura 16 Prototipi di mezzi cargo realizzati da Takataka: a sinistra il prototipo di bicicletta con frullatore integrato e box cargo all'anteriore (Baiskeli Uganda, 2024)*



*Figura 17 Prototipi di mezzi cargo realizzati da Takataka: vista dall'anteriore (Baiskeli Uganda, 2024)*



## 2 Stato dell'arte

In questo capitolo vengono presentati i risultati della ricerca bibliografica svolta, atta a comprendere i progetti attualmente realizzati in questo ambito e le tecnologie ed i sistemi di trasferimento della potenza utilizzati per alimentare il frullatore tramite un mezzo a pedali. È stato altresì indagato l'utilizzo delle biciclette cargo così come il loro impatto ambientale e le opportunità che queste offrono, concentrandosi maggiormente sulle tecnologie ed i modelli applicabili nell'ambito del progetto di tesi.

### 2.1 Generazione di potenza del corpo umano

I livelli di potenza che un essere umano può produrre attraverso la pedalata dipendono dalla forza dell'utilizzatore e dalla durata della pedalata. Se l'attività da svolgere deve durare per un periodo prolungato (oltre un'ora), una potenza meccanica di 75 Watt è generalmente considerata il limite per un non atleta di corporatura robusta e in buona salute mentre un atleta della stessa corporatura potrebbe produrre fino al doppio di questa quantità (Wilson, 2004).

Per descrivere quantitativamente la potenza di pedalata di un individuo si eseguono test in laboratorio tramite ergometri e, fissando un livello di potenza (di solito chiedendo al soggetto di mantenere una velocità di pedalata fissa con una coppia frenante nota) viene determinata la durata entro la quale è possibile mantenere questo livello: i risultati ottenuti in questo modo vengono descritti tramite una curva potenza-durata e differiscono per ogni individuo in base alla propria forma fisica.

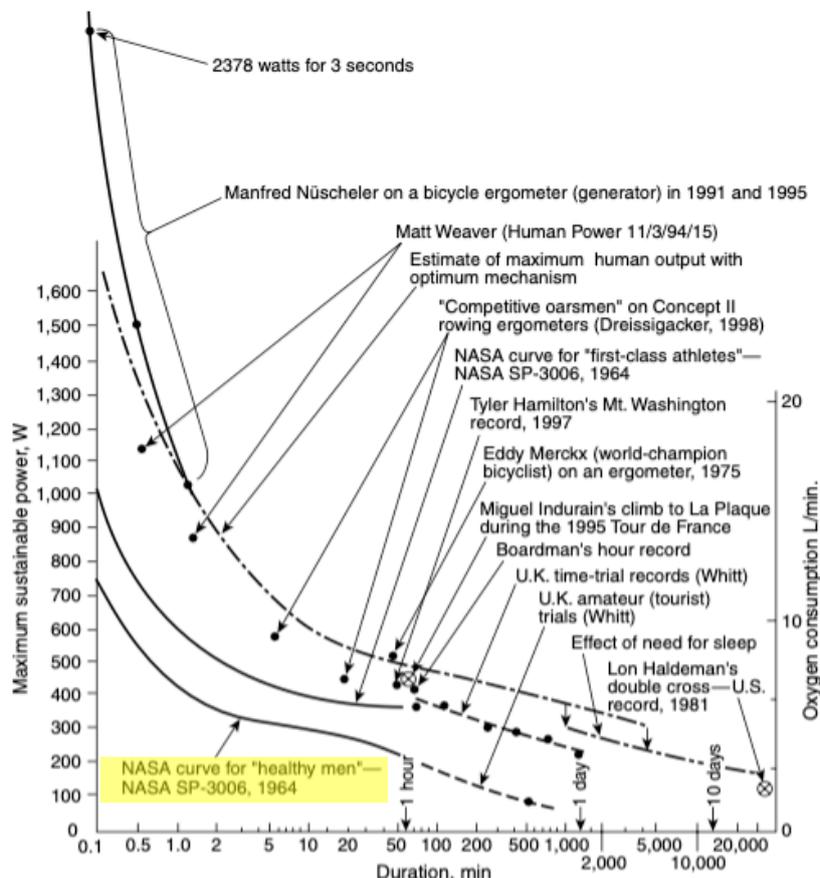


Figura 18 Curve potenza meccanica-durata per differenti tipi di attività e individui (Wilson, 2004)

In figura 18 vengono mostrate le curve potenza-durata per differenti tipi di individui ed attività fisica dove ciascun punto indica la durata massima della pedalata a un livello di potenza fisso: queste sono state ricavate tramite test ergonometrici e su bicicletta.

Risulta di particolare interesse la curva potenza-durata per “uomini in salute” ricavata da test condotti dalla NASA, in quanto rappresentativa della maggioranza della popolazione e su cui sono fissati valori di riferimento per potenza meccanica e durata, come la soglia massima di 75 Watt di potenza meccanica erogabili per un periodo prolungato.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione riguarda la relazione tra potenza muscolare generata dal corpo umano e la velocità di pedalata (rpm). Vi è una stretta relazione tra tempo, velocità e potenza: infatti, pedalando ad una certa velocità, il corpo umano può produrre più potenza, o la stessa quantità di potenza per un tempo più lungo. Questo range di velocità varia da persona a persona a seconda della condizione fisica e corporatura, ma per ciascun individuo esiste una velocità di pedalata ottimale che risulta più comoda e più efficiente in termini di produzione di potenza meccanica.

Wilson (2004) riporta che per persone in salute impegnate nella produzione di potenza per un periodo prolungato, la velocità di pedalata ottimale per garantire la massima efficienza risulta in un intervallo tra 50 e 70 giri al minuto (rpm), generando, come mostrato in figura 19, una media di 75 Watt.

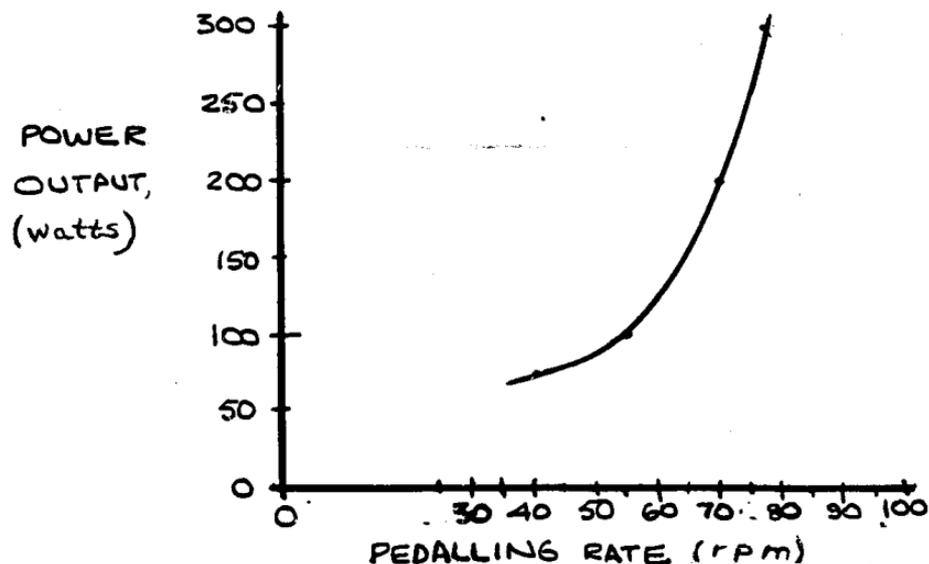


Figura 19 Relazione Potenza-velocità per “uomini in salute” (Wilson, 2004)

## 2.2 Mezzi a pedali con frullatore integrato

Si possono distinguere tre principali tipi di design utilizzati per l'attuazione di un frullatore tramite mezzi a pedali (Camacho, 2021-2024):

1. **Meccanico stazionario** (figura 20): questo design prevede che il moto rotatorio del volano della cyclette faccia ruotare un disco in gomma, collegato ad un albero di trasmissione, attraverso una trasmissione a frizione. L'albero di trasmissione si collega direttamente al sistema da attuare, quindi alla lama di un frullatore. Il frullatore è stabilizzato con un piano d'appoggio montato anteriormente o posteriormente alla bicicletta, in base alla posizione del volano. Un vantaggio di questa bicicletta è che non ci sono componenti elettrici coinvolti, di contro però i componenti possono risentire delle intemperie atmosferiche provocando ruggine ed usura;



Figura 20 Esempio di frullatore attuato da mezzo a pedali tramite sistema meccanico stazionario

2. **Elettrico stazionario** (figura 22): questo design prevede l'utilizzo di una cyclette collegando il suo volano alla puleggia di un generatore tramite una cinghia (figura 21) o a contatto diretto. Il generatore, solitamente selezionato per questo utilizzo in base a voltaggio (12-24 V) e velocità di rotazione, viene accoppiato ad una batteria ed un inverter. Un vantaggio di questo sistema è che può essere azionato qualsiasi apparecchio funzionante a corrente continua, non solo un frullatore. Lo svantaggio è che il generatore aggiunge peso alla bicicletta ed il cablaggio dello stesso deve essere saldo e sicuro per garantire un corretto funzionamento della bicicletta: inoltre, questo tipo di approccio non è resistente alle intemperie ed all'acqua;



Figura 21 Generatore elettrico collegato tramite cinghia al volano (Okoye, 2021)



Figura 22 Esempio di mezzo a pedali con sistema elettrico stazionario per alimentare dispositivi

- Modulare** (figura 23): Questo design prevede, oltre ai componenti del design di tipo 1, un cavalletto in grado di sollevare da terra la ruota posteriore del mezzo. Una volta posizionato il supporto e sollevata la ruota posteriore, il ciclista può azionare il frullatore pedalando con lo stesso sistema di trasmissione del tipo 1. Il vantaggio di questo design è che il cavalletto e il sistema trasmissione-frullatore sono separati dalla bicicletta, consentendo a qualsiasi bicicletta di montare ed alimentare un possibile frullatore. Lo svantaggio è la possibile perdita di efficienza dovuta al fatto di non avere un supporto su misura per una particolare bicicletta, causando contatti non ottimali tra la ruota e la trasmissione a frizione e provocando così perdite di velocità, che potrebbe risultare quindi non sufficiente ad alimentare correttamente il frullatore.



Figura 23 Esempio di frullatore attuato tramite sistema modulare montato su una bicicletta

Come fatto cenno nel capitolo introduttivo, la necessità di dover utilizzare tecnologie appropriate al contesto e contenere i costi rende di difficile attuazione il design di tipo 2 in quanto si renderebbe necessario l'utilizzo di un generatore elettrico con inverter e regolatore di tensione, mentre il design di tipo 1, benché ideato per un utilizzo statico, risulta attuabile senza modifiche al meccanismo di trasmissione, anche su una normale bicicletta; Infine, il design di tipo 3 risulta il più promettente in quanto permette di ridurre i costi dovuti all'acquisto di una bicicletta, rendendo al contempo attuabile il sistema su una vasta gamma di mezzi a pedali.

### 2.2.1 Mezzi a pedali meccanici con frullatore integrato

I progetti presentati di seguito sono accumulati dallo stesso meccanismo di trasmissione del moto accennato nel paragrafo precedente e composto da:

- Disco in gomma;
- Albero di trasmissione;
- Collegamento tra l'albero e l'asse di rotazione del frullatore (saldatura);

Per mezzo dell'attrito, la ruota della bicicletta in trazione mette in rotazione il ruotino di gomma, il quale permette la rotazione dell'albero di trasmissione e quindi delle lame del frullatore. Il materiale del ruotino risulta di fondamentale importanza in quanto, trattandosi dello stesso dello pneumatico (o comunque simile), garantisce un buon contatto superficiale ed uno slittamento limitato. Inoltre, l'alta velocità di rotazione delle lame del frullatore è ottenuta grazie al fatto che l'accoppiamento disco-pneumatico agisce come un accoppiamento pignone-ruota condotta giocando sulla differenza di circonferenza tra i due. In figura 24 viene riportata una schematizzazione del meccanismo di trasmissione evidenziando i componenti fondamentali descritti in precedenza.

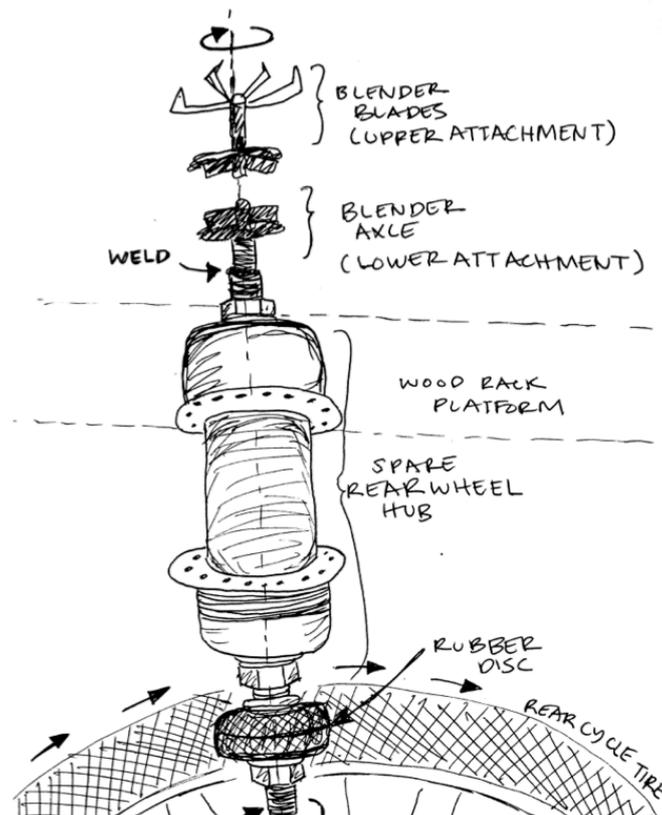


Figura 24 schematizzazione della trasmissione a frizione (Bijli bicycle, 2016)

Di seguito vengono mostrati alcuni esempi concreti e relativi costi (ove disponibili) riguardanti biciclette o cyclette con frullatori integrati. Vengono riportati tramite diversi colori i principali elementi del prodotto:

- In **arancio** il meccanismo di trasmissione;
- In **blu** il frullatore;

Il primo sistema descritto di seguito, acquistabile online, risulta essere la bicicletta con frullatore integrato prodotta dall'azienda *Rock the Bike* (2024): l'azienda propone due differenti tipi di prodotti, riconducibili al design di tipo 1 e di tipo 3, con prezzi differenti e pensati per incentivare l'attività fisica ed uno stile di vita sano.



Figura 25 a sx prodotto Fender Brender PRO, a dx esploso del meccanismo di trasmissione (Rock the Bike, 2024)

Il primo prodotto, mostrato in figura 25, prende il nome di *Fender Blender PRO* ed ha un costo di 2,150 \$: si tratta di un design di tipo 1, quindi di una cyclette con meccanismo meccanico stazionario, il cui sistema di trasmissione a frizione è posizionato sull'anteriore. Il prodotto ha una lunghezza complessiva di 142 cm, larghezza di 78 cm ed altezza di 99 cm, il peso assemblato è pari a 27 kg e può sopportare fino a 100 kg di peso dell'utilizzatore. Le lame del frullatore sono realizzate in acciaio inox ed hanno un diametro di 5 cm, mentre nel punto di giunzione tra l'albero di trasmissione e l'asse del frullatore viene posto un cuscinetto a sfere per ridurre l'attrito.

La stessa azienda produce inoltre un sistema modulare (figura 26), quindi un design di tipo 3, in grado di adattarsi a qualsiasi bicicletta: in questo caso il sistema è composto oltre che dal sistema di trasmissione (analogo a quello utilizzato nel primo prodotto) e dal frullatore con relativo appoggio, anche da un cavalletto per permettere il sollevamento della ruota posteriore per azionare e stabilizzare il frullatore. Il prezzo di questo sistema parte da 559 \$ e viene venduto in due diverse misure, per biciclette da bambino e da adulto.



Figura 26 a sx il prodotto Fender Blender Universale montato su una bicicletta, a dx esploso del meccanismo di trasmissione e del frullatore (Rock the Bike, 2024)

Entrambi i prodotti dell'azienda presentano un disco in materiale metallico con delle scanalature in modo tale da ottenere un contatto ottimale per la trasmissione del moto. L'utilizzo di metallo al posto della gomma permette di diminuire i problemi di usura del componente in rotazione, grazie alla maggiore durezza del materiale metallico, e garantire una vita più lunga del sistema di trasmissione a fronte di un costo più elevato ed un processo produttivo non in linea con la necessità di utilizzare tecnologie appropriate al contesto della città di Gulu.

Il secondo prodotto oggetto di questa analisi e mostrato in figura 27 è il mezzo a pedali realizzato dall'associazione no profit *Mayapedal* situata in Guatemala (Mayapedal, 2010): a differenza dell'azienda *RocktheBike*, in questo caso l'obiettivo dell'associazione risulta più in linea con l'obiettivo di questa tesi, difatti l'associazione ricicla vecchie biciclette donate da vari Stati del mondo per riadattarle ai bisogni delle comunità locali.

Questo frullatore, azionato tramite volano di una cyclette, risulta più artigianale e viene realizzato con materiali disponibili in loco come vecchie biciclette, legno e metallo di scarto e può essere acquistato dalla popolazione con l'obiettivo sia di favorire l'utilizzo del sistema in zone remote in cui non è disponibile elettricità, sia di promuovere la microimprenditorialità: difatti l'associazione ha reso open-source questo e tutti i suoi progetti di macchine azionate da pedali.

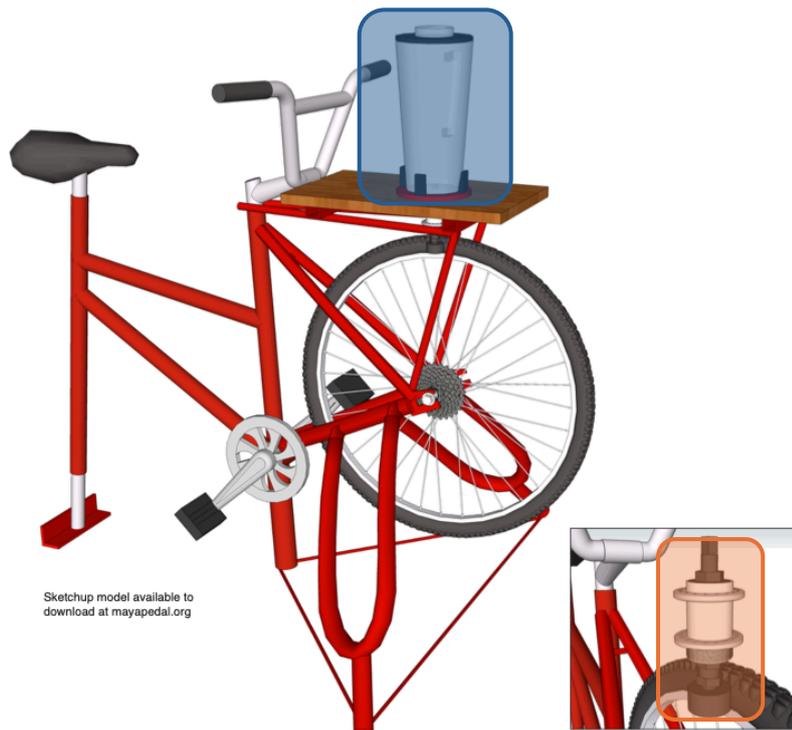


Figura 27 Modello CAD del dispositivo di MayaPedal (2010)

Anche in questo caso il sistema può essere ricollegato ad un design di tipo 1, in quanto sistema stazionario azionato meccanicamente, ma in questo progetto i materiali e le tecnologie utilizzate risultano essere più in linea con le necessità del caso studio in oggetto, in quanto il disco montato a contatto con lo pneumatico è realizzato in gomma e per la realizzazione dell'albero di trasmissione vengono utilizzati materiali di scarto come il mozzo della ruota posteriore inutilizzata. Il disco in gomma, che funge da ruota condotta, ha un diametro  $d_2$  di 28 mm, ed è a contatto con la ruota motrice dal diametro  $d_1$  di 700 mm: utilizzando la formula 1 per il calcolo del rapporto di trasmissione ed ipotizzando una velocità di pedalata per un breve periodo pari a  $\omega_1 = 90$  rpm è possibile ricavare la velocità di rotazione delle lame del frullatore, pari a circa 2250 rpm e sufficiente ad alimentare in modo efficace il dispositivo.

$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (1)$$

Il costo di produzione di questo sistema si aggira tra i 40 \$ ed i 250 \$, in base alla reperibilità dei componenti (De Decker, 2011).

L'ultimo progetto esaminato in questa analisi riguarda il frullatore azionato da bicicletta realizzato dall'associazione Bijli Bicycle (2016), il cui progetto di sensibilizzazione sociale mira a fornire fonti indipendenti e rinnovabili di elettricità e illuminazione alle comunità rurali dell'India settentrionale attraverso la bicicletta. Anche in questo caso, come per *Mayapedal*, l'associazione oltre a realizzare e commercializzare il sistema rende il progetto open-source per la comunità ed insegna come effettuare la manutenzione sulla macchina.

In questo caso il prodotto realizzato può essere ricollegato ad un design di tipo 3 in quanto viene realizzato un sistema modulare da applicare su una vecchia bicicletta. L'associazione ha proposto due diverse configurazioni per il frullatore: la prima, mostrata in figura 28, prevede il frullatore a contatto con la ruota posteriore motrice, mentre la seconda prevede

di posizionare il frullatore all'anteriore andando ad invertire la catena di trasmissione e rendere la ruota anteriore motrice, questo per garantire al guidatore un controllo visivo sul frullatore anche durante il movimento e monitorare cedimenti dello stesso a causa delle strade impervie.

Infine, i costi riportati per la realizzazione del prototipo ammontano in un range compreso tra i 22 e i 37 \$, non considerando i costi di acquisto della bicicletta.



Figura 28 a sx prototipo con frullatore a contatto a contatto con la ruota posteriore, a dx particolare del meccanismo a frizione (Bijli bicycle, 2016)

In conclusione, i progetti di *Mayapedal* e *Bijli Bicycle* sono stati considerati più affini alle condizioni operative del progetto ugandese. Uno degli svantaggi principali di questi prototipi risulta la difficile reperibilità di un frullatore adatto alle esigenze di costruzione, in quanto in entrambi i casi l'asse di rotazione del frullatore ha la necessità di essere saldato all'albero di trasmissione, e perciò risulta necessario reperire un frullatore avente un'asse in materiale metallico saldabile, resistente alle alte temperature e compatibile con l'albero di trasmissione realizzato in acciaio.

## 2.2.2 Generatore elettrico a pedali

Il sistema di attuazione di tipo elettrico stazionario (design di tipo 2) è la tipologia che ad oggi riscontra più interesse. La possibilità di generare corrente elettrica da una macchina a pedali ed immagazzinarla permette di espandere l'utilizzo del meccanismo a tutti i moderni prodotti altrimenti non alimentabili tramite sola energia meccanica. Tale sistema, schematizzato in figura 29, prevede diverse apparecchiature per garantire il funzionamento dei dispositivi come:

- Un generatore di energia elettrica: principalmente viene utilizzato un motore DC a magneti permanenti per via del minor numero di rpm richiesti per generare elettricità rispetto ad un alternatore da automobile (Anyanwu, 2016);
- Una batteria per accumulare l'energia prodotta e relativo sistema di controllo: solitamente le batterie utilizzate sono con una chimica di tipo NiMH (Nickel-metallo idruro) in quanto più efficienti rispetto al tipo NiCd (Nickel-Cadmio);
- Un inverter in grado di alimentare in corrente alternata e/o alla corretta tensione i dispositivi collegati;

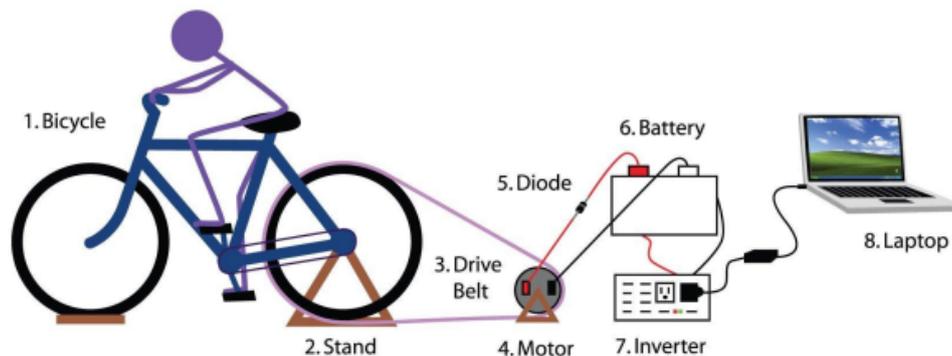


Figura 29 Schematizzazione sistema di conversione di energia meccanica in energia elettrica

Un parametro fondamentale per il corretto funzionamento di questi sistemi è la relazione tra la velocità della ruota della bicicletta ed il voltaggio prodotto dal generatore di corrente. Secondo quanto testato da Anyanwu (2016), vi è una relazione lineare tra il voltaggio e la velocità della puleggia del generatore, che a sua volta dipende dalla velocità del volano: un aumento del diametro del volano comporta un aumento del voltaggio del generatore. Inoltre, la velocità di pedalata necessaria per raggiungere una data tensione è determinata dal carico collegato: più leggero è il carico, più bassi sono gli rpm necessari per raggiungere la tensione specificata. In figura 30 è riportato un grafico che mostra la relazione lineare tra la velocità della puleggia del generatore e la tensione generata.

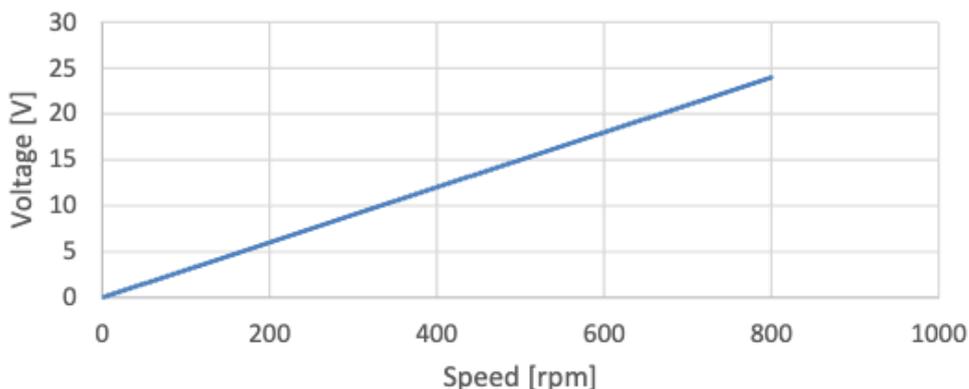


Figura 30 relazione tra velocità della puleggia (rpm) e voltaggio prodotto dal generatore (Anyanwu, 2016)

Per quanto riguarda dispositivi commerciali di questo tipo, a differenza dei sistemi meccanici, la cui unica azienda produttrice risulta essere *Rockthebike*, sono disponibili in vendita diversi stand che permettono di convertire il moto rotatorio della bicicletta in energia elettrica attraverso un generatore elettrico ed eventualmente una batteria d'accumulo. Per esempio, l'azienda *Convergence Tech* propone un sistema dal nome *Pedal-A-watt* (figura 31), comprendente un motore DC brushless, la cui puleggia è a contatto diretto con la ruota motrice della bicicletta, un inverter DC 12 V - AC 220 V ed una batteria d'accumulo; il prezzo di questo dispositivo parte da 929 \$ e permette, tramite porte USB e prese di corrente standard, di alimentare dispositivi elettronici ed elettrodomestici.



Figura 31 convertitore di energia elettrica Pedal-A-Watt

Il principale limite di questi sistemi è relativo all'efficienza dei vari componenti che li compongono: infatti le perdite di potenza meccanica, le perdite nel generatore e quelle nell'inverter, sommandosi tra di loro, rendono il sistema meno sostenibile ed efficiente rispetto a quello presentato nel paragrafo 2.2.

Per quanto riguarda le perdite meccaniche, essendo che una velocità di pedalata considerata sostenibile nel lungo periodo è di circa 50-70 rpm (paragrafo 2.1), sono richiesti una sequenza di ingranaggi, catene e cinghie per aumentare la velocità di rotazione della puleggia del generatore e generare livelli sufficienti di tensione. Ogni elemento di questo sistema comporta una perdita di potenza che, sommandosi, portano a perdite di efficienza non trascurabili: i sistemi di trasmissione meccanici hanno generalmente un'efficienza tra 85 e 98%, a seconda dei meccanismi e del numero di ingranamenti (Gregory, 2019).

La perdita di potenza maggiore si verifica durante la conversione dell'energia di rotazione in elettricità nel generatore. La maggior parte dei generatori è in grado di convertire circa tra il 75-95% della potenza assorbita in elettricità utile, ma è bene notare che l'efficienza di un generatore dipende dalla sua struttura, dalla velocità di rotazione, dal carico collegato e da parametri ambientali (Anyanwu, 2016).

Per quanto riguarda invece l'inverter, le perdite di potenza possono essere stimate a circa il 5% in caso di conversione DC 12 V- DC 5 V, mentre nel caso sia necessario convertire la corrente continua in corrente alternata l'efficienza può variare tra il 60-90% in base alla struttura dell'inverter (Gregory, 2019).

Il prototipo di generatore elettrico a pedali realizzato da Anyanwu, utilizzando un inverter DC-AC ed un motore DC a magneti permanenti, ha riportato un'efficienza pari al 66,6% generando 15 V e 2,5 A (prima dell'inverter) ad una velocità del generatore pari a 483 rpm; Okoye (2021) ha misurato l'efficienza di un altro prototipo, con inverter DC-AC da 1 KVA e motore analogo, andando a variare il carico collegato al sistema, si riporta in figura 32 i

risultati di questo test: si può notare un'efficienza massima pari all'88,37% con un carico di 100 W che tende poi a decrescere fino ad un minimo del 13,1% collegando un carico da 1000 W.

In conclusione, questi sistemi risultano inadatti allo scopo di questa tesi in quanto per un

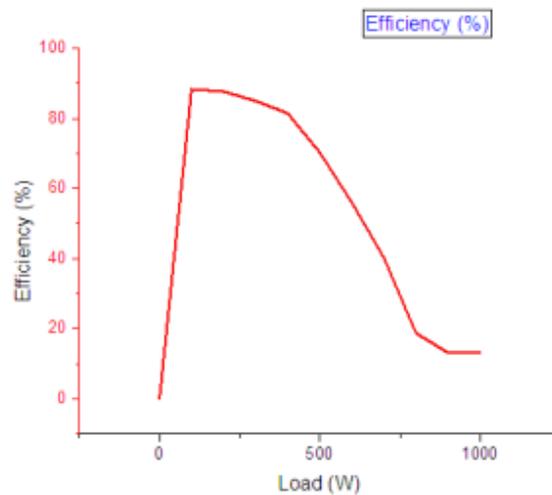


Figura 32 Variazione di efficienza di un generatore elettrico a pedali variando il carico collegato tra 0 e 1000 W (Okoye, 2021)

corretto funzionamento hanno necessità di diversi componenti come quelli elencati sopra, difficilmente reperibili in zone come l'Uganda e con un costo estremamente maggiore rispetto al più semplice sistema meccanico più sostenibile ed efficiente.

### 2.3 Limiti dei mezzi a pedali per la conversione di energia

Come già accennato, la potenza erogabile continuamente da un uomo adulto medio è modesta ma sufficiente per alimentare piccoli elettrodomestici o dispositivi portatili in modo continuativo, come il frullatore oggetto di questa tesi.

Tuttavia, il limite maggiore delle macchine a pedali non risulta nella potenza erogata, ma nella necessità di dover alimentare il sistema da fermi, non potendo beneficiare dell'azione raffrescative dell'aria. L'azione dell'aria, che in prima approssimazione potrebbe sembrare un effetto indesiderato in quanto il ciclista dovrebbe spendere energia per compensare la sua resistenza, in realtà contribuisce ad evitare il surriscaldamento del corpo umano dovuto ad un'attività fisica prolungata; Questo problema potrebbe essere parzialmente risolto con piccoli ventilatori meccanici, ma Wilson (2004) spiega come il flusso d'aria generato pedalando è significativo e non può essere paragonato a quello prodotto dai piccoli ventilatori elettrici spesso utilizzati sugli ergometri. Anche se si utilizzassero ventole con potenza equivalente a quella dissipata nell'aria pedalando, circa 150 Watt a 9 m/s, l'effetto di raffreddamento sarebbe inferiore rispetto a quello del ciclista in moto, poiché gran parte della potenza della ventola si disperderebbe in attrito dell'aria su aree diverse da quella attorno al corpo del ciclista. Aggiungendo a queste osservazioni che la temperatura massima in Uganda si attesta intorno ai 34 °C durante la stagione calda e 27 °C durante la stagione fredda, il problema del surriscaldamento del ciclista dovuto all'attività fisica assume un aspetto di primaria importanza.

## 2.4 Mezzi a pedali cargo

Le biciclette da trasporto o bici cargo sono dei mezzi a pedali appositamente progettati per il trasporto di persone o merci. L'origine delle biciclette cargo può essere ricondotta all'anno 1877: James Starley progettò tre sistemi cargo per il trasporto di persone o merci. A quel tempo i telai in legno furono sostituiti da copie in ferro pieno con cuscinetti a sfera. Questi erano pesanti, privi di ingranaggi e con scarsa capacità di carico ma risultarono interessanti anche dopo l'invenzione della Safety, la prima bicicletta come la conosciamo, nel 1888 poichè la tecnica ciclistica era piuttosto costosa. Tuttavia, questi sviluppi tecnici furono in ultima analisi indispensabili per l'ulteriore evoluzione della bicicletta da carico: la catena rendeva superflua la trasmissione diretta alle ruote e creava libertà nel posizionamento del ciclista e del carico, le ruote potevano essere più piccole e perciò il trasporto di merci tramite sistemi a pedali divenne energicamente interessante (Kirkels, 2016)

Ad oggi questi sistemi risultano ampiamente utilizzati, principalmente nel nord Europa, per scopi sia privati che commerciali, ma nel mondo molte città, New York in primis, stanno attuando leggi ad-hoc per incentivare l'utilizzo di mezzi a pedali cargo con motore elettrico come sistema per il *last-mile delivery* riducendo la presenza di furgoni in strada e quindi abbattendo di circa 14 tonnellate per anno (per singolo furgone) le emissioni di CO<sub>2</sub> (Micah, 2023). Questi sistemi, con un prezzo compreso tra i 500 e gli 9000 €, sono infatti in grado di trasportare fino a 300 kg (Sykes, 2023) fungendo quindi da ottima alternativa, sia in termini economici che ambientali, ai mezzi di trasporto pesanti utilizzati nelle città che, oltre all'inquinamento, sono responsabili anche del congestionamento del traffico.

Per quanto concerne l'aspetto economico, il report pubblicato dalla Heinrich Böll Foundation (2021) effettua un confronto tra i costi annuali relativi alla gestione di una city car e di una bicicletta elettrica cargo utilizzando il valore della percorrenza media delle auto (15000 km): il risultato, illustrato in figura 33, evidenzia come l'utilizzo di una bicicletta cargo elettrica per spostamenti cittadini o comunque di piccole entità porti ad un risparmio annuo di circa l'82,7% rispetto all'utilizzo di un'auto di piccole dimensioni negli stessi tragitti.

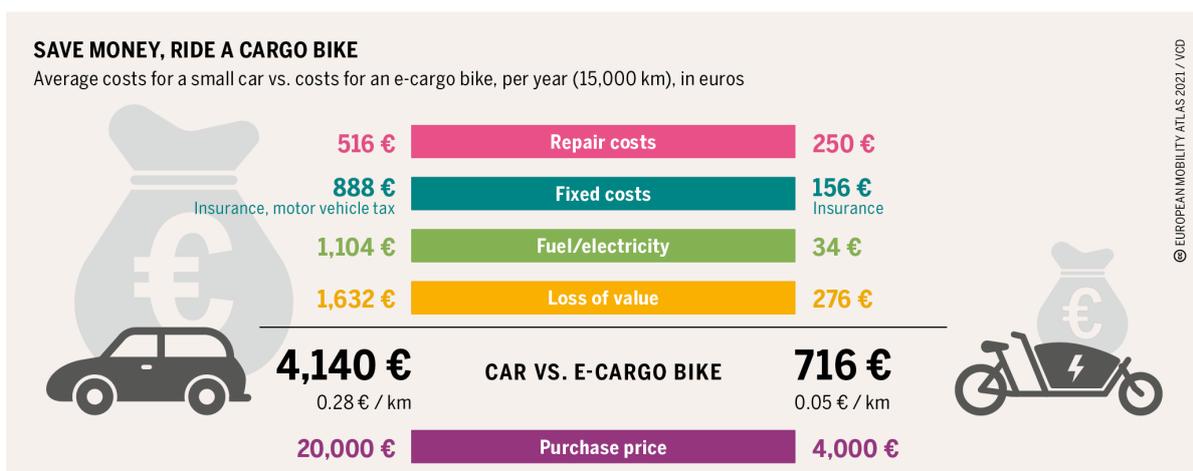


Figura 33 Confronto dei costi tra city car e bicicletta cargo (Böckmann, Duwe-Schrinner, Kurzhöfer, CC BY 4.0)

### 2.4.1 Tipologie di cargo disponibili

Ad oggi, grazie ad un maggiore interesse nella sostenibilità ambientale e con l'avvento delle *e-bike*, sono disponibili in commercio varie tipologie di mezzi a pedali cargo in grado di rispondere alle diverse esigenze dei consumatori. In questo capitolo, in accordo con quanto indicato dalle normative EN 15194 e ISO 4210, sono indicate come *e-bike* solo quelle biciclette o tricicli la cui potenza nominale continua non superi i 250 W e la cui assistenza alla pedalata sia limitata ad un massimo di 25 km/h: i mezzi che rispettano questi vincoli sono indicati dalle normative sopra citate come *pedelec-25*.

Una prima distinzione può essere effettuata in base al numero di ruote del mezzo. Infatti, a seconda dell'utilizzo e delle necessità di stabilità, capacità di carico e manovrabilità è possibile optare per:

- **Tricicli cargo:** mezzi a 3 ruote in grado di assicurare un baricentro più basso e quindi una maggiore stabilità di guida, così come una maggiore capacità di carico grazie principalmente alla distribuzione del peso anche su una ruota aggiuntiva. Strutturalmente questi sistemi possono avere due configurazioni:
  - *Tadpole* (figura 34): triciclo con due ruote anteriori ed il box cargo posizionato anteriormente;
  - *Delta* (figura 36): soluzione inversa al *tadpole*, in questo caso le due ruote sono posizionate posteriormente;

I tricicli cargo differiscono meccanicamente da una normale bicicletta in quanto è necessaria la presenza di un albero di trasmissione tra le due ruote in parallelo ed eventualmente un differenziale se entrambe risultano motrici. Per essere conformi alla normativa EN 17860-5, i tricicli devono essere dotati di assistenza elettrica: per quest'ultima, come per qualsiasi bicicletta a pedalata assistita, il limite massimo di potenza è di 250 W. Questi tricicli, nella configurazione *tadpole*, risultano principalmente impiegati in attività commerciali;



Figura 34 Triciclo cargo in configurazione "tadpole" utilizzato per attività commerciale



Figura 36 Triciclo cargo in configurazione "delta" utilizzato per last-mile delivery

- **Biciclette cargo** (figura 35): mezzi a 2 ruote, la cui meccanica è in generale analoga ad una comune bicicletta e la sterzata, nel caso del modello in figura 35, è resa possibile tramite una leva che collega manubrio e forcella anteriore. Questi mezzi sono in grado di assicurare una migliore manovrabilità ed un ingombro minore rispetto ai mezzi a 3 ruote, ed inoltre l'eliminazione della terza ruota e dell'albero di trasmissione risulta generalmente in una riduzione di peso rispetto ai tricicli;



Figura 35 Bicicletta cargo utilizzata per il trasporto merci

- **Quadricicli cargo** (figura 37): sistemi a 4 ruote, solitamente assistiti in pedalata da motori elettrici e con una struttura semi-chiusa per proteggere guidatore e carico contro le intemperie. I vantaggi dell'utilizzo di questi sistemi sono una stabilità e una capacità di carico migliorata rispetto alle configurazioni precedenti a fronte di un peso maggiore del telaio. Questa configurazione è quasi esclusivamente impiegata per attività commerciali come food-truck o come mezzo per il *last-mile delivery* nelle grandi città.



Figura 37 Quadriciclo cargo adibito al last-mile delivery con parabrezza per il conducente

Una seconda classificazione dei mezzi a pedali cargo disponibili in commercio, visibile in figura 38, viene invece effettuata in base alla disposizione e alla grandezza del box porta carichi sul telaio del mezzo. Di seguito vengono descritte le principali tipologie di cargo utilizzate, seguendo la classificazione riportata dalla Heinrich Böll Foundation (2021).

- **Long John / Front loader:** biciclette / tricicli con capacità di carico anteriore, ideate per il trasporto di oggetti ingombranti o di prodotti che si desidera tenere in vista durante la guida. Sono caratterizzate da un box posizionato nella parte anteriore della bicicletta e sono generalmente manovrate tramite un sistema di leveraggio dello sterzo in quanto il manubrio non controlla direttamente la ruota anteriore. La capacità di carico media per le biciclette long John è di 95 kg, mentre per i tricicli Front loader è di 125 kg;
- **Longtail:** biciclette con un box di carico posteriore ricavato tra il ciclista e la ruota motrice. Pur potendo trasportare un carico simile a quello di una Long-John, hanno il vantaggio di essere lievemente più leggere e facilmente manovrabili grazie alla loro somiglianza con le biciclette tradizionali. Il telaio è allungato per offrire più spazio di carico dietro al ciclista e può essere facilmente adattato al carico che si intende trasportare;
- **Baker's bike:** simili alle biciclette tradizionali, con pianali o cassoni più piccoli ed una capacità di carico sia anteriore che posteriore. Pur avendo meno spazio utile, possono trasportare un carico di medio peso: queste biciclette possono raggiungere una capacità di carico fino a 45 kg;
- **Rear Loader:** questa tipologia di triciclo cargo ha una struttura simile a quella delle biciclette Long Tail in quanto il box di carico è posizionato al posteriore: a differenza di queste però, la presenza della terza ruota permette una migliore distribuzione del peso e quindi una maggiore capacità di carico, di circa 150 kg. Questa tipologia di tricicli inoltre richiede la presenza di un differenziale al posteriore per garantire un raggio di sterzata adeguato agli ingombri del mezzo;

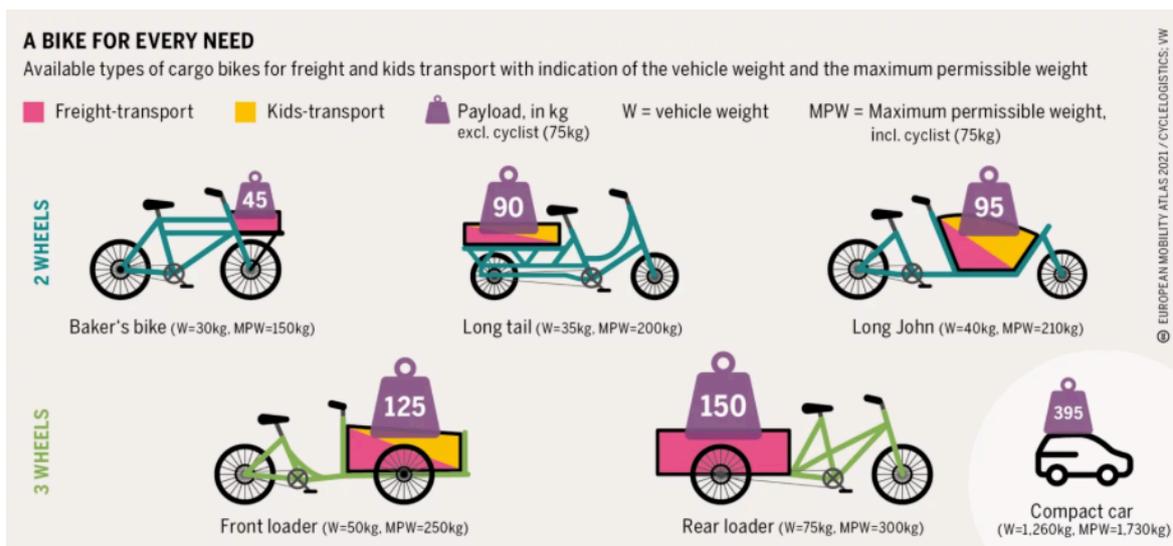


Figura 38 Classificazione dei mezzi a pedali cargo in base alla disposizione del box (Böckmann, Duwe-Schrinner, Kurzhöfer, CC BY 4.0)

Un'ulteriore soluzione ampiamente adottata per il trasporto di carichi pesanti tramite mezzi a pedali è rappresentata dai **carrelli cargo**. Questi rimorchi, che possono essere agganciati a qualsiasi tipo di bicicletta, offrono una soluzione più semplice per aumentare la capacità di carico senza modificare la struttura del mezzo a pedali.

I trailer cargo sono utili per chi necessita di una soluzione temporanea per il trasporto di oggetti ingombranti, poiché possono essere facilmente attaccati e staccati dalla bicicletta. A seconda delle esigenze e delle condizioni del terreno, i trailer cargo si suddividono in due categorie: a una ruota e a due ruote (figura 39). Ciascuna di queste presenta vantaggi e svantaggi legati alla tipologia di utilizzo ed al carico da trasportare, come illustrato in tabella 2.

| Tipo di Trailer            | Vantaggi  | Svantaggi  |
|----------------------------|---|--|
| <b>Trailer a una ruota</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maggiore maneggevolezza, ingombri ridotti</li> <li>• Minore resistenza al rotolamento</li> <li>• Ideale per terreni accidentati e percorsi stretti</li> <li>• Leggerezza del telaio</li> </ul>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Minore stabilità</li> <li>• Capacità di carico ridotta</li> <li>• Maggiore rigidità</li> <li>• Maggiore influenza sulla stabilità della bicicletta (due bracci connessi alla ruota)</li> </ul>                  |
| <b>Trailer a due ruote</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maggiore stabilità</li> <li>• Maggiore capacità di carico</li> <li>• Più gradi di libertà (singolo braccio collegato alla ruota)</li> <li>• Facilità di aggancio e sgancio data la presenza di un solo braccio.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maggiore resistenza al rotolamento</li> <li>• Maggiori ingombri, meno maneggevole in spazi ristretti</li> <li>• Più difficile da manovrare su terreni accidentati</li> <li>• Maggior peso del telaio</li> </ul> |

Tabella 2 Vantaggi e svantaggi di trailer cargo a una e due ruote



Figura 39 a sinistra trailer cargo ad una ruota, a destra trailer cargo a due ruote

I bracci di traino dei carrelli sono rigidi, ma, nei trailer a due ruote, possono presentare delle molle nel punto di attacco tra il braccio e la bicicletta (figura 40), allo scopo di garantire una connessione più flessibile del sistema.

Infine, esistono diverse configurazioni attraverso le quali il braccio di traino si fissa alla bicicletta, ciascuna con caratteristiche specifiche che rispondono a esigenze di utilizzo con vari modelli di biciclette e rispettivi assi delle ruote. Di seguito vengono brevemente descritte le principali:

- **Attacco al reggisella:** questo sistema utilizza una staffa fissata al reggisella della bicicletta su cui viene collegato il braccio di traino. È ideale per carichi di media entità, ma può influenzare negativamente la maneggevolezza del mezzo, a causa della lunghezza del braccio di traino.
- **Attacco al mozzo posteriore:** questo sistema permette di collegare il braccio di traino direttamente all'asse della ruota posteriore tramite una staffa posta all'estremità dello stesso e fissata tramite il dado dell'asse (figura 40). L'attacco al mozzo sfrutta un meccanismo di connessione compatibile con tutte le configurazioni di biciclette, mantenendo il baricentro del carello basso; inoltre, alcuni modelli presentano anche un perno per facilitare lo sgancio del trailer dalla bicicletta.
- **Attacco a sgancio rapido:** questo sistema, simile al sistema di attacco al mozzo posteriore, utilizza il meccanismo di sgancio rapido dell'asse della ruota posteriore per fissare il braccio di traino alla bicicletta. Questo tipo di attacco è facile da installare e rimuovere, ma è compatibile solo con biciclette dotate di sgancio rapido.



Figura 40 Attacco al mozzo posteriore con molla all'estremità

## 2.4.2 Potenziali benefici dell'utilizzo di biciclette cargo

Secondo quanto riportato da *CityChanger CargoBike* (2019) questo tipo di mobilità ha il potenziale per poter affrontare alcuni dei problemi ambientali, logistici, di traffico e sociali che affliggono molte città europee ed extra-europee, fornendo una nuova percezione della mobilità, dei trasporti e della qualità della vita. A tale scopo è stato redatto il documento “*20 good reasons to ride a cargo bike*” in cui vengono mostrati i potenziali benefici in ambito sociale, economico ed ambientale dell'utilizzo di biciclette cargo: di seguito viene riportata una panoramica di quei vantaggi che possono essere proiettati anche nel contesto socioeconomico ugandese.

Ad oggi il traffico di veicoli commerciali all'interno delle città è il principale responsabile dell'inquinamento acustico e dell'emissione di una grande percentuale di agenti inquinanti: infatti il traffico cittadino produce circa il 40% di tutte le emissioni di carbonio legate ai trasporti e il 70% di tutti gli altri inquinanti. Come accennato nel paragrafo 2.4, l'utilizzo di una singola bicicletta cargo in sostituzione del carico trasportato da un veicolo con motore diesel può portare un risparmio di 5 tonnellate di CO<sub>2</sub> emessa; Inoltre, le biciclette cargo richiedono solamente il 5% dei materiali ed energia necessari per la realizzazione di un'automobile, riducendo così l'impatto ambientale non solo durante il suo utilizzo ma anche durante tutto il suo ciclo di vita.

Come indagato da diversi studi, l'utilizzo costante di biciclette e sistemi a pedali per piccoli spostamenti garantisce un maggiore benessere fisico. L'aspettativa di vita delle persone che vanno regolarmente in bicicletta aumenta fino a 14 mesi e gli spostamenti in bici espongono alla metà dell'inquinamento rispetto a chi sta seduto in auto. A Copenaghen, dove la quantità di chilometri percorsi in bicicletta è aumentata di 60 milioni dal 2012 al 2016, i residenti hanno preso 50.000 giorni di malattia in meno e hanno fatto risparmiare al sistema sanitario nazionale 215 milioni di euro.

Infine, grazie all'ampia possibilità di personalizzazione dei sistemi cargo a pedali, questi permettono di iniziare o reinventare progetti di microimprenditorialità a fronte di un piccolo investimento: biciclette o tricicli cargo sono infatti ampiamente utilizzati in attività come il commercio di cibo o bevande o consegne a domicilio, garantendo all'imprenditore flessibilità negli spostamenti e la possibilità di posizionarsi in zone altamente affollate. Con un costo inferiore a quello dell'acquisto di un'auto, costi di carburante nulli, bassi costi assicurativi, minori costi di manutenzione e riparazione, una bicicletta cargo permette un risparmio considerevole in termini economici garantendo inoltre un'elevata efficienza in termini di peso in quanto può trasportare un carico utile per kg di peso del veicolo a pedali tra le 4 e le 6 volte superiore rispetto ai furgoni.

### 2.4.3 Progetti cargo in Africa

Diverse aziende e organizzazioni no-profit hanno implementato e commercializzato varie tipologie di *cargo bike* negli Stati del continente africano: infatti in molte di queste Nazioni in via di sviluppo il concetto di mobilità sostenibile ed a basso costo assume un significato di primaria importanza ed è strettamente collegato all'accessibilità, uno dei fattori più importanti per lo sviluppo di queste nazioni. Nell'Africa subsahariana, la distanza è un ostacolo che impedisce di frequentare la scuola, accedere all'assistenza sanitaria e trovare lavoro e reddito. Semplici interventi con le biciclette possono colmare il divario e rendere accessibili servizi che cambiano la vita; Come rivela Valerie Labi, CEO e co-founder di *Wahu!*, una di queste realtà che si occupa dello sviluppo e produzione di cargo bike in Ghana, parlando con le comunità locali *“una delle questioni più importanti che è emersa costantemente, a prescindere dalla persona con cui parlo, anziana o giovane, uomo o donna, riguardava il divario di connettività, inteso come i trasporti, i quali sono inaccessibili, inaffidabili e insostenibili”* (Cargo Bike Festival, 2023).

Il primo progetto riportato in questo paragrafo riguarda *Cycling out of Poverty Foundation* (CooP-Africa, 2024), una ONG con base in Uganda, Kenya, Olanda e Belgio: il loro lavoro ha permesso lo sviluppo nel 2010 della CooP-Bike (figura 41), bicicletta cargo multiuso, progettata per sostenere gli imprenditori e incoraggiare le persone a inventare i propri modi di guadagnarsi da vivere tramite la bicicletta.



Figura 41 La CooP-Bike (Eickmans, 2022)

La bicicletta, completamente meccanica e riconducibile alla tipologia *Baker's bike*, è stata progettata rispondendo a diversi vincoli imposti per renderla fruibile ed economicamente sostenibile per le comunità locali come (Eickmans, 2022):

- Adatta a molti microimprenditori diversi;
- In grado di trasportare fino a 60 kg o 80 litri di acqua di carico utile;
- Può essere guidata sia su asfalto che su strade dissestate;
- Telaio di alta qualità e parti a bassa manutenzione;
- Può essere guidata comodamente per 50 km al giorno;
- Può essere costruita o riparata localmente;

Ad oggi l'associazione ha realizzato due ciclofficine in Jinja, Uganda e Kisumu, Kenya (figura 42) dove le comunità locali possono modificare, progettare e costruire il mezzo a pedali (cargo e non) più adatto alle loro esigenze.



Figura 42 localizzazione città di Jinja e Kisumu

Il secondo progetto riportato invece è quello dell'ingegnere meccanico Zoltàn Papp, fondatore dell'associazione *Cargobike for Africa*, il cui obiettivo è diffondere nel maggior numero possibile di Paesi le cargo bike create appositamente per le circostanze africane: per fare ciò, l'associazione propone brevi programmi di formazione ed aiuto in modo tale che i professionisti locali siano in grado di produrre queste biciclette da soli, sostenendo in questo modo anche i piccoli imprenditori (Cargobike for Africa, 2024).



Figura 43 Bicicletta cargo realizzata da Cargobike for Africa (2024)

La bicicletta cargo in questo caso è un sistema modulare (figura 43), in quanto utilizza il telaio e la meccanica di una normale bicicletta disponibile in loco per andare ad integrare lateralmente tramite saldatura un box cargo realizzato in acciaio. I requisiti tecnici prefissati dall'ingegnere per realizzare questo progetto erano:

- Costruzione semplice senza parti mobili;
- Produzione economica a livello locale, sfruttando una bicicletta tradizionale;
- Struttura modulare;
- Capacità di carico di 150 kg o 150 litri di acqua;
- Distribuzione del peso sulla terza ruota;

- Guidabilità su strade dissestate;
- Sicura e agile capacità di traino su salite/discese;

Il mezzo, il cui sviluppo è terminato nel 2017, è attualmente utilizzato da varie comunità in Tanzania per il trasporto di merci ed acqua e si sta ampliando, con l'aiuto di partner locali, in altre città del Paese.

Un altro progetto nato in Tanzania è *Baiskeli*, su iniziativa della Ciclofficina Sociale (2024) con sede a Milano. Questo progetto ha l'obiettivo di migliorare la mobilità nelle comunità rurali del Paese fornendo trailer e biciclette economici, robusti e capaci di trasportare sia merci che persone.

Il progetto non solo fornisce mezzi di trasporto, ma spesso coinvolge le comunità locali nella manutenzione e riparazione delle biciclette, creando opportunità di lavoro e formazione professionale. Oltre all'impatto economico, *Baiskeli* contribuisce anche a migliorare l'accesso all'istruzione e ai servizi sanitari tramite i mezzi realizzati, riducendo il tempo di viaggio per studenti e pazienti.

Due mezzi sviluppati dall'associazione sono il trailer scuolabus e il trailer ambulanza: entrambi sono carrelli a due ruote agganciabili a qualsiasi bicicletta, il telaio è realizzato in acciaio al carbonio ed i restanti componenti sono pensati per essere facilmente riparabili o sostituiti con le risorse locali. Il trailer ambulanza ha un box di carico di forma rettangolare e permette di trasportare una persona in posizione distesa, come mostrato in figura 44 e 45. Le ruote utilizzate sono delle comuni ruote di bicicletta da 26", il braccio di traino è fissato alla bicicletta tramite un pezzo di copertone di scarto di un camion, facilmente reperibile in loco, che riduce la rigidità della connessione evitando di ricorrere a sistemi di aggancio più complessi, non disponibili localmente. I progettisti hanno riferito che il copertone ha una durata, prima di perdere le sue proprietà meccaniche, di circa 2 mesi: un tempo che, sebbene ridotto, è compensato dall'ampia reperibilità e dal costo nullo, rendendo la soluzione pratica e sostenibile per le esigenze locali.



Figura 44 Trailer ambulanza realizzato da Baiskeli (credit: Alessandro Trovati)



*Figura 45 Trailer ambulanza durante la fase di utilizzo (credit: Alessandro Trovati)*

Il trailer scuolabus, mostrato in figura 46, ha tecniche di costruzione analoghe a quelle dell'ambulanza, ma l'interno è stato modificato per permettere il trasporto di sei bambini in posizione seduta. Questo mezzo, così come il trailer ambulanza, può disporre di teli di copertura lungo le pareti per proteggere la persona trasportata da polvere ed altri agenti atmosferici.



*Figura 46 Trailer scuolabus durante la fase di utilizzo (credit: Alessandro Trovati)*

L'ultimo prodotto indagato è il triciclo cargo elettrico *Zelo* (figura 47) realizzata dall'azienda *Greenfoot Africa* (2024) con sede in Tanzania, fondata nel 2019 da un gruppo di tanzaniani e sostenuta dalla fondazione no-profit *Siemens Stiftung*. La loro missione è quella di accelerare l'adozione di tecnologie sostenibili per il trasporto di merci nei centri urbani e rurali dell'Africa. Attualmente invece il loro obiettivo principale è lo sviluppo, la distribuzione e l'assistenza di cargo bike elettriche per il trasporto di merci nelle aree urbane.



Figura 47 Triciclo cargo *Zelo* (*Greenfoot Africa*, 2024)

A differenza dei precedenti progetti indagati, in questo caso il mezzo è un prodotto commerciale con pedalata assistita, progettato secondo le necessità di trasporto merci delle comunità locali e che può essere affittato o acquistato dalle stesse.

*Zelo* è un mezzo, rispetto alle altre biciclette elettriche presenti sul mercato tanzaniano, fino al 60% più economico da gestire, permette di ridurre di quasi il 100% le emissioni di CO<sub>2</sub> rispetto ai mezzi comunemente usati per il trasporto di merci ed inoltre, grazie agli strumenti digitali messi a disposizione dall'azienda per l'assistenza e manutenzione, può risultare fino a 3 volte più efficiente a livello operativo: questi strumenti digitali risultano in un'applicazione per smartphone tramite il quale è possibile gestire il mezzo e l'erogazione dei servizi di noleggio così come i servizi gratuiti, programmati e on-demand, di manutenzione e riparazione (*Siemens Stiftung*, 2024).

Infine, secondo la classificazione presentata nel paragrafo 2.4.1, questo mezzo può essere ricondotto alla tipologia di triciclo cargo *Rear loader*.

## 2.5 Limiti dei mezzi cargo a pedali

Il principale limite delle biciclette cargo riguarda il peso delle stesse: per le e-cargo bike, infatti, solo il telaio con il porta pacchi pesa in media circa 50 kg, mentre il pacco batterie aggiunge altri 5 kg a cui va a sommarsi infine il peso del ciclista.

La tendenza ad utilizzare questi dispositivi come mezzi per il *last mile delivery* ha portato alla costruzione di biciclette con box di carico più grandi e resistenti ed i costruttori hanno dovuto far fronte alle problematiche di peso che la struttura riscontrava. La soluzione maggiormente adottata riguarda l'utilizzo di piccoli motori elettrici per assistere la pedalata, permettendo così al mezzo di rientrare nella categoria *pedelec-25* ed evitare la classificazione di motoveicolo, la quale comporta costi aggiuntivi di acquisto e gestione del mezzo; in Europa nel 2020 infatti circa il 92% delle biciclette cargo vendute erano elettriche (D'Hondt, 2022), e con l'introduzione delle nuove regolamentazioni nel 2024, l'adozione dei motori elettrici è divenuta obbligatoria per far fronte ai problemi di sicurezza dovuti all'eccessivo peso trasportabile.

Un'ulteriore soluzione presentata dai costruttori riguarda l'adozione, per le zone meno sollecitate del telaio, di materiali più leggeri come l'alluminio: infatti quest'ultimo presenta una densità di circa 2,8 g/cm<sup>3</sup> a fronte di una densità dell'acciaio pari a circa 7,8 g/cm<sup>3</sup>, e, quindi, a parità di struttura, porta ad una diminuzione del peso di circa tre volte.

Le strutture in alluminio sono ampiamente adottate per i carrelli cargo, il cui peso è solitamente intorno i 10 kg e possono trasportare una media di circa 50 kg di carico.

Tuttavia, queste soluzioni hanno portato ad un incremento generale dei prezzi dei mezzi in quanto l'inserimento di sistemi elettrici o l'adozione di materiali più leggeri comporta costi di produzione più alti.

Infine, concentrandosi sull'Uganda e sul caso studio oggetto di questa tesi, si evince come le soluzioni adottate dai costruttori europei o americani per far fronte ai problemi di peso risultano difficilmente percorribili in quanto l'adozione di batterie e motori elettrici comporterebbe un importante incremento dei costi mentre l'adozione di materiali più performanti rispetto all'acciaio potrebbe risultare addirittura impossibile data la difficile reperibilità e gli elevati costi degli stessi.



### 3 Scopi, vincoli del progetto e definizione del prodotto

In questo capitolo vengono esplorati in maniera più approfondita i diversi scopi di utilizzo del dispositivo oggetto della progettazione ed i vincoli progettuali che hanno guidato lo sviluppo dello stesso. La definizione dei vincoli si basa su due fonti principali: da una parte l'esperienza derivata dalla prototipazione di mezzi simili da parte di Takataka Plastics e, dall'altra, i feedback raccolti attraverso discussioni con i tecnici dell'azienda riguardo le necessità della popolazione locale.

#### 3.1 Scopi del mezzo a pedali cargo

Il mezzo a pedali oggetto di questa tesi, come accennato nel capitolo introduttivo, deve essere progettato secondo le esigenze di tre diverse tipologie di utilizzo. La prima riguarda le operazioni dell'impresa Takataka ed è rivolto al trasporto dei rifiuti in plastica dalle stazioni di raccolta, poste in vari punti della città di Gulu, fino alla fabbrica dove vengono trattati per realizzare nuovi prodotti. Come approfondito nel paragrafo 1.4, ad oggi il trasporto è affidato in parte a ragazzi retribuiti in base alla quantità di plastica trasportata ed in parte, nel caso di pesi maggiori, l'azienda utilizza furgoni o camion.

Il secondo scopo del mezzo cargo con frullatore è volto a promuovere la microimprenditorialità attraverso la realizzazione su di esso di stazioni mobili per la produzione e vendita di frullati, fatti sfruttando il frullatore alimentato a pedali e la frutta invenduta nei mercati giornalieri. Queste stazioni mobili possono essere collocate in punti strategici e frequentati come scuole, chiese o mercati, promuovendo opportunità di lavoro e sensibilizzando sul tema dello spreco alimentare. Questa tipologia di utilizzo mira anche a realizzare modelli di business sostenibili, supportando al contempo microimprenditorialità e mobilità ad impatto zero.

Il terzo scopo del prodotto è quello di fungere da mezzo di trasporto per cibo, acqua e merci pesanti verso i villaggi circostanti, dove la disponibilità di risorse è limitata e le infrastrutture di trasporto versano in condizioni critiche. Grazie alla capacità di carico maggiore rispetto ad una normale bicicletta ed i costi minori rispetto ad un'automobile o furgone, l'obiettivo, in questo caso, è di superare le difficoltà logistiche delle aree rurali, garantendo l'accesso a beni essenziali e contribuendo a migliorare la qualità della vita nelle comunità più isolate.

In tabella 3 viene mostrato uno schema riassuntivo delle tre destinazioni d'uso del mezzo a pedali presentate.

| <b>Scopi / Usi del mezzo a pedali cargo con frullatore</b>  |
|---|
| 1. Trasportare i rifiuti in plastica dalle zone di raccolta alla fabbrica di trattamento.                                   |
| 2. Incentivare la microimprenditorialità realizzando stazioni mobili a basso costo per la produzione e vendita di frullati. |
| 3. Trasportare beni di prima necessità e carichi pesanti verso le aree rurali con limitato accesso ai servizi.              |

*Tabella 3 Schema riassuntivo degli scopi d'utilizzo del mezzo*

### 3.2 Prototipi realizzati da Takataka Plastics

L'impresa Takataka Plastics ha sviluppato due prototipi progettati per rispondere al primo ed al secondo scopo d'utilizzo descritti in Tabella 3. I due prototipi realizzati presentano grandezza e disposizione del box cargo differenti: questo ha permesso di esplorare approcci alternativi e chiarire vantaggi e limiti delle due tipologie.

Il primo prototipo realizzato, mostrato in figura 48, può essere ricondotto, secondo la classificazione riportata in figura 38, alla tipologia di bicicletta cargo *Long John*.



Figura 48 Primo prototipo realizzato da takataka, classificato come Long John (Baiskeli Uganda, 2024)

Questo prototipo prevede una capacità di carico anteriore ed il telaio è stato realizzato partendo da una normale bicicletta, tagliata all'anteriore e su cui poi sono stati saldati dei profilati di acciaio al carbonio 50x50 mm di spessore 2 mm per collegare il tubo dello sterzo e la ruota anteriore. Tra il tubo dello sterzo ed il profilato è stato inserito un cuscinetto radiale a sfere per ridurre l'attrito durante la sterzata: in questo modo il tubo di sterzo presenta 3 cuscinetti, due nella parte superiori, originali della bicicletta, ed uno nella zona inferiore (figura 49); questa soluzione è stata poi valutata superflua in quanto l'utilizzo di soli due cuscinetti avrebbe permesso di risparmiare in tempi di costruzione e costi.

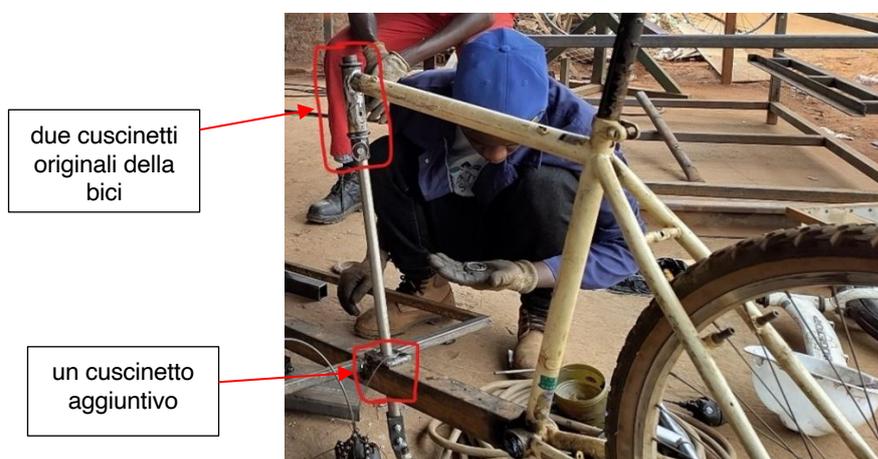


Figura 49 dettaglio della posizione dei cuscinetti sul tubo di sterzo (Baiskeli Uganda, 2024)

Il sistema di sterzo della bicicletta è garantito da un leveraggio collegato alla parte inferiore del tubo di sterzo ed alle forcelle della ruota anteriore, come mostrato in figura 50. Il telaio del box cargo è stato realizzato con profilati di acciaio di dimensioni 20x20 mm di spessore 1,5 mm e le superfici sono state realizzate con dei fogli di plastica riciclata prodotti internamente. Il peso elevato di questo mezzo, dovuto principalmente alla dimensione dei profilati di acciaio, ha rappresentato un forte limite per la guidabilità, soprattutto nelle fasi di partenza, e l'utilizzo dei fogli di plastica, sebbene abbia permesso di ridurre i costi, ha portato ad un ulteriore importante incremento di peso, risparmiabile utilizzando legno o una rete elettrosaldata.



*Figura 50 Dettaglio del leveraggio collegato al tubo di sterzo e del telaio del box cargo (Baiskeli Uganda, 2024)*

In questo prototipo è stato sperimentato anche l'utilizzo di un frullatore azionato meccanicamente, il cui meccanismo di attuazione, secondo quanto riportato nel paragrafo 2.2, può essere ricondotto ad un design modulare. L'albero di trasmissione del sistema è stato collegato direttamente alla lama del frullatore e lo stand d'appoggio è stato realizzato tramite fogli di plastica riciclata. Le problematiche riscontrate in questo prototipo riguardano:

- La rigidità dello stand, in quanto durante la pedalata per alimentare il frullatore questo tendeva a piegarsi toccando la ruota;
- La posizione del frullatore, in quanto le lame hanno una direzione preferenziale di taglio ed il posizionamento del ruotino di trasmissione lungo un lato della ruota non permette il corretto verso di rotazione;
- Le dimensioni della ruota di trasmissione, in quanto una dimensione minore permetterebbe di ottenere un rapporto di trasmissione maggiore e quindi una maggiore velocità di rotazione delle lame;

Il secondo prototipo realizzato, mostrato in figura 51, può essere classificato come triciclo cargo *Rear loader*.



Figura 51 Secondo prototipo realizzato da takataka, di tipo *Rear loader* (Baiskeli Uganda, 2024)

A differenza del primo, questo prototipo è un triciclo cargo con capacità di carico posteriore. La presenza della terza ruota garantisce un maggior peso trasportabile, un maggiore volume di carico ed una maggiore stabilità. Anche in questo caso il prototipo è stato realizzando partendo da una normale bicicletta tagliata e su cui sono stati saldati dei profilati di acciaio di diverse dimensioni per realizzare il box cargo.

Il movimento alle ruote posteriori del triciclo è trasmesso da un albero di trasmissione con un pignone fisso su di esso e da una catena. La catena è ingranata sul pignone e sulla corona della pedaliera, permettendo la trasmissione del moto (figura 52).

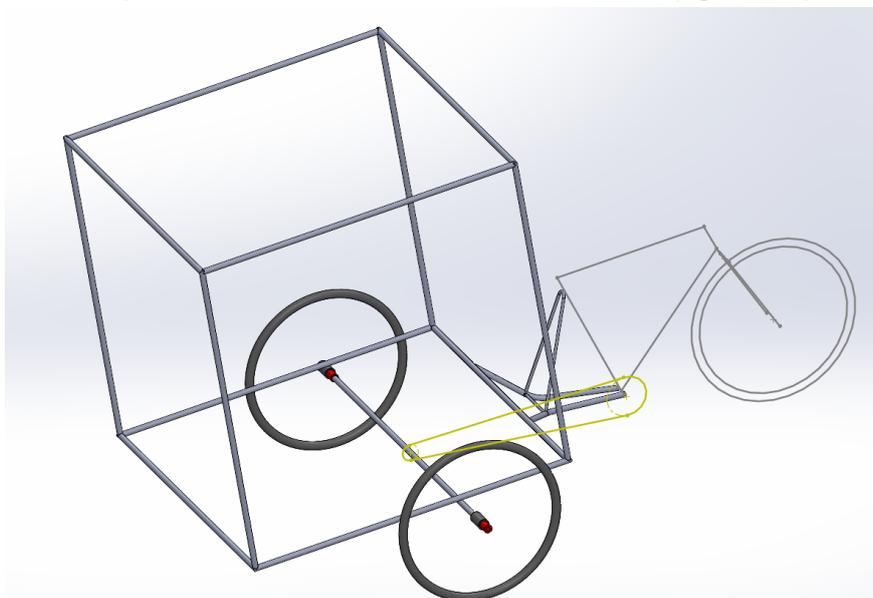


Figura 52 Schema del sistema di trasmissione adottato per il triciclo cargo

Per garantire una buona maneggevolezza in curva senza dover ricorrere a una scatola differenziale, che avrebbe portato ad un aumento dei costi, è stata adottata la soluzione di collegare l'albero di trasmissione ad una sola delle due ruote posteriori, lasciando l'altra come ruota libera (figura 53). Questa configurazione consente alla ruota non motrice di adattare liberamente la sua velocità in curva, migliorando la guidabilità del mezzo.



Figura 53 a sinistra dettaglio della ruota libera, a destra dettaglio della ruota collegata all'albero (Baiskeli Uganda, 2024)

La principale problematica riscontrata su questo prototipo, visibile anche in figura 51, riguarda la catena di trasmissione: come si può notare, dato il posizionamento dell'albero di trasmissione rispetto alla corona della pedaliera e la lunghezza della catena, questa finisce per toccare sul telaio causando problematiche di attrito e usura, nonché possibili perdite di efficienza nel trasferimento della forza motrice.

Infine, i principali vantaggi e limiti sull'usabilità dei due prototipi vengono riassunti in tabella 4.

| Tipo di Trailer                  | Vantaggi  | Limiti  |
|----------------------------------|---|---|
| <b>Prototipo 1 (Long john)</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maggiore visibilità del carico</li> <li>• Permette un'esperienza di pedalata più tradizionale</li> <li>• Non richiede differenziale ed albero di trasmissione</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maggior peso percepito</li> <li>• Richiede un passo più lungo per avere stabilità</li> <li>• Il carico può influire sullo sterzo</li> <li>• Elevata lunghezza del mezzo</li> </ul> |
| <b>Prototipo 2 (Rear loader)</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maggiore stabilità</li> <li>• Maggiore capacità di carico in termini di peso e volume</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ridotta visibilità del carico</li> <li>• Minore manovrabilità</li> <li>• Richiede un albero di trasmissione</li> </ul>   |

Tabella 4 Vantaggi e limiti dei due prototipi realizzati da Takataka

### 3.3 Vincoli imposti dalle necessità locali

Durante una serie di riunioni con rappresentanti della comunità locale, sono stati definiti i vincoli progettuali dati dal contesto e necessari per lo sviluppo del prodotto, suddivisi in categorie specifiche: percorrenza, tipo di strada, carico, peso del mezzo, materiali disponibili, dimensione delle ruote, prezzo e tecnologie di produzione. Un ulteriore vincolo riguarda la necessità di garantire la replicabilità del progetto in diverse regioni dell'Uganda.

Questi sono stati poi distinti in due sovra categorie principali: vincoli comuni a tutte le applicazioni e vincoli specifici, variabili in base alla destinazione d'uso. Per quanto riguarda la prima categoria, questa comprende aspetti fondamentali per il processo costruttivo e sono:

- **Tecnologie di produzione:** Le tecnologie accessibili comprendono la saldatura di tipo SMAW e le lavorazioni al tornio, facilmente reperibili a livello locale.
- **Materiali disponibili:** L'acciaio al carbonio è l'unico materiale economicamente sostenibile e facilmente reperibile, offerto in profilati da 6 metri ed in varie sezioni dal produttore locale. L'alluminio, sebbene migliore dal punto di vista del peso, è costoso e difficile da reperire.
- **Prezzo di vendita:** Per garantire competitività e accessibilità del prodotto, il prezzo di vendita deve essere compreso tra i 900.000 UGX ed i 1.000.000 UGX (circa 250 euro), un limite imposto dalle condizioni economiche locali.
- **Ruote utilizzabili:** Le ruote disponibili presso la ciclofficina locale, prevalentemente da 26", rappresentano una scelta obbligata, vincolando il design del prodotto a queste dimensioni.
- **Peso massimo del mezzo:** La struttura del componente cargo deve avere un peso intorno ai 20 kg per garantire una facile maneggevolezza.
- **Ingombri del box di carico:** La lunghezza del box di carico, in base all'esperienza di guidabilità dei due prototipi discussi in precedenza, non deve eccedere gli 1,2 m, mentre la larghezza è vincolata entro 1 m, per non complicare gli spostamenti nel traffico stradale.
- **Frullatore:** Questo dispositivo, come riferito da TakaTaka Plastics in base alle abitudini della comunità locale, deve essere integrato nel mezzo cargo e non può costituire un elemento distaccato dal veicolo.

La seconda categoria comprende invece i vincoli variabili in base al tipo di utilizzo del mezzo. Questi vincoli includono aspetti come la distanza da percorrere, la tipologia di strada e il carico massimo trasportabile. Poiché le condizioni operative possono variare notevolmente tra i diversi scopi d'uso, in fase di progettazione è stato considerato il valore più critico per ciascuno di questi parametri, assicurando così che il prodotto finale sia in grado di affrontare anche gli scenari più impegnativi.

Di seguito, in tabella 5 vengono mostrati i vincoli specifici per ciascuna destinazione d'uso definita in tabella 3, e viene evidenziato il valore più critico per ciascun aspetto.

| Vincolo                                | Uso 1            | Uso 2                               | Uso 3                         |
|--|------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Distanza percorsa (giornaliera)</b> | 8-10 km          | 15-20 km                            | 20-25 km                      |
| <b>Tipo di strada</b>                  | Strade asfaltate | Strade asfaltate o sterrate leggere | Strade sterrate o accidentate |
| <b>Peso massimo trasportabile</b>      | 40 kg            | 30-40 kg                            | 100 kg                        |

Tabella 5 Valore dei vincoli operativi in base alla destinazione d'uso

Come si può notare dalla tabella, le condizioni più critiche riguardano tutte il caso d'uso 3, ovvero il trasporto di beni prima di prima necessità e merci pesanti ai villaggi rurali.

Un'ulteriore osservazione di cui è stato tenuto conto nella fase di progettazione riguarda il volume del carico: sebbene per il caso 1 il peso sia circa un terzo rispetto al caso 3, il carico è costituito da rifiuti in plastica, composti prevalentemente da bottiglie, che occupano un volume elevato, di circa 1 m<sup>3</sup>, e che potrebbe persino superare quello degli altri due casi.

### 3.4 Definizione della tipologia di prodotto

Considerando i vincoli emersi sia dall'esperienza di prototipazione sia dal contesto operativo, la soluzione più appropriata tra le tipologie di mezzo cargo discusse nel paragrafo 2.4.1 è risultata essere l'adozione di un carrello cargo a due ruote. Il carrello, o trailer, può inoltre essere equipaggiato anche con un frullatore, azionato dalla ruota motrice della bicicletta trainante tramite un meccanismo di tipo modulare. I vantaggi portati da questa soluzione sono:

- **Integrazione con le biciclette locali:** Le biciclette sono già ampiamente utilizzate dalla popolazione locale; l'acquisto di un ulteriore mezzo esclusivamente per uso lavorativo potrebbe non essere economicamente sostenibile per molte persone e la modifica delle biciclette già possedute potrebbe non esser voluta dalla popolazione. Il trailer consente quindi di sfruttare le biciclette esistenti senza dover effettuare modifiche, rendendo il sistema più accessibile.
- **Costo ridotto:** Il trailer non include la componentistica meccanica della bicicletta, riducendo così i costi di produzione ed il prezzo di acquisto.
- **Funzionalità della bicicletta:** Il trailer non compromette la normale operatività della bicicletta, consentendo all'utente di utilizzarla per altri scopi.
- **Compatibilità universale:** Il trailer è compatibile con una vasta gamma di biciclette, rendendolo utilizzabile con varie tipologie differenti.
- **Modularità:** Il sistema è progettato per essere modulare, permettendo all'utente di scegliere se acquistare o utilizzare solo il carrello, solo il frullatore, o entrambi, in base alle esigenze di utilizzo. Inoltre, grazie alla sua configurazione, il trailer può essere facilmente attaccato e staccato dalla bicicletta, riducendo i tempi di setup per l'utente.
- **Facilità di manutenzione:** L'assenza di componenti complessi rende il trailer facile da mantenere, riducendo i costi di manutenzione e aumentando la sua durata nel tempo.

Per fissare il braccio di traino alla bicicletta, è stato deciso di adottare lo stesso meccanismo utilizzato nel progetto *Baiskeli*, che prevede l'interposizione tra questi di un pezzo di un copertone esaurito di camion. Questo elemento, come descritto precedentemente, assicura un maggior grado di libertà al sistema, permettendo inoltre di azzerare i costi di produzione e di impatto ambientale. Sebbene abbia una vita utile ridotta, questa è compensata dalla facile reperibilità e dal costo nullo, rendendo la soluzione ideale per i contesti d'utilizzo.

Questi fattori rendono il trailer cargo a due ruote la soluzione più efficace per soddisfare i vincoli progettuali e le esigenze della popolazione, offrendo un dispositivo sia funzionale che economicamente sostenibile.



## 4 Progettazione del carrello ed Analisi FEM

Questo capitolo descrive i passaggi seguiti per la progettazione del trailer cargo. Il software utilizzato per la progettazione del componente è *Solidworks*, poiché consente di eseguire sia la modellazione CAD che le analisi FEM, sia di tipo statico che dinamico, in un unico ambiente integrato, fornendo inoltre informazioni sulle proprietà di massa del componente e delle relative saldature.

Inizialmente vengono descritte le proprietà dei materiali selezionati, insieme alle dimensioni disponibili per i profilati presso la locale acciaieria, fondamentali per la definizione del design. Successivamente, viene esaminata la prima proposta progettuale e le seguenti revisioni apportate per rispondere ai vincoli stabiliti. Vengono inoltre presentate le analisi FEM condotte sui componenti per verificarne la resistenza strutturale. Il capitolo si conclude con la progettazione del sistema di attuazione del frullatore, integrato nel carrello per rispondere alle esigenze di utilizzo richieste dagli utenti finali.

### 4.1 Proprietà meccaniche dei materiali e dimensioni disponibili

Il telaio del trailer è stato progettato utilizzando l'acciaio a basso tenore di carbonio "Grade 210", unico materiale economicamente sostenibile disponibile localmente. Le dimensioni della sezione dei profilati sono state scelte dal catalogo del fornitore utilizzato dall'azienda Takataka, ed è stato tenuto conto che questi vengono venduti in lunghezze standard di 6 metri e già zincati per garantire una maggiore resistenza alla corrosione.

In figura 54 viene riportato il catalogo con le specifiche tecniche dei tubi quadri disponibili.

| Size<br>DxD<br>(mm) | Wall<br>Thickness<br>(mm) | Sectional<br>Area<br>(cm <sup>2</sup> ) | Weight<br>(Kg/m) | Moment of Inertia<br>I |                      | Radius of Gyration<br>R |        | Modulus of Section<br>Z |                      |
|---------------------|---------------------------|---|------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|--------|-------------------------|----------------------|
|                     |                           |   |                  | (xxmm <sup>4</sup> )   | (yyym <sup>4</sup> ) | (xxmm)                  | (yyym) | (xxmm <sup>3</sup> )    | (yyym <sup>3</sup> ) |
| 12 x 12             | 0.8                       | 0.358                                   | 0.281            | 753.118                | 753.118              | 4.584                   | 4.584  | 125.52                  | 125.52               |
|                     | 1.0                       | 0.44                                    | 0.344            | 894.67                 | 894.67               | 4.509                   | 4.509  | 149.11                  | 149.11               |
|                     | 1.2                       | 0.518                                   | 0.406            | 1020.211               | 1020.211             | 4.436                   | 4.436  | 170.03                  | 170.03               |
|                     | 1.5                       | 0.63                                    | 0.493            | 1181.25                | 1181.25              | 4.33                    | 4.33   | 196.87                  | 196.87               |
|                     | 2.0                       | 0.8                                     | 0.626            | 1386.67                | 1386.67              | 4.163                   | 4.163  | 231.11                  | 231.11               |
| 16 x 16             | 0.8                       | 0.49                                    | 0.39             | 1878.15                | 1878.15              | 6.17                    | 6.17   | 237.76                  | 234.76               |
|                     | 1.0                       | 0.61                                    | 0.48             | 2260.00                | 2260.00              | 6.09                    | 6.09   | 282.50                  | 282.50               |
|                     | 1.2                       | 0.72                                    | 0.57             | 2610.00                | 2610.00              | 6.02                    | 6.02   | 326.30                  | 326.30               |
|                     | 1.5                       | 0.89                                    | 0.70             | 3081.00                | 3081.00              | 5.87                    | 5.87   | 385.00                  | 385.00               |
| 20 x 20             | 0.8                       | 0.63                                    | 0.50             | 3781.00                | 3781.00              | 7.73                    | 7.73   | 378.00                  | 378.00               |
|                     | 1.0                       | 0.79                                    | 0.62             | 4585.00                | 4585.00              | 7.60                    | 7.60   | 458.50                  | 458.50               |
|                     | 1.2                       | 0.93                                    | 0.73             | 5337.00                | 5337.00              | 7.55                    | 7.55   | 533.70                  | 533.70               |
|                     | 1.5                       | 1.16                                    | 0.91             | 6373.00                | 6373.00              | 7.40                    | 7.40   | 637.00                  | 637.00               |
| 25 x 25             | 2.0                       | 1.50                                    | 1.18             | 7872.00                | 7872.00              | 7.20                    | 7.20   | 787.00                  | 787.00               |
|                     | 0.8                       | 0.80                                    | 0.63             | 7567.00                | 7567.00              | 9.67                    | 9.67   | 605.00                  | 605.00               |
|                     | 1.0                       | 1.00                                    | 0.79             | 9232.00                | 9232.00              | 9.58                    | 9.58   | 738.50                  | 738.50               |
|                     | 1.2                       | 1.14                                    | 0.94             | 10812.00               | 10812.00             | 9.49                    | 9.49   | 865.00                  | 865.00               |
|                     | 1.5                       | 1.41                                    | 1.11             | 13031.00               | 13031.00             | 9.34                    | 9.34   | 1042.00                 | 1042.00              |
| 30 x 30             | 2.0                       | 1.84                                    | 1.44             | 16345.00               | 16345.00             | 9.10                    | 9.10   | 1307.60                 | 1307.60              |
|                     | 1.0                       | 1.19                                    | 0.94             | 16278.60               | 16278.60             | 11.67                   | 11.67  | 1085.00                 | 1085.00              |
|                     | 1.2                       | 1.42                                    | 1.12             | 19143.00               | 19143.00             | 11.57                   | 11.57  | 1276.23                 | 1276.30              |
|                     | 1.5                       | 1.77                                    | 1.39             | 23213.00               | 23213.00             | 11.45                   | 11.45  | 1547.00                 | 1547.00              |
| 40 x 40             | 2.0                       | 2.32                                    | 1.82             | 29419.00               | 29419.00             | 11.20                   | 11.20  | 1961.00                 | 1961.00              |
|                     | 1.0                       | 1.51                                    | 1.19             | 39572.00               | 39572.00             | 16.18                   | 16.18  | 1978.60                 | 1978.60              |
|                     | 1.2                       | 1.80                                    | 1.45             | 46773.50               | 46773.50             | 16.09                   | 16.09  | 2338.70                 | 2338.70              |
|                     | 1.5                       | 2.23                                    | 1.75             | 57153.00               | 57153.00             | 16.00                   | 16.00  | 2857.70                 | 2857.70              |
| 50 x 50             | 2.0                       | 2.92                                    | 2.29             | 73365.00               | 73365.00             | 15.90                   | 15.90  | 3668.00                 | 3668.00              |
|                     | 3.0                       | 4.44                                    | 3.41             | 96638.00               | 96638.00             | 15.40                   | 15.40  | 4832.00                 | 4832.00              |
|                     | 1.2                       | 2.35                                    | 1.85             | 93027.60               | 93027.60             | 22.70                   | 22.70  | 3721.00                 | 3721.00              |
|                     | 1.5                       | 2.93                                    | 2.30             | 114193.00              | 114193.00            | 19.9                    | 19.70  | 4568.00                 | 4568.00              |
| 60 x 60             | 2.0                       | 3.83                                    | 3.01             | 147712.00              | 147712.00            | 19.64                   | 19.64  | 5908.50                 | 5908.50              |
|                     | 3.0                       | 5.74                                    | 4.51             | 208492.00              | 208492.00            | 19.05                   | 19.05  | 8339.68                 | 8339.68              |
|                     | 2.0                       | 4.64                                    | 3.64             | 260458.70              | 260458.70            | 23.69                   | 23.69  | 8682.00                 | 8682.00              |
|                     | 3.0                       | 6.96                                    | 5.44             | 371412.00              | 371412.00            | 23.15                   | 23.15  | 12380.00                | 12380.00             |

Figura 54 Specifiche tecniche dei profilati quadri disponibili presso TakaTaka

Gli elementi principali nella composizione chimica dell'acciaio sono:

- Carbonio: 0,2%
- Fosforo: 0,25%

Mentre le proprietà fisiche e meccaniche del materiale, estrapolate dal catalogo fornito, vengono riportate in tabella 6.

| Proprietà   | Acciaio Grade 210      |
|---|------------------------|
| <b>Modulo Elastico E</b>                                  | 210 GPa                |
| <b>Resistenza a trazione <math>R_m</math></b>             | 340 MPa                |
| <b>Snervamento <math>\sigma_s</math></b>                  | 210 MPa                |
| <b>Allungamento a rottura <math>\epsilon_{max}</math></b> | 24%                    |
| <b>Densità <math>\rho</math></b>                          | 7,86 g/cm <sup>3</sup> |

Tabella 6 Proprietà dell'acciaio "Grade 210"

Il materiale dei cerchi e del mozzo delle ruote di bicicletta utilizzate nel trailer è stato ipotizzato essere l'alluminio 6061-T4, mentre per l'asse ed i raggi è stato ipotizzato l'acciaio INOX AISI 304. Questa scelta è giustificata dall'ampio uso di questi materiali nell'industria ciclistica per la realizzazione di ruote (Rinalscta, 2024). In tabella 7 vengono riportate le proprietà dei materiali estratte dal database di *Solidworks*.

| Proprietà   | Alluminio 6061-T4     | Acciaio AISI 304    |
|---|-----------------------|---------------------|
| <b>Modulo Elastico E</b>                                  | 69 GPa                | 190 GPa             |
| <b>Resistenza a trazione <math>R_m</math></b>             | 240 MPa               | 517 MPa             |
| <b>Snervamento <math>\sigma_s</math></b>                  | 227 MPa               | 207 MPa             |
| <b>Allungamento a rottura <math>\epsilon_{max}</math></b> | 21%                   | 24%                 |
| <b>Densità <math>\rho</math></b>                          | 2,7 g/cm <sup>3</sup> | 8 g/cm <sup>3</sup> |

Tabella 7 Proprietà dell'alluminio 6061-T4 e dell'acciaio AISI 304

#### 4.1.1 Proprietà meccaniche e di fatica del copertone di camion

Come descritto nel paragrafo 3.4, come giunto tra il braccio di traino e la bicicletta si è scelto di utilizzare un pezzo di copertone di scarto di un camion, materiale ampiamente reperibile localmente in modo gratuito, essendo destinato alla discarica. Tuttavia, questo materiale non garantisce la stessa durata dei sistemi di aggancio più complessi realizzati in acciaio, perciò è stato necessario stimare dapprima le proprietà meccaniche del materiale e poi la curva S-N (o di Wöhler) del materiale per eseguire delle simulazioni di vita a fatica del componente. Questi dati sono stati ricavati da due diversi studi.

Il primo studio, condotto da Faizah (2019), ha esaminato le proprietà meccaniche di vari copertoni usati di auto. I valori minimi ottenuti dai test, riportati in tabella 8, sono stati utilizzati come riferimento per avere un margine di sicurezza adeguato.

Sebbene il materiale necessario per le analisi sia quello che compone i copertoni di camion, in mancanza di dati specifici, sono stati considerati accettabili i valori relativi ai copertoni di auto, che, grazie alla simile composizione chimica, forniscono dati comparabili.

| Proprietà   | Copertone usato di auto |
|---|-------------------------|
| <b>Modulo Elastico E</b>                                  | 1,85 MPa                |
| <b>Resistenza a trazione <math>R_m</math></b>             | 10,64 MPa               |
| <b>Durezza Shore A</b>                                    | 57,90                   |
| <b>Allungamento a rottura <math>\epsilon_{max}</math></b> | 238%                    |
| <b>Densità <math>\rho</math></b>                          | 1112 kg/m <sup>3</sup>  |

Tabella 8 Proprietà meccaniche dei copertoni di auto usati

Per analizzare la resistenza a fatica del giunto in gomma, è stato necessario ricorrere a un secondo studio, realizzato da Al-Raheem (2021). Questo studio fornisce una curva S-N (figura 55) che descrive la vita a fatica di un materiale in gomma con proprietà meccaniche diverse rispetto al copertone, caratterizzato da una resistenza a trazione  $R_m$  di 0,55 MPa.

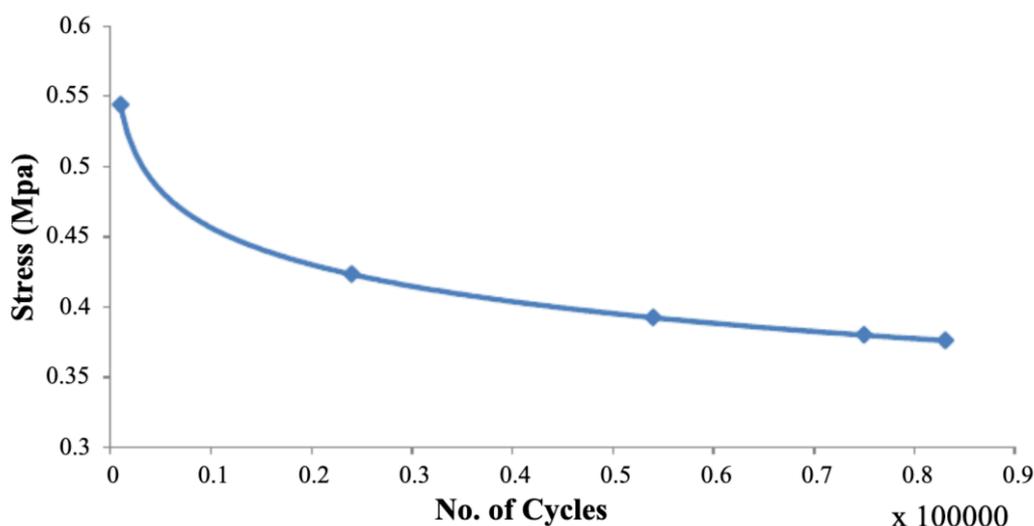


Figura 55 Curva S-N di un componente in gomma (Al-Raheem, 2021)

Nonostante la differente composizione chimica, i dati sulla vita a fatica sono stati ritenuti utili in mancanza di studi sul materiale specifico del giunto. La decisione di utilizzare questi dati è stata considerata accettabile poiché forniscono un valido riferimento iniziale da interpolare per ricavare una curva S-N che rispecchi le proprietà meccaniche del copertone.

Il giunto in gomma ricavato dal copertone di camion, come analizzato da Faizah, presenta una resistenza a trazione significativamente superiore rispetto al materiale studiato da Al-Raheem. Per rendere confrontabili i dati di fatica con le proprietà meccaniche del giunto, è stato calcolato un fattore di scala  $K$ , definito come il rapporto tra la resistenza a trazione del giunto  $R_{m,giunto}$  e quella del materiale utilizzato nella curva S-N  $R_{m,S-N}$  (formula 2):

$$K = \frac{R_{m,giunto}}{R_{m,S-N}} = \frac{10,64 \text{ MPa}}{0,55 \text{ MPa}} = 19,345 \quad (2)$$

Utilizzando questo fattore, i valori di tensione  $\sigma_{S-N}$  del diagramma S-N originale sono stati scalati per ottenere i valori  $\sigma_{S-N,scalato}$  (formula 3):

$$\sigma_{S-N,scalato} = \sigma_{S-N} \times K \quad (3)$$

I valori scalati, riportati nella Tabella 9, consentono di tracciare il diagramma S-N, mostrato in figura 56, che riflette in modo più accurato il comportamento del giunto realizzato con il materiale effettivo, sebbene con la consapevolezza che esistono differenze nelle percentuali della composizione chimica rispetto al materiale originariamente testato.

| N. di cicli (x100000) | Tensioni originali $\sigma_{S-N}$ [MPa] | Tensioni scalate $\sigma_{S-N,scalato}$ [MPa] |
|-----------------------|---|---|
| 0                     | 0,55                                    | 10,64   |
| 0,1                   | 0,47                                    | 9,09  |
| 0,23                  | 0,43                                    | 8,31  |
| 0,53                  | 0,4                                     | 7,73  |
| 0,75                  | 0,38                                    | 7,35  |
| 0,84                  | 0,37                                    | 7,15  |

Tabella 9 Valori delle tensioni nella curva S-N per il copertone esaurito di camion

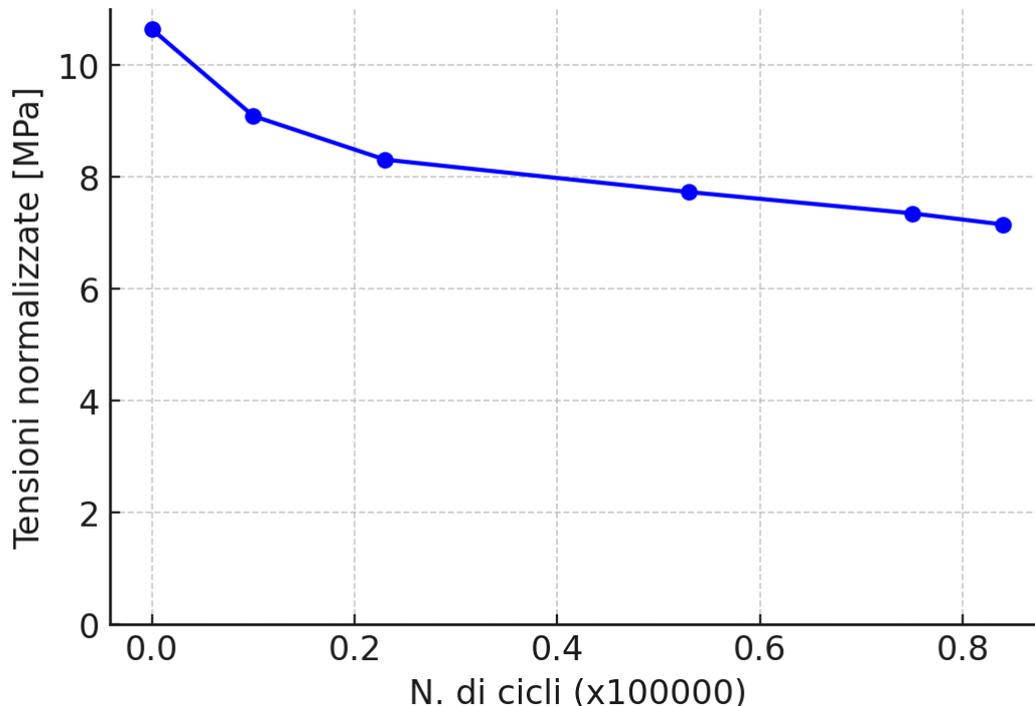


Figura 56 Curva S-N del copertone di camion esaurito

Sebbene i dati utilizzati derivino da studi su materiali parzialmente differenti, l'approccio adottato consente di prevedere, anche se in modo approssimativo, il comportamento a fatica del giunto con proprietà del materiale più realistiche, fornendo una stima migliore della sua durata sotto carichi ciclici.

## 4.2 Progettazione del carrello

In questo paragrafo viene descritto il processo di sviluppo del prodotto, partendo dal concept iniziale fino all'elaborazione del sistema definitivo, completo di analisi FEM. Nei successivi paragrafi vengono presentati i passaggi che hanno portato all'elaborazione del prodotto finale, incluse le modifiche apportate in risposta ai vincoli progettuali e alle necessità emerse durante lo sviluppo.

Per chiarire l'esposizione dei passaggi descritti nei paragrafi successivi vengono riportate di seguito le schematizzazioni del dispositivo nel suo complesso e delle viste in dettaglio del meccanismo di traino e del supporto del frullatore. Il meccanismo di trasmissione del moto rotatorio al frullatore è stato presentato nel Capitolo 2 e la sua schematizzazione è visibile in figura 24, mentre le modifiche apportate per integrarlo nel carrello cargo e non sulla bicicletta, come richiesto dai vincoli progettuali, vengono descritte approfonditamente nel paragrafo 4.4.

In figura 57 viene riportata un'illustrazione schematica, sia in vista laterale che in vista assonometrica, dell'assieme carrello cargo e bicicletta. Qui sono visibili, all'interno del complessivo, il piano d'appoggio del frullatore realizzato sul carrello, e il braccio di traino collegato alla bicicletta mediante il copertone di camion.

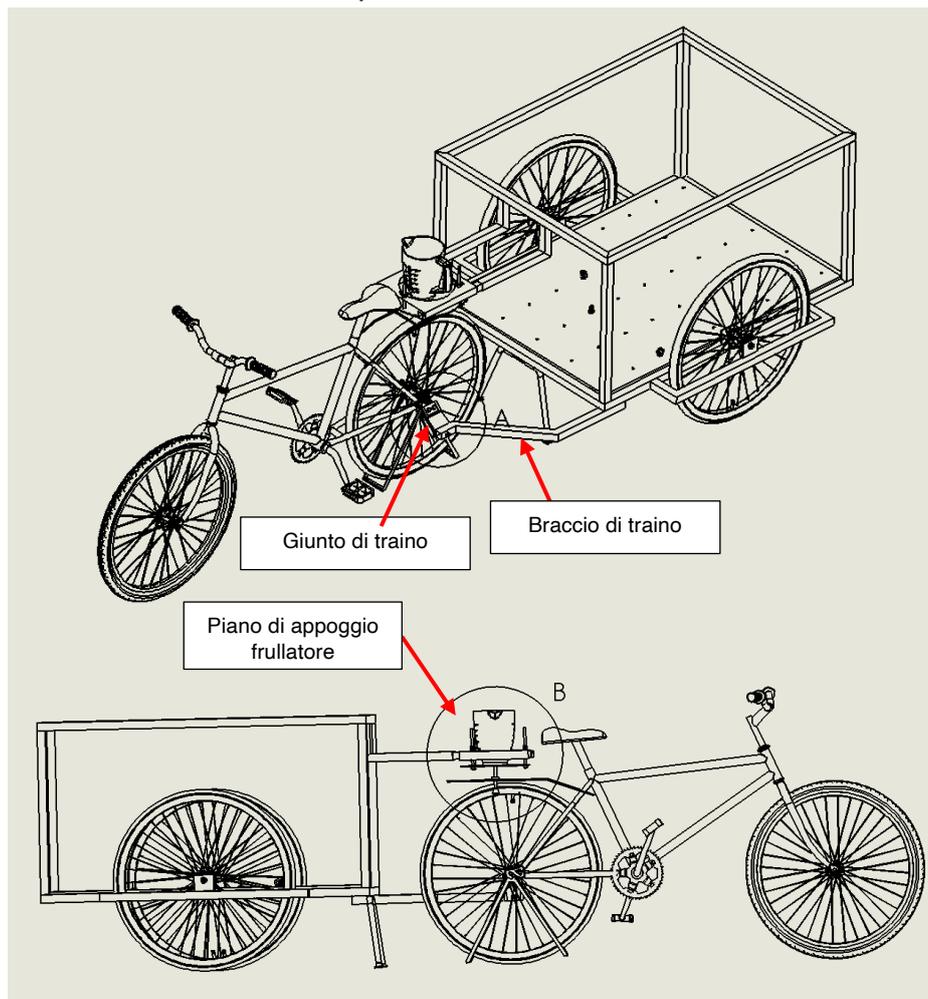


Figura 57 Schema di funzionamento del carrello cargo

In figura 58 vengono presentate le viste in dettaglio A e B, estrapolate da figura 57, del giunto di collegamento tra la bicicletta ed il carrello, ed anche del frullatore, fissato al piano realizzato sul trailer, e relativo sistema di trasmissione.

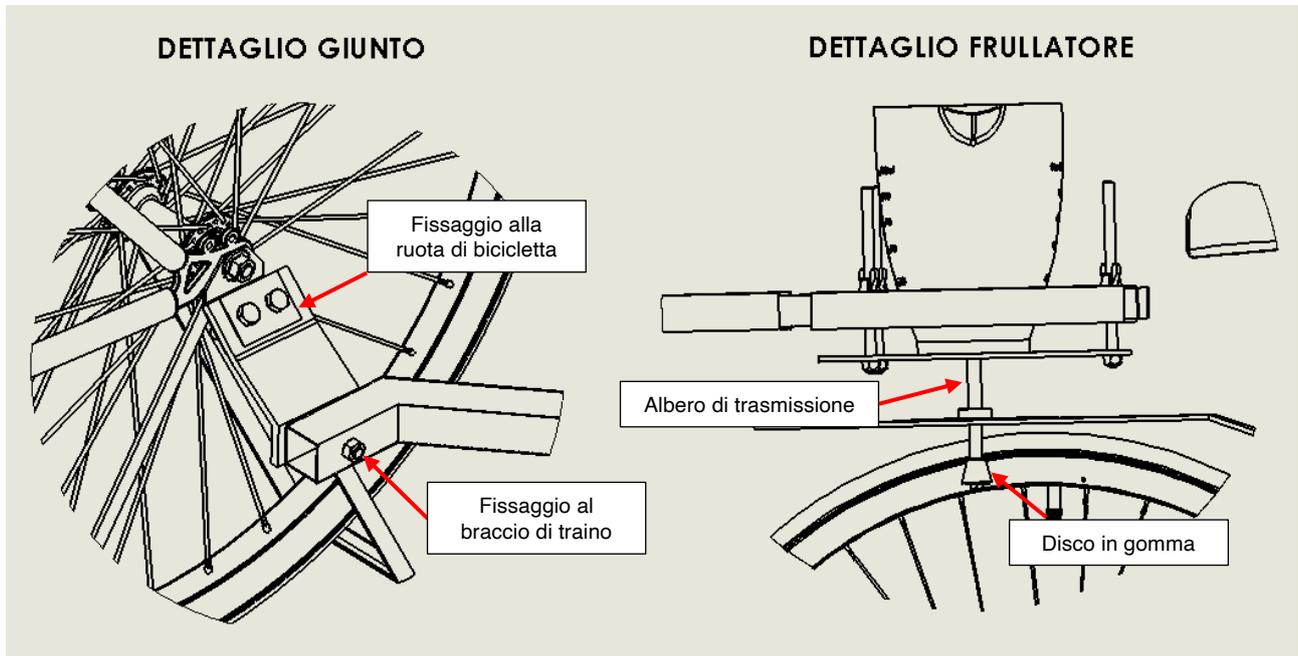


Figura 58 Vista in dettaglio dei componenti del carrello

### 4.2.1 Concept iniziale

Inizialmente si sono modellate le ruote di bicicletta da 26 pollici, essenziali per la stima degli ingombri del mezzo. Le dimensioni di questo componente sono state utilizzate per determinare le misure delle staffe di supporto delle ruote sul trailer e gli angoli del braccio di traino per garantire un corretto aggancio ed una distanza ottimale dalla ruota motrice della bicicletta.

La ruota modellata per il trailer ha un diametro di 26 pollici (660 mm) ed una larghezza del battistrada di 35 mm. Queste dimensioni rappresentano uno standard comune per ruote di bicicletta e sono facilmente reperibili in Uganda, permettendo ai costruttori locali di non dover iterare le dimensioni del trailer, e facilitando così il processo produttivo e la sostituzione degli pneumatici. In figura 59 viene mostrato il modello CAD della ruota appena descritta.



*Figura 59 modello CAD della ruota da 26" utilizzata nel trailer*

Realizzato il modello CAD della ruota, si è passati alla progettazione del trailer vero e proprio. Per questa prima iterazione non si è tenuto conto dei vincoli di peso del trailer e dei costi, ma solamente degli ingombri e, quindi, del volume trasportabile dal mezzo. Sono state dapprima definite le dimensioni del carrello in base ai vincoli progettuali riportati di seguito:

- Lunghezza massima = 1,2 m;
- Larghezza massima = 1m;
- Volume dei rifiuti in plastica  $\approx 1 \text{ m}^3$ ;
- Volume del carico per uso  $3 \leq 0,7 \text{ m}^3$ ;

La base del mezzo è stata quindi realizzata di lunghezza 1,2 m e di larghezza 0,9 m per rientrare nei vincoli anche considerando gli ingombri dati dai supporti delle ruote (figura 60); le dimensioni scelte per i profilati della base, sono le stesse utilizzate da Takataka per realizzare il prototipo 1, ovvero profilati quadri con sezione 50x50 mm e spessore 2 mm, utilizzati sia per il perimetro sia per i rinforzi interni.

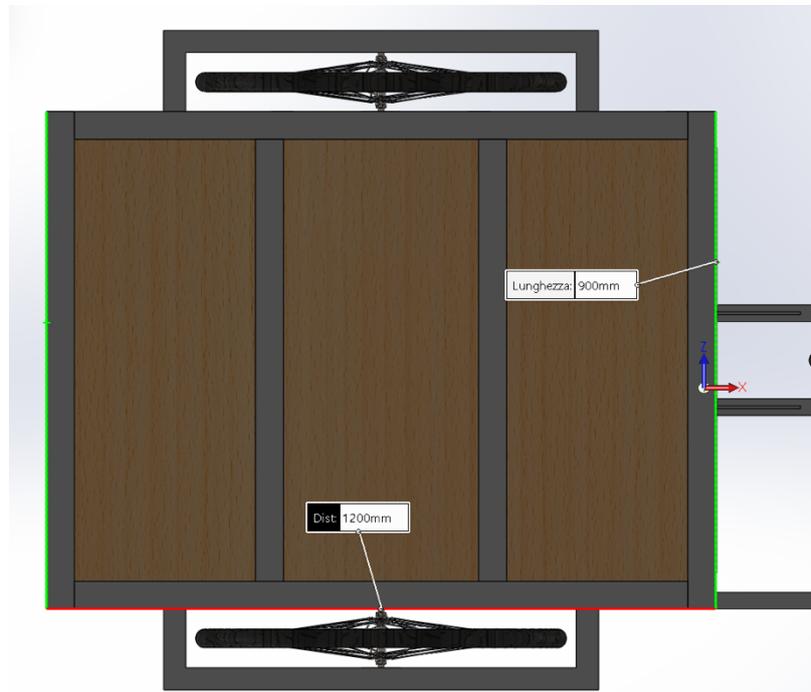


Figura 60 dimensionamento della base del trailer

Nella prima fase del progetto, una problematica fondamentale che è stata risolta riguarda l'elevata altezza da terra del baricentro del mezzo, causata dall'utilizzo obbligato di ruote da 26" (660 mm) al posto delle più comuni ruote da 20" o 24" utilizzate solitamente nei carrelli commerciali. L'elevato centro di massa, unito al cospicuo carico da trasportare, poteva generare problemi di instabilità, quali un incremento del rischio di ribaltamento ed una maggiore difficoltà di controllo del mezzo su terreni impervi. Per mitigare tali criticità, sono state implementate due soluzioni distinte: la prima ha riguardato il posizionamento delle staffe di collegamento dell'asse delle ruote, adottata successivamente in tutte le revisioni; la seconda ha interessato la realizzazione di una ringhiera con meccanismo telescopico, finalizzata a ridurre l'altezza del baricentro in caso di trasporto di carichi meno voluminosi.

La prima soluzione, mostrata in figura 61, che consiste nel posizionare i fori di fissaggio della ruota ad un'altezza maggiore rispetto a quella del pianale di appoggio, ha permesso di ridurre l'altezza da terra di 40 mm. Questa soluzione è l'opposto di quella adottata da TakaTaka Plastics nella realizzazione del prototipo 2 e visibile in figura 53.

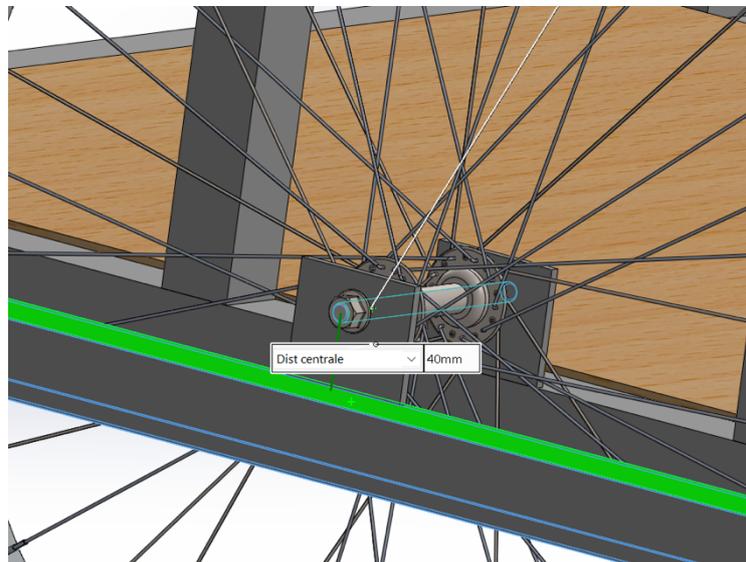


Figura 61 Soluzione adottata per abbassare l'altezza da terra del baricentro

La seconda soluzione, mostrata in figura 62, ha riguardato la progettazione di una ringhiera con braccio telescopico. Questa struttura è composta da bracci verticali che possono scorrere l'uno all'interno dell'altro, permettendo di regolare l'altezza complessiva della ringhiera su varie posizioni fissandoli tramite dei perni. Quando si trasportano carichi meno voluminosi, i bracci possono essere retratti, riducendo così l'altezza del baricentro del veicolo. I profilati utilizzati per la base fissa hanno sezione di dimensione 40x40 mm e spessore 2 mm, mentre i profilati estraibili hanno dimensioni 30x30 e spessore 1 mm. L'altezza massima, con il profilato interno estratto nella sua posizione massima, era di 1 metro, portando così il volume di carico complessivo a circa 1 m<sup>3</sup>, mentre l'altezza minima si fermava a 0,6 m, riducendo di molto il volume di carico ma anche l'altezza del baricentro.

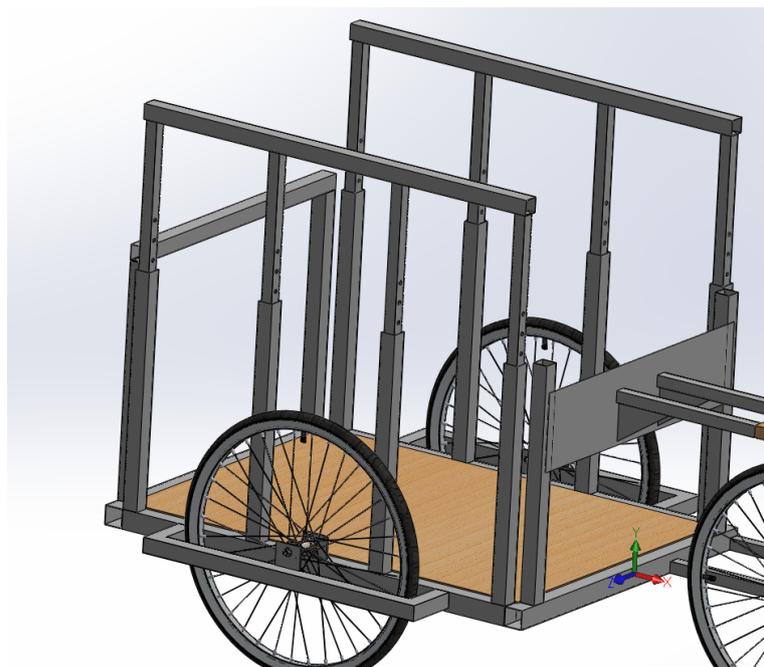


Figura 62 Ringhiera telescopica nella posizione di massima altezza

Il passaggio successivo ha riguardato la progettazione del braccio di traino, utilizzando profilati 30x30 mm di spessore 2 mm. Per modellarlo, è stata dapprima fissata la distanza longitudinale tra il trailer e la ruota posteriore della bicicletta, stimata in 500 mm, misurati dall'estremità anteriore del trailer fino all'asse centrale della ruota. Successivamente, si è proceduto per iterazioni fino a trovare la corretta lunghezza e angolazione del braccio in relazione alla staffa montata sulla ruota. In figura 63 e 64 vengono riportati i disegni tecnici con le misure ottenute per la staffa di fissaggio del copertone posizionata sulla ruota e per il braccio di traino.

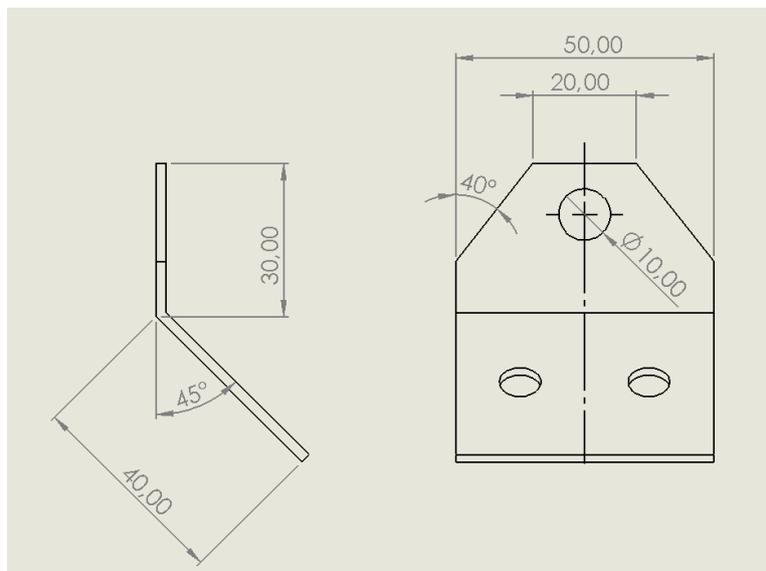


Figura 63 Dimensioni della staffa di fissaggio alla ruota

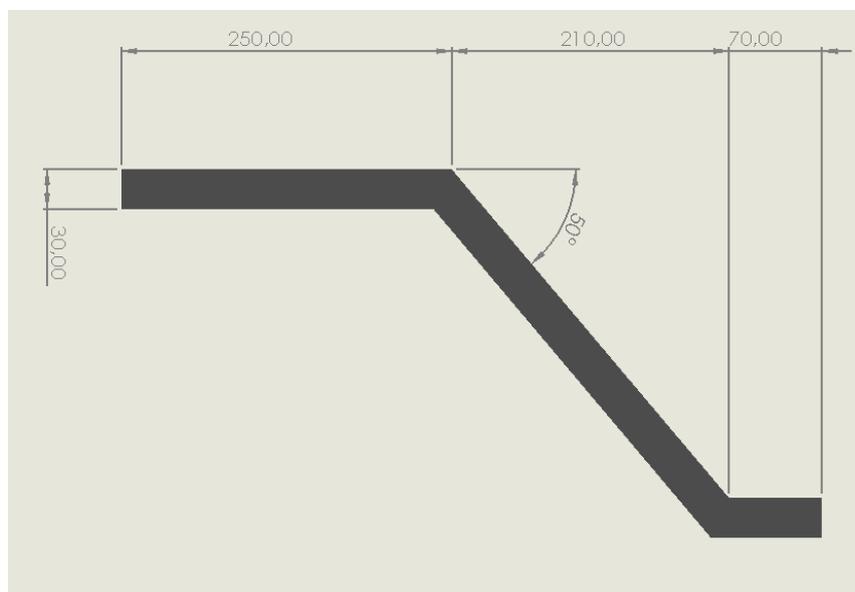


Figura 64 Dimensioni del braccio di traino

L'ultima fase di progettazione di questa prima iterazione ha riguardato il supporto per il frullatore. Il supporto, mostrato in figura 65, è stato progettato come una piastra di dimensioni 770x200 mm e 2 mm di spessore, saldata alle due ringhiere laterali del telaio. A questa piastra sono stati poi uniti i due bracci di supporto su cui viene fissato tramite perni il piano di appoggio, realizzati con profilati di dimensioni 30x30 mm, spessore di 1,2 mm e lunghezza 600 mm.

Per ridurre la deflessione dovuta al peso del meccanismo di attuazione del frullatore e alle sollecitazioni durante l'uso, i bracci sono stati rinforzati tramite supporti triangolari saldati nella parte inferiore.

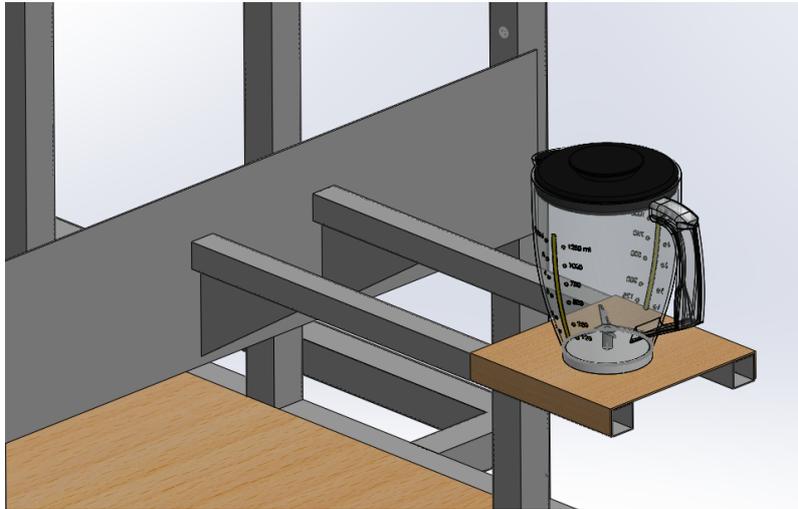


Figura 65 modello CAD del supporto per il frullatore

Tuttavia, questa soluzione ha presentato alcune criticità. In primo luogo, la piastra di grandi dimensioni ha un peso considerevole, che contribuisce ad aumentare il peso complessivo del trailer e non è facilmente reperibile come i profilati standard. In secondo luogo, la lunghezza dei bracci (600 mm) costituisce un rischio significativo in caso di frenate brusche, poiché essendo fissi sopra la ruota posteriore della bicicletta, potrebbero rappresentare un pericolo per il ciclista, con il rischio di lesioni se la frenata non viene gestita correttamente. Questi aspetti sono stati considerati durante le successive revisioni del progetto.

La struttura del trailer, il cui modello CAD è mostrato in figura 66, ha un peso di 45,58 kg, più del doppio rispetto al limite massimo di 20 kg. Nelle successive iterazioni si è cercato di trovare soluzioni per portare il peso della struttura entro i range stabiliti dai vincoli.

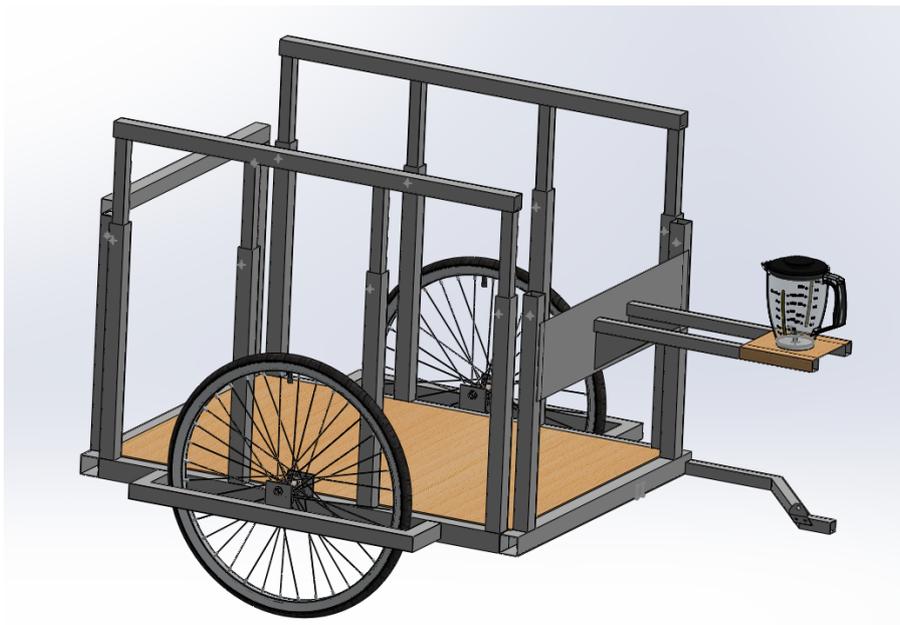


Figura 66 Struttura del trailer cargo: prima iterazione

Per ridurre il peso complessivo del trailer, la prima soluzione testata è stata la rimozione delle ringhiere telescopiche, sostituendole con profilati fissi di altezza leggermente

aumentata, fino a 0,7 m. Questa scelta ha comportato la rinuncia alla possibilità di adattare l'altezza del box in base al tipo di carico, ma è stata motivata anche dalle problematiche riscontrate con le dimensioni dei profilati telescopici. Questi, infatti, presentavano un gioco eccessivo tra la parte fissa e quella estensibile, il che, nonostante l'uso di perni di fissaggio, comportava rischi significativi durante il movimento, come possibili oscillazioni o danni strutturali. L'eliminazione delle ringhiere telescopiche ha permesso di risparmiare 4 kg, portando il peso totale del trailer a 41,02 kg.

Per identificare ulteriori possibilità di riduzione del peso, è stata condotta un'analisi agli elementi finiti (FEM) sul modello del trailer, evidenziando le aree meno sollecitate. Questo ha permesso di identificare i componenti che potevano essere alleggeriti o rimossi senza compromettere l'integrità strutturale.

#### 4.2.2 Analisi FEM: simulazione di partenza in salita

Per eseguire le analisi FEM, il modello del trailer è stato inizialmente semplificato. Questa fase di semplificazione è fondamentale per ridurre il numero di elementi e il tempo di calcolo, concentrandosi solo sulle aree di interesse. Sono stati rimossi elementi come raccordi, fori non necessari, e dettagli complessi come ruota e frullatore. La ruota, in particolare, è stata semplificata in quanto la distribuzione delle tensioni su di essa non è di interesse per il progetto in quanto non si ha possibilità di modifica, ma risulta necessaria nelle analisi per l'applicazione dei vincoli. In figura 67 viene mostrata la semplificazione effettuata sul modello della ruota.



*Figura 67 Modello CAD della ruota semplificato per analisi FEM*

Una volta semplificato il modello, sono state impostate le condizioni al contorno necessarie per simulare il comportamento del trailer in condizioni operative. Il caso considerato per l'analisi è stato la partenza in salita del trailer, un momento critico in cui le sollecitazioni possono essere particolarmente elevate. I carichi e vincoli applicati vengono descritti di seguito:

- **Forza sul braccio di traino:** è stata applicata una forza tangenziale al braccio di traino, lungo la superficie di fissaggio del copertone. Questa rappresenta la forza necessaria per mettere in moto il carrello su una salita inclinata di  $20^\circ$ , ed è composta dalla componente tangenziale della forza peso e dalla forza di attrito volvente tra le ruote e l'asfalto. La forza è stata calcolata utilizzando la formula 4:

$$F_{traino} = F_{peso //} + F_{attrito\ volvente} \quad (4)$$

$$F_{peso //} = F_{peso} \cdot \sin 20^\circ \quad (5)$$

$$F_{attrito\ volvente} = \mu_v \cdot F_{peso} \cdot \cos 20^\circ \quad (6)$$

dove:

- $\mu_v$  è il coefficiente di attrito volvente tra gomma e asfalto in cattive condizioni. Il valore utilizzato è di 0,023.
- $F_{peso}$  è la forza peso totale del mezzo, composta dal peso del trailer (41 kg) più il peso del carico trasportato (150 kg), maggiorato per considerare eventuali sovraccarichi. La forza è stata calcolata utilizzando la formula 7:

$$F_{peso} = m \cdot g = (41 + 150\text{ kg}) \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 1873,71\text{ N} \quad (7)$$

Pertanto, ne segue un valore della forza di traino pari a (formula 8):

$$F_{traino} = 0,023 \cdot 1873,71\text{ N} \cdot \cos 20^\circ + 1873,71\text{ N} \cdot \sin 20^\circ = 681,34\text{ N} \quad (8)$$

- **Massa sul piano di carico:** È stata applicata una massa distribuita di 150 kg sul pianale di carico. Questo valore è stato maggiorato rispetto al carico di 100 kg ricavato dai vincoli per assicurare un maggior grado di sicurezza nei test, considerando eventuali sovraccarichi.
- **Massa sul piano del frullatore:** Una massa remota di 10 kg, maggiorata rispetto al peso reale, è stata applicata sul pianale di appoggio del frullatore, per simulare la presenza del frullatore stesso e del sistema di trasmissione.
- **Vincoli sulle ruote:** Sono stati impostati vincoli di incastro sulle ruote per limitare le traslazioni in tutte le direzioni, simulando una condizione statica del mezzo. Inoltre, è stata applicata la forza di gravità per considerare il peso totale del sistema.

Questi carichi e vincoli hanno permesso di simulare una delle condizioni operative più critiche del trailer, fornendo una base solida per valutare la distribuzione delle tensioni e identificare punti deboli nella struttura e zone che potevano essere alleggerite.

I risultati dell'analisi FEM vengono mostrati in figura 68 e 69.

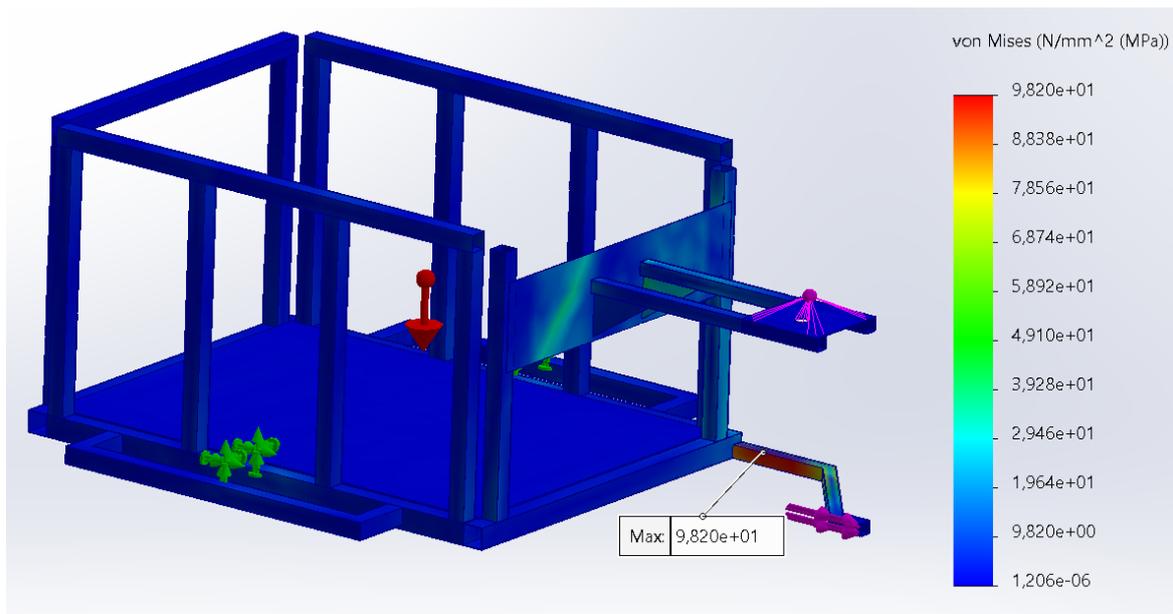


Figura 68 Distribuzione delle sollecitazioni di Von Mises sul trailer: concept iniziale

Come si può notare dalla figura 68, la zona più sollecitata è risultata il braccio di traino e, in maniera inferiore, la struttura di supporto per il frullatore. Le tensioni risultano essere sotto il valore di snervamento del materiale, con un coefficiente di sicurezza minimo di 2,14 nella zona del braccio di traino, suggerendo la possibilità agire di una riduzione di peso sulla struttura, con particolare attenzione al braccio.

Tuttavia, i valori di sollecitazione sul braccio devono essere rapportati al peso della struttura, in quanto per il calcolo della forza  $F_{traino}$  in questa analisi si è utilizzato il peso di 41 kg, mentre per pesi minori ci si aspetta una riduzione delle tensioni.

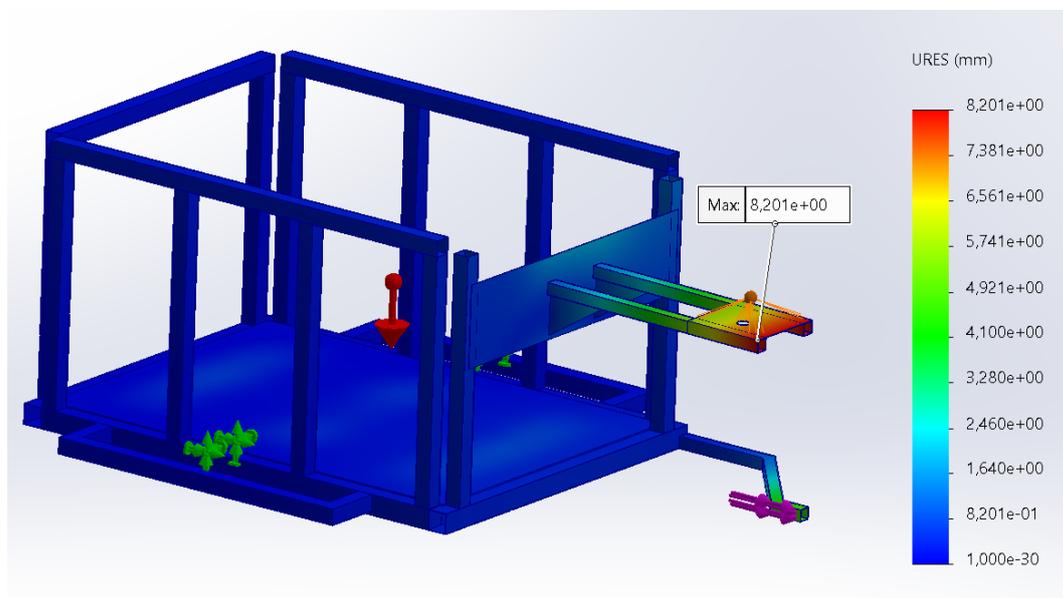


Figura 69 Distribuzione degli spostamenti della struttura: concept iniziale

Per quanto riguarda gli spostamenti (figura 69), le zone più critiche risultano essere anche in questo caso il braccio, con una deflessione di circa 5 mm, ed il piano di appoggio del frullatore, il quale subisce una deflessione di circa 8,2 mm. Questo risultato, insieme alle criticità presentate sopra, hanno portato ad una totale riprogettazione del supporto nelle successive iterazioni.

### 4.2.3 Revisioni del concept

A seguito delle analisi FEM, sono state apportate diverse modifiche al progetto per ridurre il peso del trailer da 41,05 kg a circa 20 kg, come richiesto dai vincoli di progetto. La prima decisione è stata quella di mantenere gli ingombri del modello precedente (lunghezza 1,2 m, larghezza 0,9 m, altezza 0,7 m), poiché queste dimensioni, pur non rientrando completamente nel vincolo di volume di 1 m<sup>3</sup> per il trasporto della plastica, si avvicinano a tale limite e soddisfano i requisiti per gli altri due scopi d'uso. Inoltre, mantenendo queste dimensioni, è stato possibile mantenere il baricentro più basso, migliorando così la stabilità del trailer: aumentare l'altezza del trailer, unico parametro su cui sarebbe stato possibile intervenire per incrementare il volume, avrebbe infatti comportato un aumento dell'altezza da terra del centro di massa, rendendo questa soluzione sconveniente in termini di stabilità del mezzo.

Per raggiungere l'obiettivo di peso, nella prima revisione si è intervenuti dapprima sui profilati, uniformando tutte le sezioni con dimensioni di 30x30 e spessore di 1 mm, come visibile in figura 70. Questa scelta non solo ha contribuito significativamente alla riduzione del peso complessivo del trailer, ma ha anche portato ad un discreto risparmio economico ed ambientale: poiché i profilati sono venduti in lunghezze standard di 6 metri, l'adozione di un'unica dimensione per tutti i componenti ha permesso di ottimizzare l'uso dei materiali, minimizzando le operazioni di taglio e gli scarti di materiale.

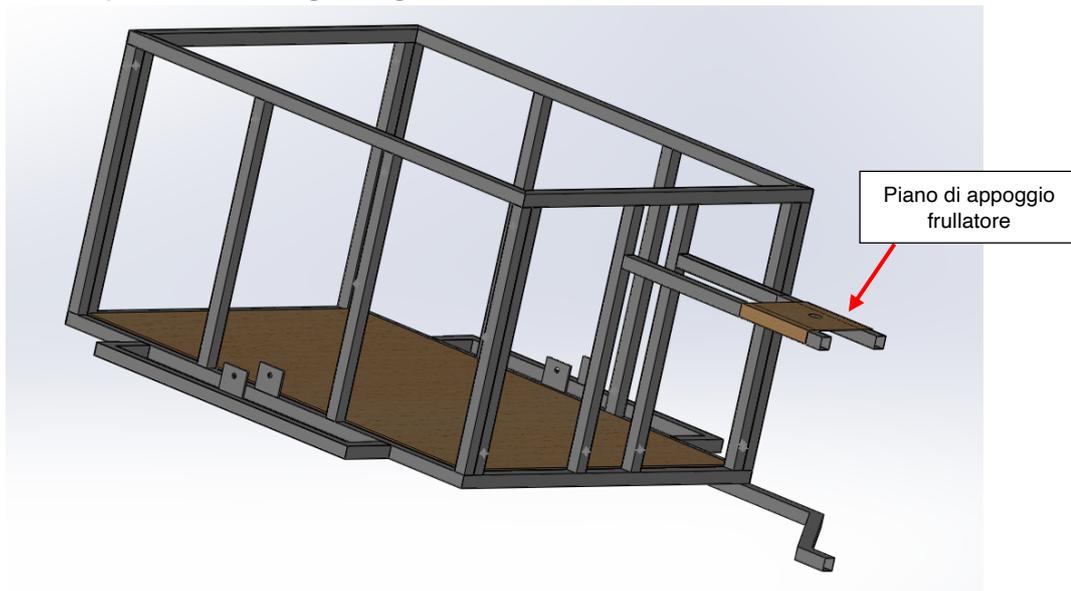


Figura 70 Trailer cargo: prima revisione

In questa revisione si è sostituito anche la piastra di supporto originaria, problematica sotto diversi aspetti come chiarito nel paragrafo precedente, con due ringhiere posizionate in modo da garantire la distanza originale tra i bracci di supporto di 190 mm e l'altezza dalla ruota motrice della bicicletta di 150 mm, riducendo ulteriormente il peso senza compromettere la robustezza della struttura.

L'adozione di profilati 30x30 mm per l'intera struttura ha presentato alcune problematiche, principalmente nel sostegno del pianale inferiore. Nel concept iniziale, il pianale era supportato dai profilati che costituivano la sagoma inferiore, poiché le ringhiere avevano una sezione minore e permettevano l'alloggiamento delle estremità del pianale stesso. Con la nuova configurazione il pianale viene sostenuto solo dai traversi centrali. Per compensare questa mancanza, sono stati inseriti degli angolari e una staffa sul lato corto del trailer, come visibile in figura 71, garantendo così un adeguato sostegno ed evitando la deflessione del pianale.

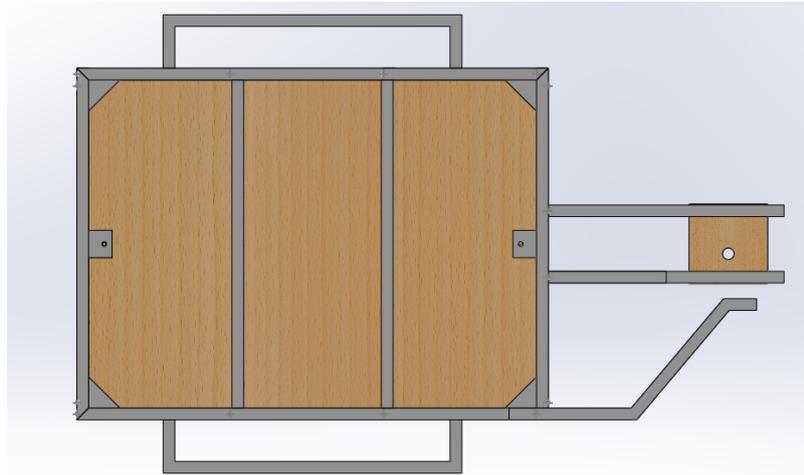


Figura 71 Aggiunta di angolari e staffe per supportare il pianale

Nella seconda revisione, rappresentata in figura 72, sono stati eliminati i profilati interni che componevano le ringhiere, lasciando solo quattro profilati agli angoli della struttura. Questo ha permesso di risparmiare 547 grammi per ogni profilato eliminato, riducendo il peso complessivo di circa 4,5 kg. Tuttavia, la rimozione dei profilati interni ha ridotto la possibilità di fissare tiranti lungo la lunghezza del trailer per fermare il carico durante il trasporto, rendendo necessario trovare soluzioni alternative per bloccare le merci durante il trasporto.

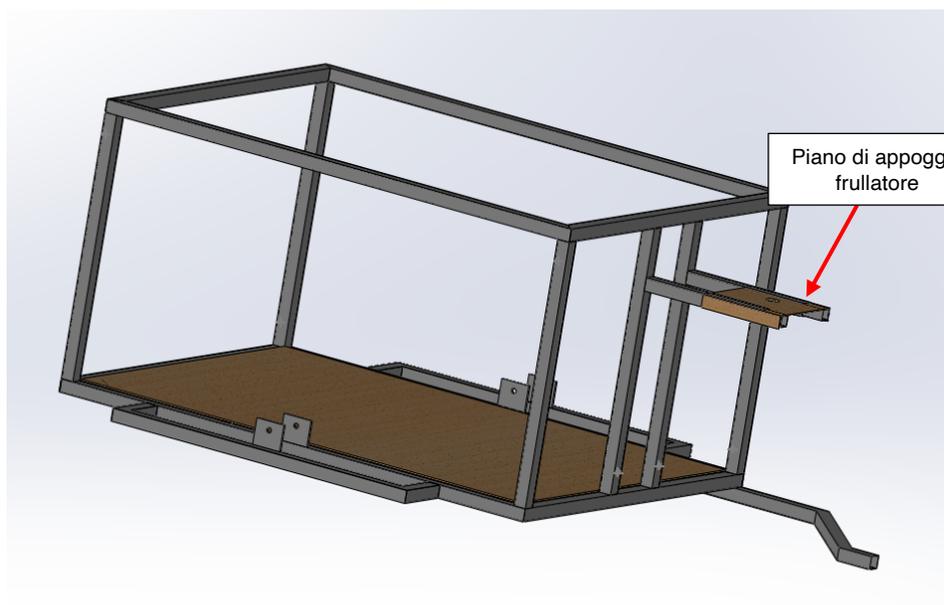


Figura 72 Trailer cargo: seconda revisione

Contestualmente, è stato implementato un sistema telescopico per i profilati di supporto del piano di appoggio del frullatore, analogo a quello utilizzato per le ringhiere del primo

concept. Questo sistema, pensato per evitare che i profilati rappresentino un rischio per il ciclista in caso di frenata brusca, comprende un braccio fisso lungo 300 mm, con sezione 30x30 mm e spessore di 2 mm, e un braccio estraibile lungo 350 mm, con sezione 25x25 mm e spessore di 1 mm. In posizione chiusa, il braccio estraibile fuoriesce di soli 50 mm da quello fisso e viene fissato tramite perni in un foro laterale. In posizione estesa (figura 73), il sistema può raggiungere una lunghezza totale di 600 mm e può essere bloccato in posizioni intermedie tramite fori laterali in cui si inseriscono dei perni. Inoltre, il piano del frullatore può scorrere liberamente su tutto il sistema telescopico e viene fissato nella posizione desiderata tramite gli stessi perni utilizzati per bloccare il braccio mobile, permettendo così un utilizzo adattabile e sicuro del frullatore.

Nella terza revisione, corrispondente alla forma definitiva del telaio, rappresentato in figura 74, le ringhiere di supporto del sistema telescopico sono state sostituite con un profilato più corto saldato solo alla parte superiore del telaio, con lunghezza minima necessaria per garantire una distanza del piano del frullatore dalla ruota della bicicletta di 150 mm. Questa modifica ha ulteriormente ridotto il peso complessivo del trailer, contribuendo a raggiungere il peso target senza compromettere la funzionalità.

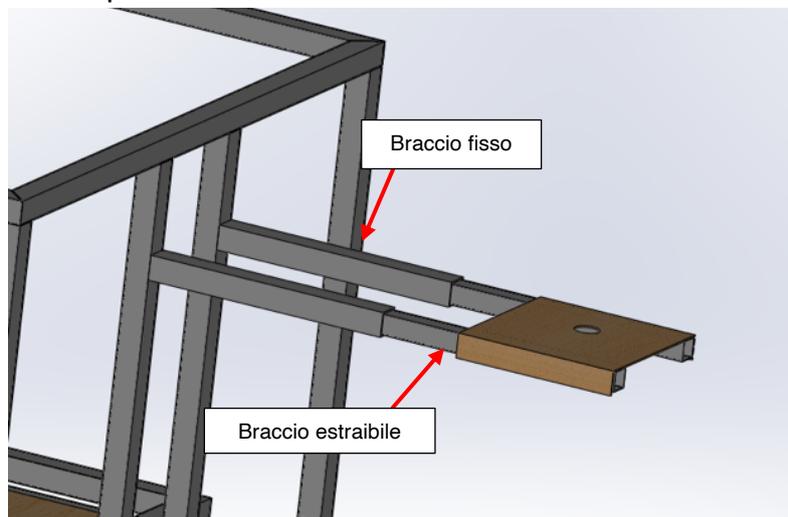


Figura 73 Particolare del piano di supporto del frullatore totalmente esteso

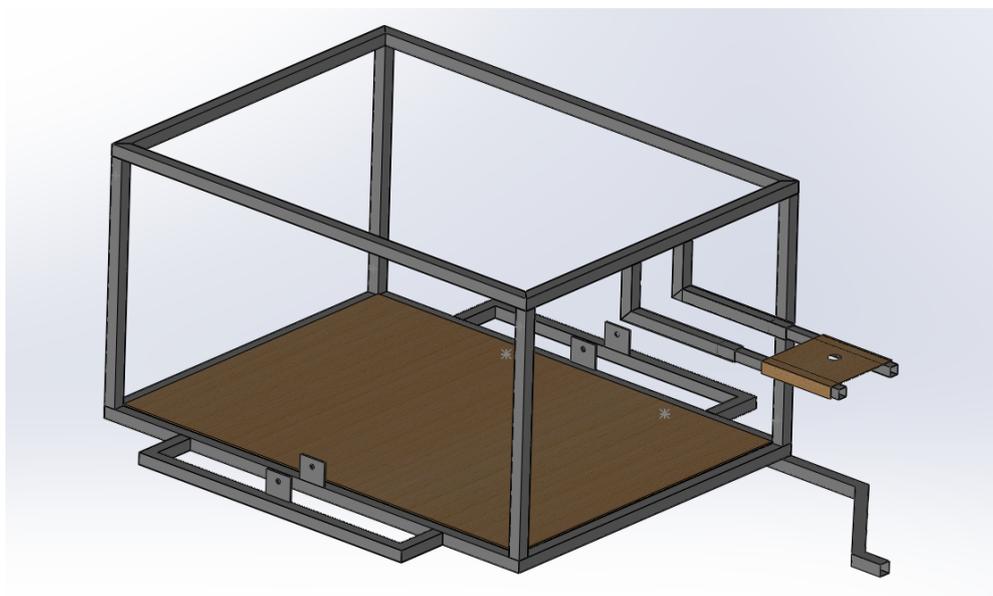


Figura 74 Trailer cargo: terza revisione

Durante la fase di revisione sono state apportate modifiche anche al braccio di traino. Per ridurre la deflessione subita dal braccio durante la fase di partenza, come evidenziato dalle analisi FEM condotte sul primo concept, è stata modificata la zona di attacco sul trailer, aumentando la superficie di saldatura tra il telaio del carrello ed il braccio rispetto alla configurazione iniziale (figura 75). Questa modifica è stata effettuata per permettere una distribuzione più omogenea delle tensioni, riducendo così il rischio di deformazioni e aumentando la rigidità complessiva del braccio.

Questa modifica ha comportato anche una revisione delle dimensioni del braccio di traino rispetto a quelle mostrate in figura 64. Le nuove dimensioni vengono mostrate in figura 76.

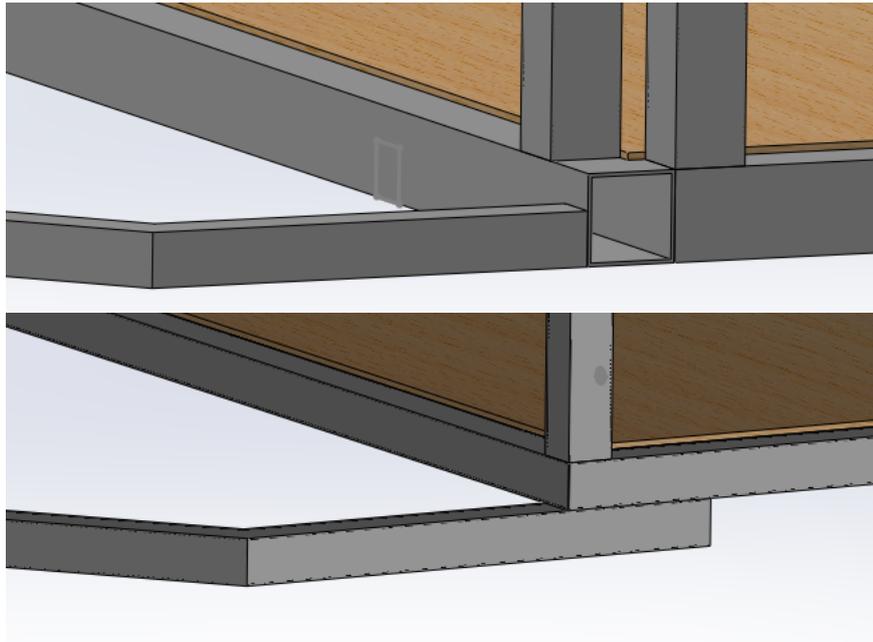


Figura 75 Confronto tra la superficie di saldatura del braccio nel primo concept (in alto) e nell'ultima revisione (in basso)

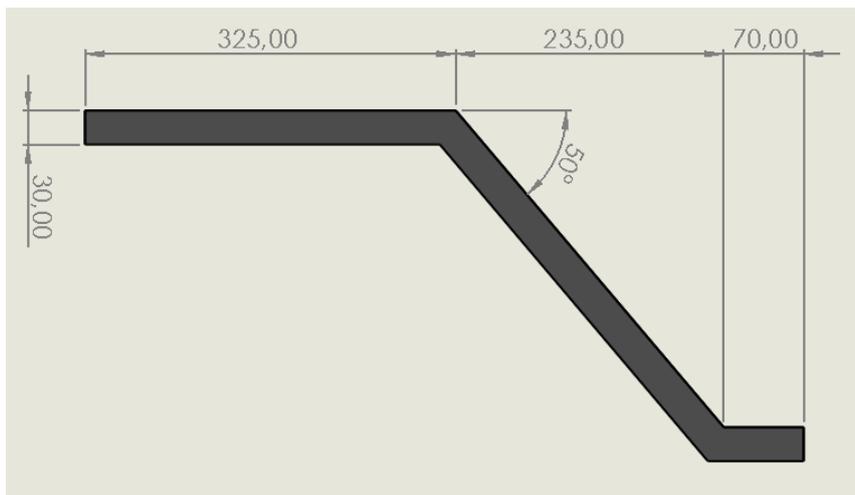


Figura 76 Dimensioni del braccio di traino aggiornate

Il peso complessivo del carrello, ad esclusione delle ruote, è stato ridotto di circa 23 kg, rientrando entro i limiti prestabiliti dai vincoli di progetto. In tabella 10 viene mostrata la massa del sistema e la riduzione percentuale rispetto alla massa del primo concept per le tre revisioni eseguite.

| Revisione | Massa [kg] | Riduzione percentuale |
|-----------|------------|-----------------------|
| 0         | 41,05      | -                     |
| 1         | 22,73      | 44,62%                |
| 2         | 18,11      | 55,88%                |
| 3         | 17,89      | 56,42%                |

Tabella 10 Massa del trailer dopo le revisioni e riduzione percentuale

### 4.3 Analisi FEM: simulazione statica e dinamica del trailer

A seguito del processo iterativo sul modello, sono state condotte ulteriori analisi FEM sul trailer nella sua configurazione finale, con dimensioni, forma e peso aggiornati. Queste analisi sono state effettuate per simulare le condizioni più critiche a cui il trailer potrebbe essere sottoposto durante il suo utilizzo. Le condizioni simulate includono:

- Partenza del trailer da fermo;
- Decelerazione verticale dovuta all'impatto con una buca;
- Vibrazioni sul telaio dovute alla percorrenza di una strada dissestata;
- Simulazione di carichi ciclici sul copertone di camion;

Come per le analisi precedenti, anche in questo caso le ruote ed i particolari sono stati semplificati per facilitare i calcoli. Tuttavia, a differenza delle analisi precedenti, nelle seguenti simulazioni è stata utilizzata una mesh più accurata, per ottenere risultati più precisi. La dimensione minima scelta per gli elementi triangolari è stata di 2 mm, con un totale di 8209 elementi e 17420 nodi.

Infine, i pesi applicati sul pianale di carico e sul piano del frullatore sono analoghi a quelli descritti nel paragrafo 4.2.2, mentre in base alla condizione da simulare si sono modificati i vincoli sulle ruote e le forze applicate.

#### 4.3.1 Analisi statica: partenza in salita del trailer

Questa analisi FEM è stata eseguita simulando le stesse condizioni operative del caso descritto nel paragrafo 4.2.2, quindi applicando gli stessi carichi e vincoli al sistema. L'unica differenza riguarda il valore numerico della forza  $F_{traino}$  applicata al braccio, in quanto la variazione di peso del trailer ha portato ad una nuova stima della forza  $F_{peso}$ , riportata in formula 9:

$$F_{peso} = (17,89 \text{ kg} + 150 \text{ kg}) \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 1647 \text{ N} \quad (9)$$

Pertanto, la forza  $F_{traino}$  in questo caso risulta (formula 10):

$$F_{traino} = 0,023 \cdot 1647 \text{ N} \cdot \cos 20^\circ + 1647 \text{ N} \cdot \sin 20^\circ = 598,9 \text{ N} \quad (10)$$

Il valore, applicato insieme agli altri carichi e vincoli all'interno del software *Solidworks Simulation*, ha fornito i risultati mostrati in figura 77 e 78.

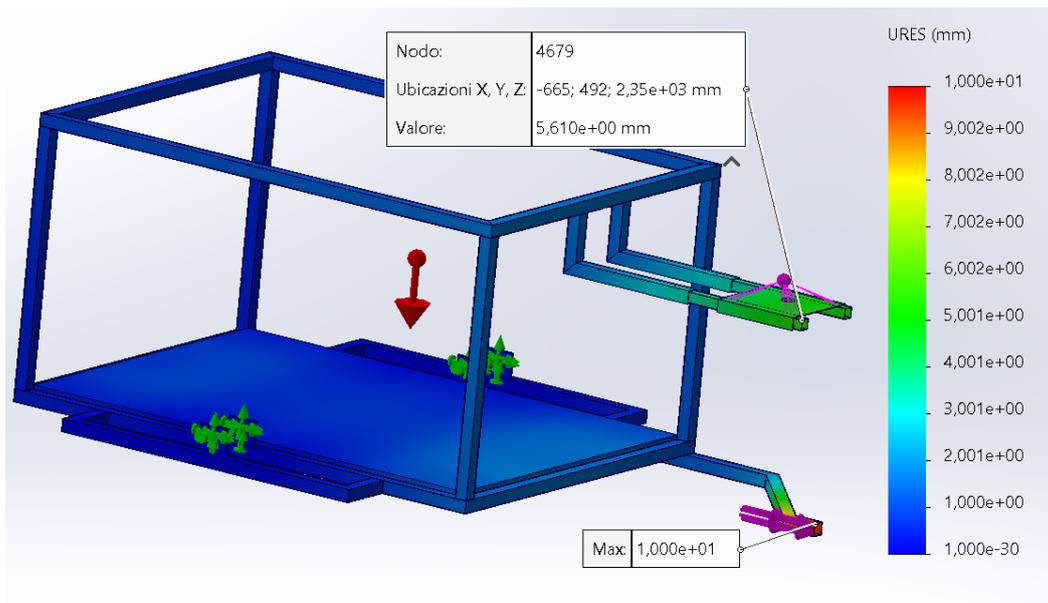


Figura 77 Distribuzione degli spostamenti della struttura: partenza in salita

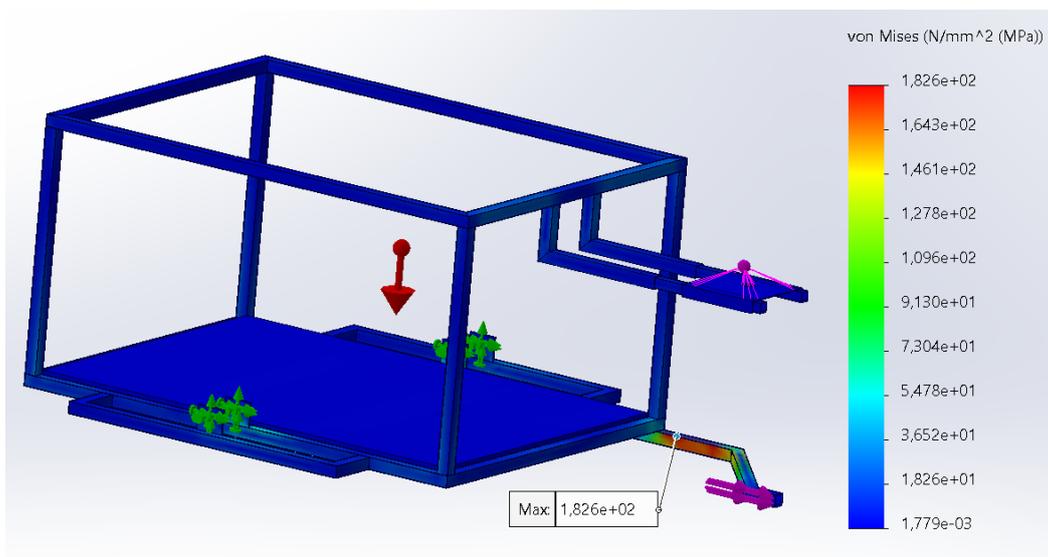


Figura 78 Distribuzione delle sollecitazioni di Von Mises sulla struttura: partenza in salita

A parità di sezione la riduzione di spessore, da 2 ad 1 mm, del braccio di traino, ha provocato una maggiore concentrazione di tensioni sul componente, anche a fronte di una minore forza applicato. Nella zona di maggior concentrazione, le tensioni raggiungono i 182 MPa, valore al di sotto dello snervamento dell'acciaio, ma che comporta un coefficiente di sicurezza CS minimo pari a 1,15. La deflessione del braccio ha subito un incremento rispetto alla prima analisi, passando da un valore di 5 mm ad un valore di 10 mm. Questi risultati, sebbene presentino una situazione più critica rispetto al primo concept, sono stati ritenuti accettabili in quanto la riduzione di spessore ha permesso di rimuovere circa 0,5 kg, a fronte di un picco di tensione più elevato ma concentrato in una zona ridotta della superficie, dove la media delle sollecitazioni risulta pari a 123 MPa. Le modifiche eseguite sul braccio di traino hanno comunque portato l'effetto desiderato, in quanto lo spostamento, considerando la superficie di saldatura del primo concept, con gli attuali carichi avrebbe raggiunto picchi di 18 mm, mentre il valore di 10 mm presentato in figura 77 risulta comunque accettabile considerando la condizione di carico critica simulata.

Per quanto riguarda invece il piano di supporto del frullatore, la revisione ha sortito l'effetto desiderato: in configurazione completamente estesa la deflessione raggiunge picchi di 5,6 mm a fronte di 8,2 mm nella prima analisi, questi considerati accettabili data la massa di 10 kg applicata (maggiorata rispetto alle condizioni operative reali) e le tolleranze del sistema.

Infine, aumentando la qualità della mesh, è stato possibile rilevare piccole deflessioni del pianale di carico, con un massimo 1,8 mm nella zona dove sono presenti i rinforzi angolari: considerando il valore ridotto della deformazione, si è scelto di non apportare ulteriori modifiche.

#### 4.3.2 Analisi statica: simulazione di impatto con una buca

Dato che, nella fase di stima dei vincoli, è stato scelto di considerare il valore più critico per i diversi vincoli operativi dei tre casi d'uso, e che la tipologia di strada più avversa consiste in superfici sterrate o accidentate, la probabilità di colpire buche o dossi naturali è molto elevata. Si è svolto un'analisi FEM per simulare il comportamento del carrello nel caso in cui una sola ruota urti con una buca, con l'obiettivo di verificare la resistenza dello stesso in questo tipo di condizioni. L'implementazione dell'analisi è stata articolata nei seguenti passaggi:

- **Configurazione dell'analisi:** Si è scelto di considerare il momento in cui il trailer urta contro il terreno, utilizzando un'analisi di tipo statico per catturare le sollecitazioni massime dovute alla forza di reazione che il terreno esercita sulla ruota.
- **Vincoli applicati:** È stato imposto un vincolo di geometria fissa alla ruota che non subisce l'urto, mentre la ruota soggetta alla forza di reazione è stata vincolata con uno spostamento verticale di -50 mm per simulare lo sprofondamento in una buca.
- **Forza sul braccio di traino:** Si è ipotizzato una velocità di avanzamento costante del carrello: perciò, la forza applicata sul braccio di traino è stata considerata nulla.
- **Forza di reazione sulla ruota:** Per simulare l'impatto con la buca, è stato considerato un valore critico di accelerazione verticale dovuto allo sprofondamento della ruota all'interno della buca. Per stimare questo valore, non essendo disponibili in letteratura dati riguardo al mezzo di trasporto in analisi, sono stati considerati i valori risultanti da analisi fatte su automobili ed altri mezzi di trasporto. Li (2015) ha stimato, tramite un algoritmo, l'accelerazione verticale di un mezzo, che impatta una buca lunga 250 mm e profonda 50 mm ad una velocità di 48 km/h, in circa 7 m/s (figura 79).

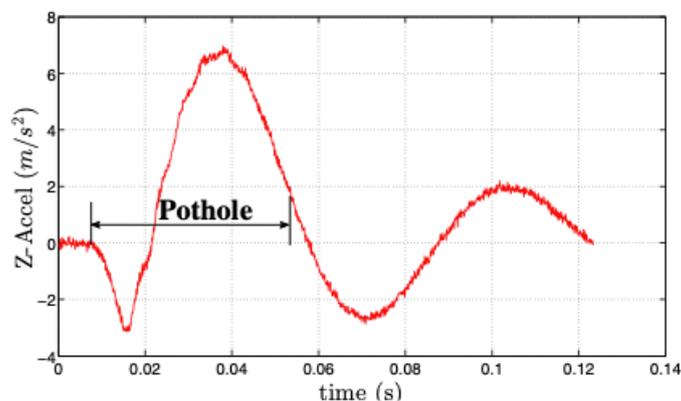


Figura 79 Accelerazione verticale di una ruota che impatta una buca (Li, 2015)

Kennedy (2004) ha analizzato il livello di discomfort percepito dal guidatore di un'auto in relazione a diversi valori di accelerazione verticale del veicolo, ottenendo che il massimo livello di discomfort, pari a 6, si verifica intorno a un'accelerazione di 0,8 g (figura 80).

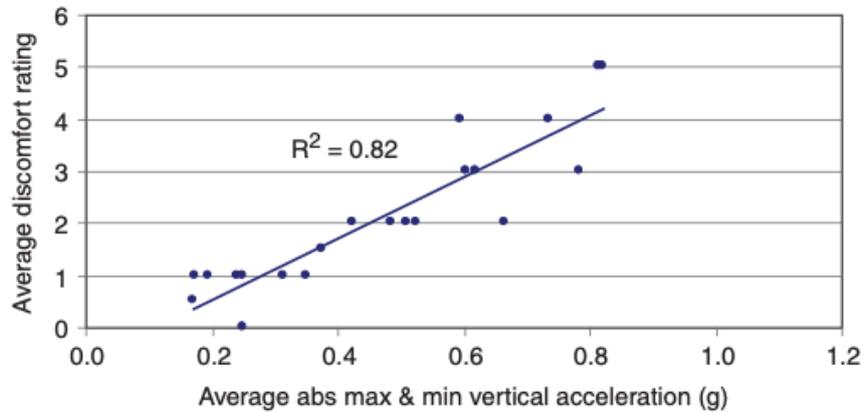


Figura 80 Livelli di discomfort del guidatore in relazione all'accelerazione verticale subita (Kennedy, 2004)

Sulla base di questi studi, è stato scelto di considerare come valore critico di accelerazione verticale 1 g (9,81 m/s<sup>2</sup>). La forza di reazione che il terreno esercita sulla ruota nel momento dell'urto è stata applicata al mozzo della ruota in direzione verticale con verso positivo ed è stata calcolata utilizzando la formula 11:

$$F_{buca} = m \cdot a = 167,89 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1647 \text{ N} \quad (11)$$

Si è scelto di considerare nel calcolo della forza di reazione  $F_{buca}$  la massa complessiva del carrello, sebbene nella realtà il peso sia equidistribuito tra le due ruote: questa ipotesi conservativa e non realistica è stata fatta per simulare una maggiore criticità dei carichi applicati.

In figura 81 viene mostrata l'implementazione dei carichi e vincoli appena descritti sul modello all'interno di *Solidworks Simulation*.

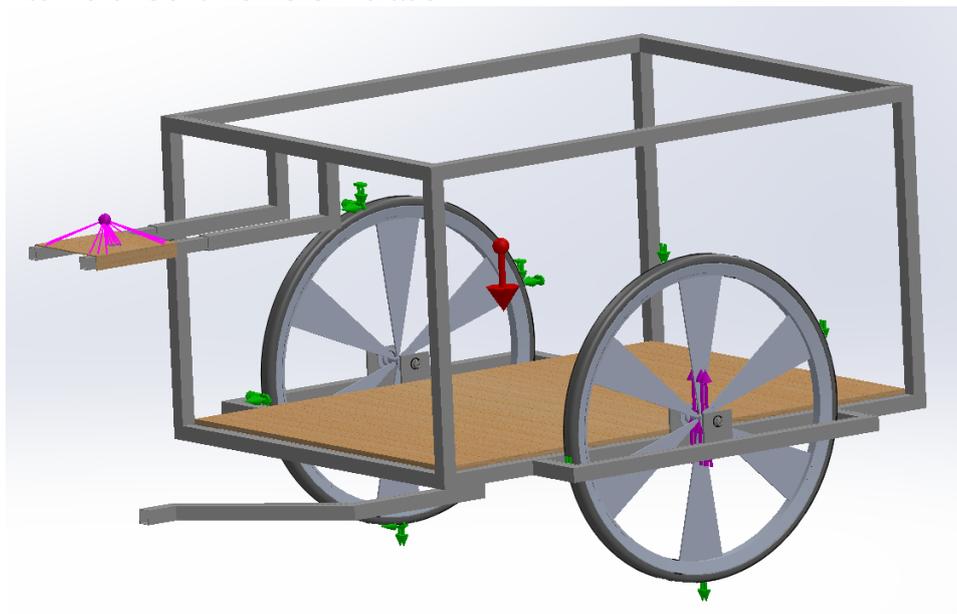


Figura 81 Configurazione dei carichi e vincoli per simulazione di impatto con buca

Nell'output dell'analisi sono state escluse le ruote, come già fatto nelle altre simulazioni, in quanto zone di non design. I risultati vengono commentati di seguito.

La distribuzione delle sollecitazioni iniziale mostra tensioni elevate all'interno fori di fissaggio delle ruote, che raggiungono un picco di 215 MPa in punti molto limitati. Questa, data la concentrazione solamente in alcuni nodi, è probabilmente un'anomalia dovuta a una sovrapposizione locale degli elementi triangolari della ruota e del foro o ad una concentrazione di tensioni dovuta alla tipologia di vincoli utilizzati che realizzano tensioni parassite nella zona di applicazione, cause queste che hanno portato a una sovrastima delle sollecitazioni. Sul telaio (figura 82) da cui si sono escluse le staffe, le sollecitazioni sono localizzate principalmente nella zona dei supporti laterali dove sono saldate le staffe delle ruote, con picchi di 62 MPa, e nel piano inferiore, estendendosi in parte anche verso la zona estrema delle ringhiere senza punti di concentrazione significativi. I valori rimangono comunque sotto la tensione di snervamento nonostante l'accelerazione critica considerata, con un coefficiente di sicurezza CS minimo di 3,38.

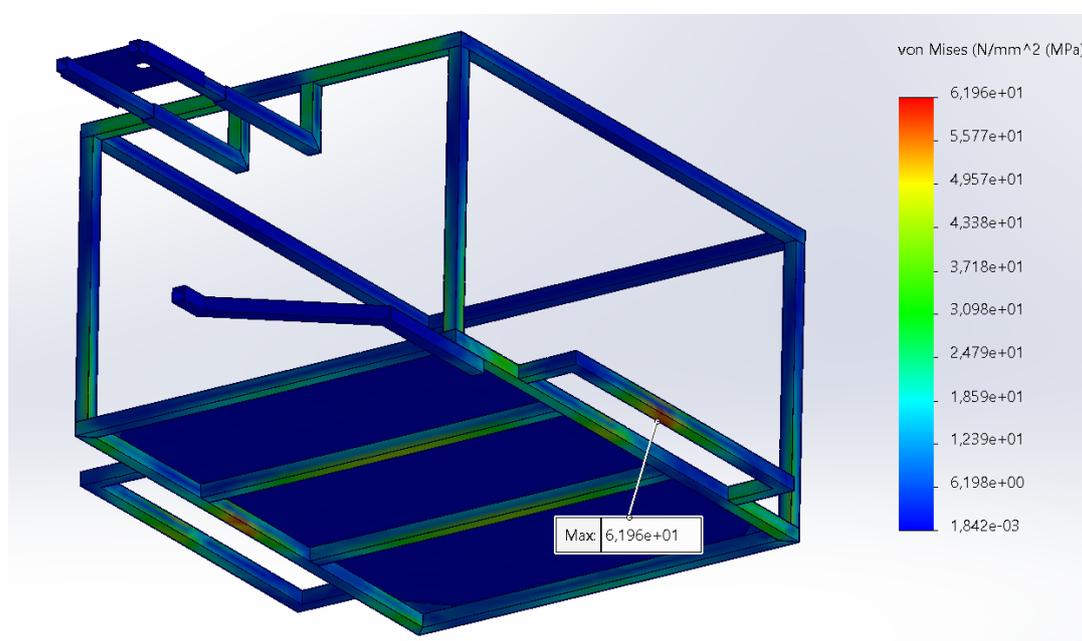


Figura 82 Distribuzione delle sollecitazioni di Von Mises: simulazione impatto con buca

In seguito, è stato valutato lo spostamento verticale del trailer. Il risultato dell'analisi è mostrato in figura 83.

Si può notare un lieve “beccheggio” del carrello, con la zona anteriore ruotata verso il basso: questo ha portato ad uno spostamento verticale massimo di -74 mm nel lato vincolato con una traslazione verticale della ruota di -50 mm, mentre il lato non soggetto all'urto ha subito un lieve innalzamento nella zona posteriore, di circa 15 mm. Questi valori, di piccola entità, non sono stati considerati critici dato che, in una condizione reale, la bicicletta collegata al carrello contribuirebbe probabilmente ad evitare queste ulteriori deflessioni realizzando una forza di traino verso l'alto, atta a far fuoriuscire la ruota del carrello dalla buca.

Infine, dati i risultati ampiamente al di sotto della soglia critica di snervamento, questa simulazione ha permesso di validare la resistenza strutturale del telaio in presenza di irregolarità del terreno molto probabili nelle comuni situazioni d'uso del dispositivo.

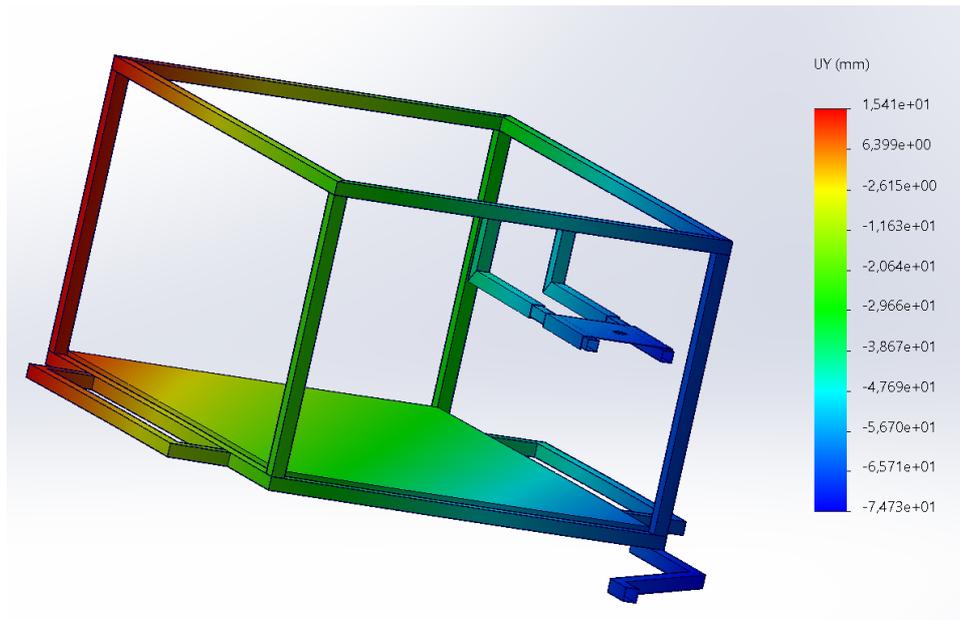


Figura 83 Distribuzione degli spostamenti verticali della struttura: simulazione impatto con buca

#### 4.3.3 Analisi dinamica: Random Vibration Analysis

L'analisi FEM di tipo Random Vibration Analysis è stata eseguita sul trailer per valutare l'effetto delle vibrazioni del terreno sul carrello durante la marcia.

Questa è una tipologia di analisi FEM dinamica utilizzata per determinare come una struttura risponde a vibrazioni che non hanno una frequenza fissa, ma variano in maniera casuale all'interno di un determinato intervallo di frequenze. Queste vibrazioni, nel caso specifico, derivano dal terreno accidentato su cui si muove un veicolo. L'analisi viene condotta nel dominio delle frequenze, dove le grandezze, tra cui le tensioni, sono descritte dal Power Spectral Density (PSD).

Il PSD delle tensioni, espresso in  $MPa^2/Hz$ , rappresenta una misura che descrive quanta "energia" delle sollecitazioni è presente a ciascuna frequenza. Per ottenere il valore delle sollecitazioni effettive in MPa, il PSD deve essere integrato sull'intervallo di frequenze di interesse, portando al valore, confrontabile con la resistenza allo snervamento, Root Mean Square (RMS). Il RMS rappresenta l'ampiezza media delle sollecitazioni nel tempo ed è calcolato tramite la formula 12:

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} PSD(f)df} \quad (12)$$

Infine, questo valore può essere confrontato con la tensione di snervamento del materiale per stimare il coefficiente di sicurezza CS della struttura.



I valori rappresentati in figura sono in funzione della frequenza spaziale  $n$ , definita in  $\frac{\text{cicli}}{m}$ , da cui deriva l'unità di misura dello spostamento PSD utilizzata nella norma (formula 13):

$$G_d(n) = m^2 / \text{cicli}/m = \frac{m^3}{\text{cicli}} \quad (13)$$

Per trasformare la frequenza spaziale  $n$  in frequenza temporale  $f$ , espressa in Hz, la normativa ISO fornisce la formula 14:

$$f = v \cdot n \quad (14)$$

Dove:

- $f$  è la frequenza temporale, in Hz;
- $v$  è la velocità del veicolo, in  $m/s$ ;
- $n$  è la frequenza spaziale, in  $\frac{\text{cicli}}{m}$ ;

Da cui è possibile poi ricavare i valori di spostamento PSD in  $mm^2/Hz$ , unità di misura richiesta dal software *Solidworks Simulation*, tramite la formula 15:

$$G_d(f) = \frac{(G_d(n) \cdot n)}{f} \cdot 10^6 \quad (15)$$

Nel caso specifico di questa analisi, si è considerato la classificazione D del terreno, che approssima in modo adeguato la tipologia di strada dissestata percorribile dal carrello nel suo utilizzo. Si è ipotizzato una velocità costante del carrello pari a  $5 m/s$ , mentre il range di frequenze spaziali considerato è tra  $0,1 \frac{\text{cicli}}{m}$  e  $10 \frac{\text{cicli}}{m}$ . I valori di spostamento PSD, estrapolati dal grafico e convertiti in  $mm^2/Hz$ , sono mostrati in tabella 11.

| Frequenza $n$<br>[ $\frac{\text{cicli}}{m}$ ] | Frequenza $f$<br>[Hz] | Spostamento $G_d(n)$<br>[ $\frac{m^3}{\text{cicli}}$ ] | Spostamento $G_d(f)$ [ $mm^2/Hz$ ] |
|---|-----------------------|--|------------------------------------|
| 0,1   | 0,5                   | $3 \cdot 10^{-3}$                                      | 600                                |
| 0,3   | 1,5                   | $6 \cdot 10^{-4}$                                      | 120                                |
| 0,6   | 3                     | $8 \cdot 10^{-5}$                                      | 16                                 |
| 1   | 5                     | $3 \cdot 10^{-5}$                                      | 6                                  |
| 5   | 25                    | $4 \cdot 10^{-6}$                                      | 0,8                                |
| 10  | 50                    | $4 \cdot 10^{-7}$                                      | 0,08                               |

Tabella 11 Valori Frequenza-Spostamento PSD per la tipologia di strada selezionata (ISO 8608:2016)

L'implementazione dell'analisi è stata articolata nei seguenti passaggi:

- **Configurazione dell'analisi:** È stato impostato il calcolo delle sollecitazioni all'interno del range di frequenze tra 1 Hz e 50 Hz. Inoltre, per non appesantire la computazione, si è imposto il calcolo delle prime 15 frequenze di risonanza.
- **Vincoli applicati:** Dato che le vibrazioni, secondo la logica del software, vengono trasmesse dalle superfici vincolate al resto della struttura, per simulare una condizione realistica è stata modellata una superficie a contatto con le ruote, atta a simulare il terreno sottostante. Sulla superficie inferiore è stato imposto un vincolo di geometria fissa, in modo tale che le vibrazioni vengano trasmesse dal terreno alla struttura del carrello per mezzo delle ruote (figura 85).

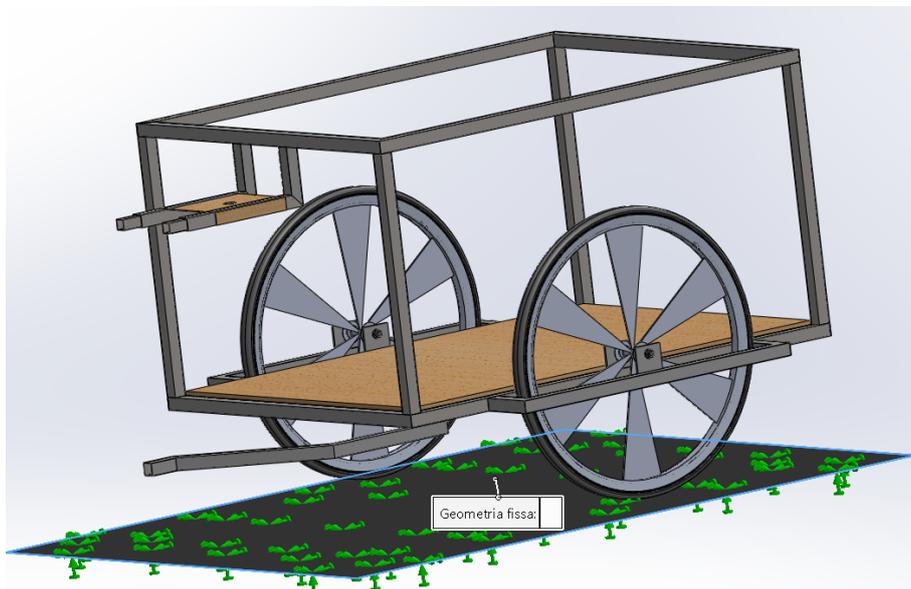


Figura 85 Applicazione dei vincoli: Random Vibration Analysis

- **Carichi applicati:** La massa applicata al pianale di carico è la stessa delle analisi precedenti e pari a 150 kg; trattandosi di una condizione dinamica, per rispecchiare le reali condizioni operative non è stata applicata la massa remota atta a simulare il frullatore. Gli spostamenti PSD mostrati in tabella 11 sono stati applicati lungo la direzione verticale nel verso positivo; in figura 86 viene mostrata la curva Frequenza-Spostamento PSD applicata in *Solidworks Simulation*.
- **Smorzamento del sistema:** È stato applicato uno smorzamento modale pari a 0,05, come indicato da Adams (1998) nel caso di strutture metalliche con giunti. Questo valore riflette l'assorbimento dell'energia delle vibrazioni da parte della struttura metallica.

Curva di frequenza

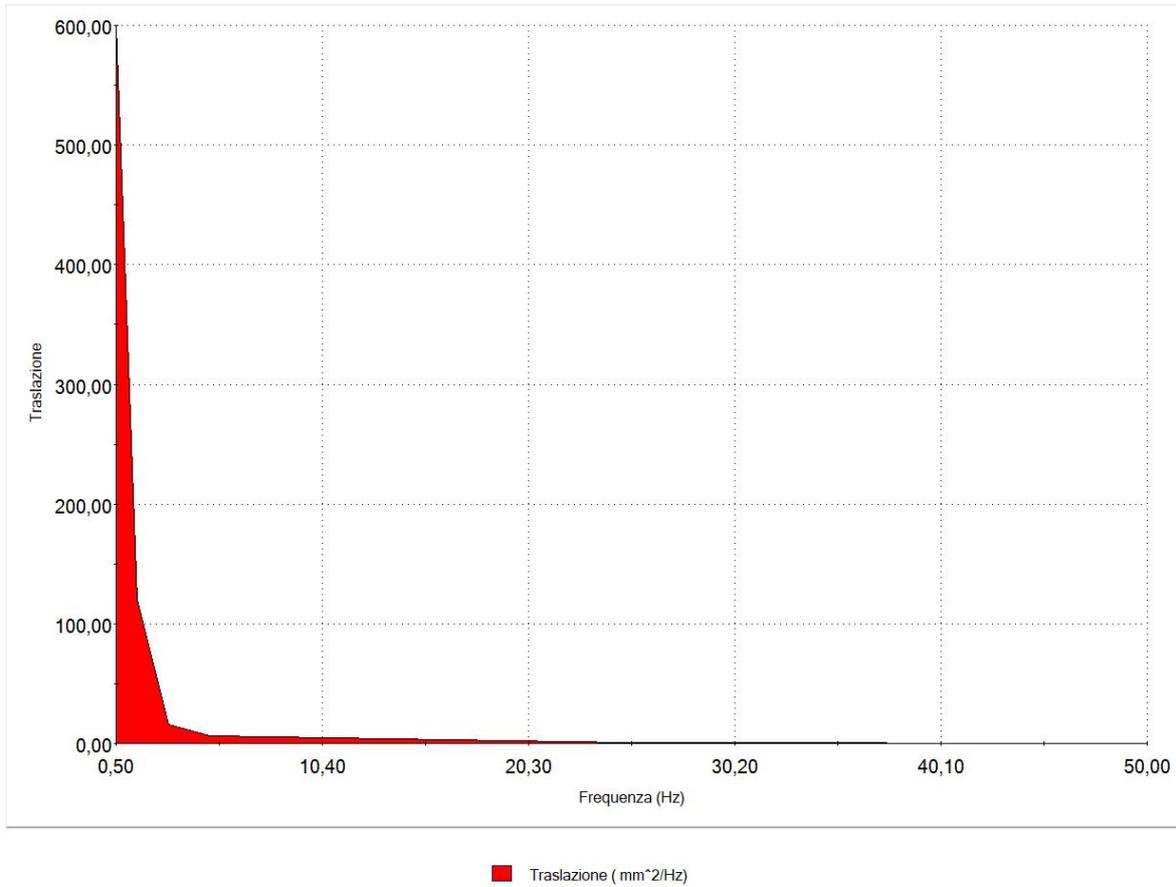


Figura 86 Curva Frequenza-Spostamenti PSD in Solidworks

Anche in questo caso, nell'output dell'analisi sono state escluse le ruote in quanto zone di non design, mentre i risultati vengono mostrati di seguito.

In tabella 12 vengono mostrate le frequenze di risonanza del carrello calcolate dal software.

| N. di modalità | Frequenza [Hz] |
|----------------|----------------|
| 1              | 0,47           |
| 2              | 1,07           |
| 3              | 2,51           |
| 4              | 2,87           |
| 5              | 7,07           |
| 6              | 11,62          |
| 7              | 12,82          |
| 8              | 13,92          |
| 9              | 18,05          |
| 10             | 18,55          |
| 11             | 25,26          |
| 12             | 25,99          |
| 13             | 28,52          |
| 14             | 32,45          |
| 15             | 33,58          |

Tabella 12 Frequenze di risonanza del trailer

Come nell'analisi precedente, la zona più sollecitata è risultata essere in tre nodi interni ai fori di fissaggio della ruota, con tensioni di picco di 3240 MPa (figura 87): questo porta a presupporre che in tale zona vi è una sovrastima delle tensioni, dovuta ad una sovrapposizione di elementi triangolari tra la ruota ed il foro causata dagli spostamenti elevati risultanti dalle analisi.

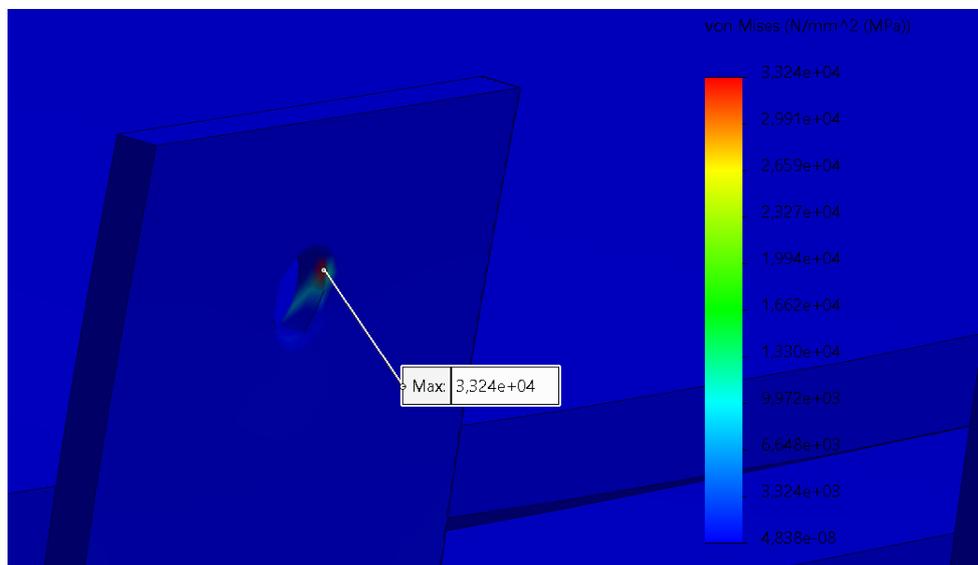


Figura 87 Concentrazione di tensioni parassite nei fori di fissaggio

Dato ciò, anche in questo caso si è deciso di nascondere i supporti per avere una rappresentazione più veritiera delle sollecitazioni RMS sul componente, rappresentate in figura 88.

L'area più critica è sui profilati trasversali del pianale inferiore, con una tensione RMS  $\sigma_{RMS}$  di picco pari a 184,2 MPa, che, confrontata con la tensione di snervamento dell'acciaio pari a 210 MPa, porta ad un CS minimo pari a 1,14; Anche la zona inferiore delle ringhiere è risultata particolarmente critica, con una tensione di picco pari a 170,1 MPa, localizzata agli angoli dei profilati per via della combinazione di direzione della deformazione subita dai componenti a causa delle vibrazioni e di effetto intaglio.

Questo valore è vicino al limite di snervamento poiché le tensioni e le deformazioni, in questo caso, sono causate dalla risonanza del sistema, verificatosi perché la frequenza delle vibrazioni coincide con la frequenza naturale del telaio: questo fenomeno, particolarmente critico, porta ad un'amplificazione delle sollecitazioni globali sul sistema. Tuttavia, il fatto che le tensioni massime risultino inferiori, seppur di poco, alla tensione di snervamento  $\sigma_S$  del materiale consente alla struttura di mantenere la sua integrità strutturale senza superare il punto di deformazione permanente.

Questa situazione richiede comunque particolare attenzione, in quanto l'esposizione ripetuta a frequenze di risonanza può portare ad un'usura maggiore della struttura.

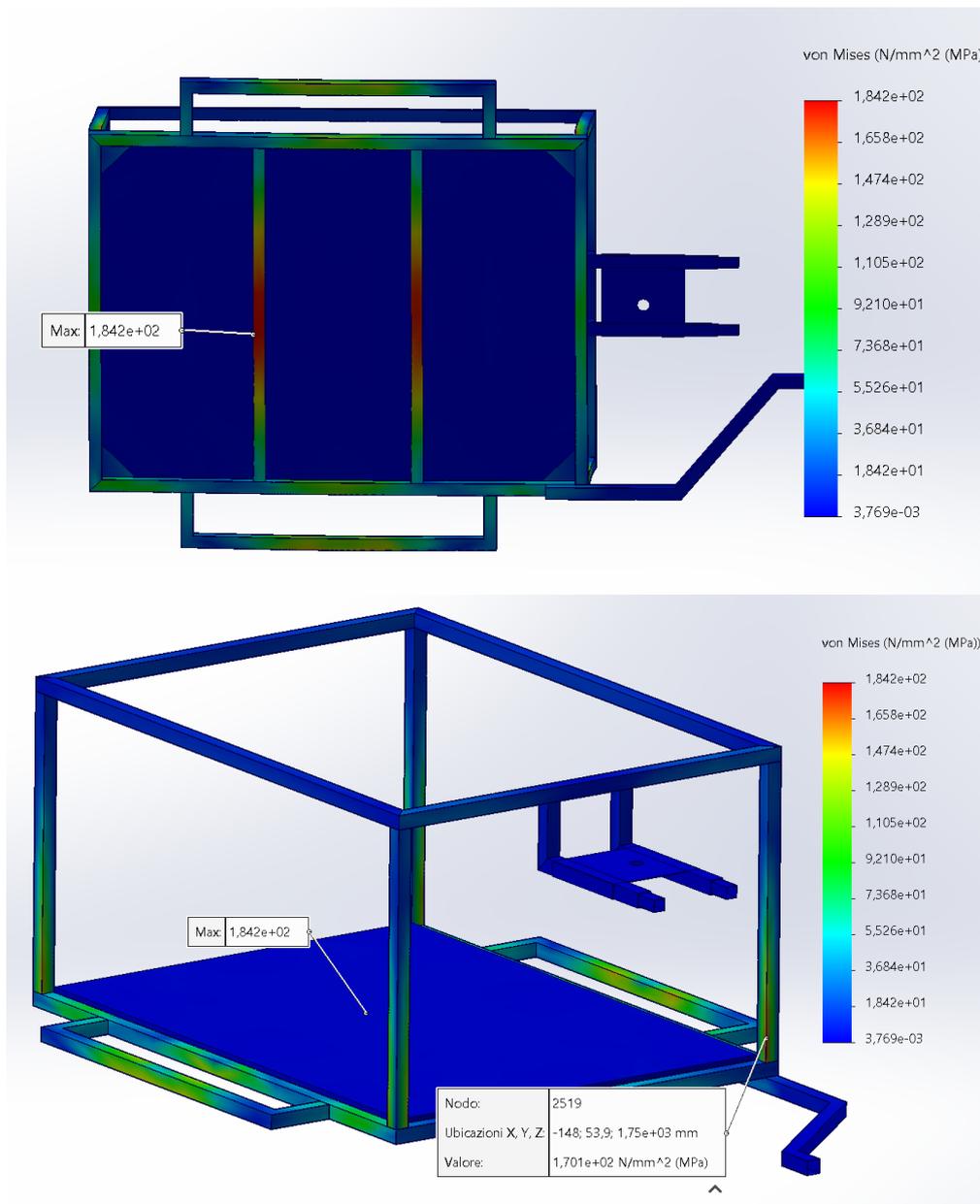
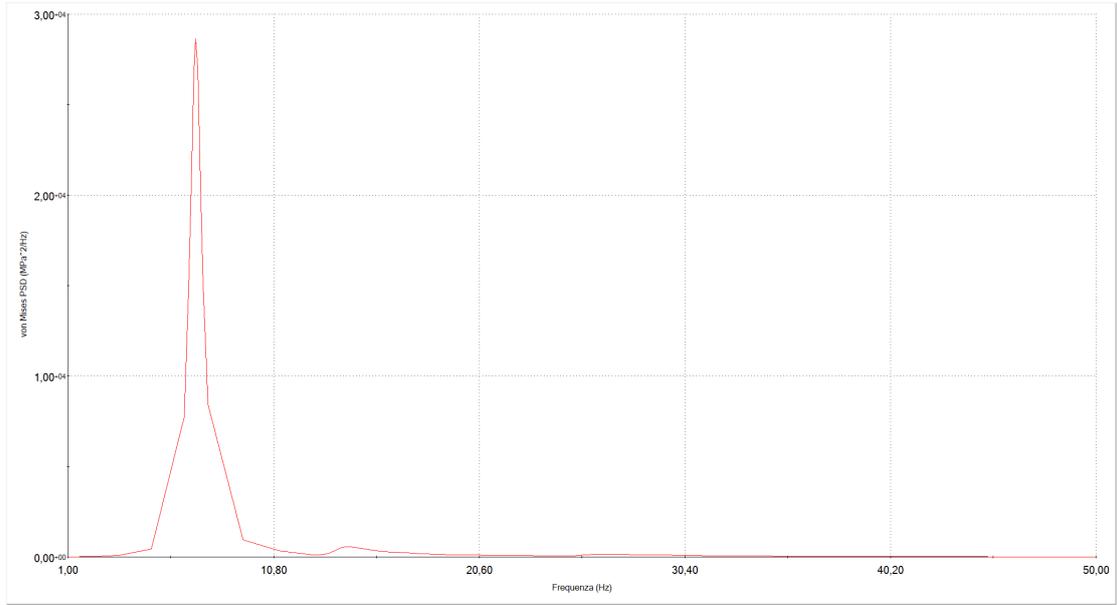


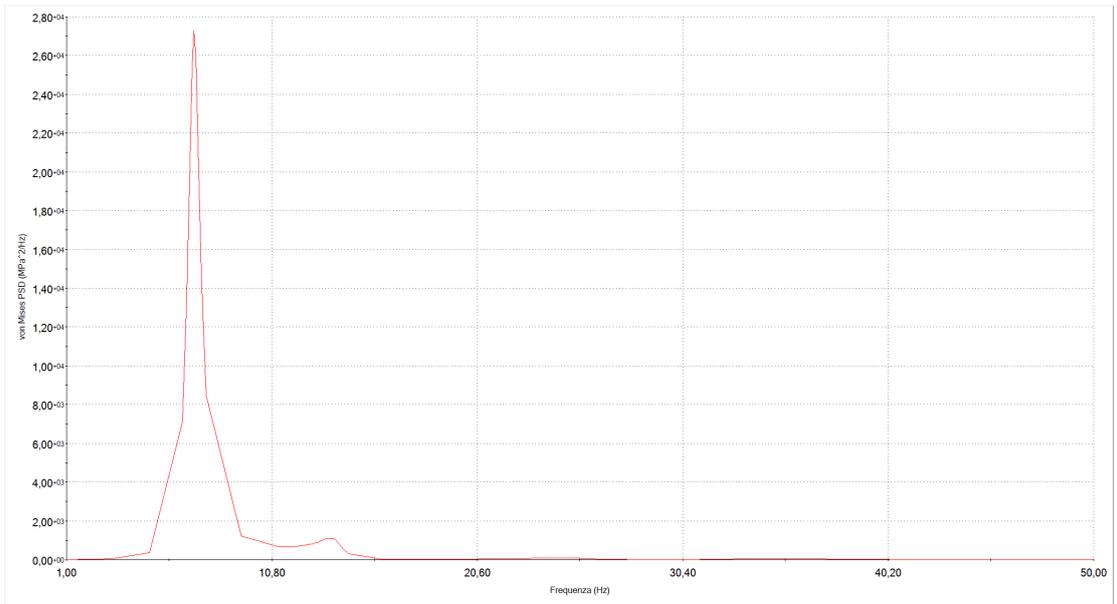
Figura 88 Distribuzione delle sollecitazioni di Von-Mises RMS: Analisi dinamica

È stato realizzato un grafico di risposta frequenza–tensione PSD dei nodi più sollecitati: questo ha permesso di individuare la frequenza di vibrazione più critica, che ha portato alle tensioni descritte sopra. Il risultato, mostrato in figura 89, ha permesso di individuare la frequenza di 7,07 Hz come la frequenza di risonanza più critica per entrambi i nodi mostrati in figura 89, sebbene con valori di picco della  $\sigma_{PSD}$  differenti. Il nodo più sollecitato, situato sulla superficie dei profilati trasversali del pianale, ha una  $\sigma_{PSD}$  pari a  $28600 \text{ MPa}^2/\text{Hz}$ , mentre la  $\sigma_{PSD}$  del nodo 2519 si attesta a  $27274 \text{ MPa}^2/\text{Hz}$ ; questi valori, convertiti utilizzando la formula 12, restituiscono i valori di  $\sigma_{RMS}$  presentati in figura 88.

Grafico di risposta



Nodo 8446



Nodo 2519

Figura 89 Grafico di risposta frequenza-tensione PSD per i nodi più critici: in alto il nodo più sollecitato, in basso il nodo sulla ringhiera

Infine, è stato analizzato il valore RMS dello spostamento del trailer. La figura 90 mostra, in vista frontale, la distribuzione degli spostamenti causati dalla risonanza della struttura, con un picco massimo di 31,36 mm: questo si verifica nella parte superiore della struttura, in particolare sui profili laterali a destra dell'immagine. E' importante notare che, non avendo vincolato le ruote, queste risultano libere di muoversi verticalmente in risposta alle vibrazioni del terreno: per questo motivo, la ruota destra (in riferimento all'immagine) subisce spostamenti maggiori, di circa 24 mm a fronte della ruota opposta che subisce uno spostamento di soli 10 mm, poiché la risonanza ha amplificato le deformazioni in modo asimmetrico, in particolare con valori più elevati nel lato dove è distribuita maggiormente la massa a causa della presenza del braccio di traino.

Inoltre, si osserva una lieve inflessione laterale del telaio, che ha causato il picco di 31 mm: questo indica che le vibrazioni hanno provocato non solo uno spostamento verticale delle ruote, ma anche una lieve torsione della struttura verso il lato più soggetto alle deformazioni. La condizione di risonanza ha quindi amplificato non solo gli spostamenti verticali, direzione in cui sono stati applicati i carichi del terreno, ma anche quelli laterali, portando alla deformazione complessiva mostrata in figura.

In generale, questi valori non sono stati considerati critici, sia perché di entità ridotta, sia perché associati alla frequenza di risonanza del sistema, che amplifica in modo critico il comportamento della struttura.

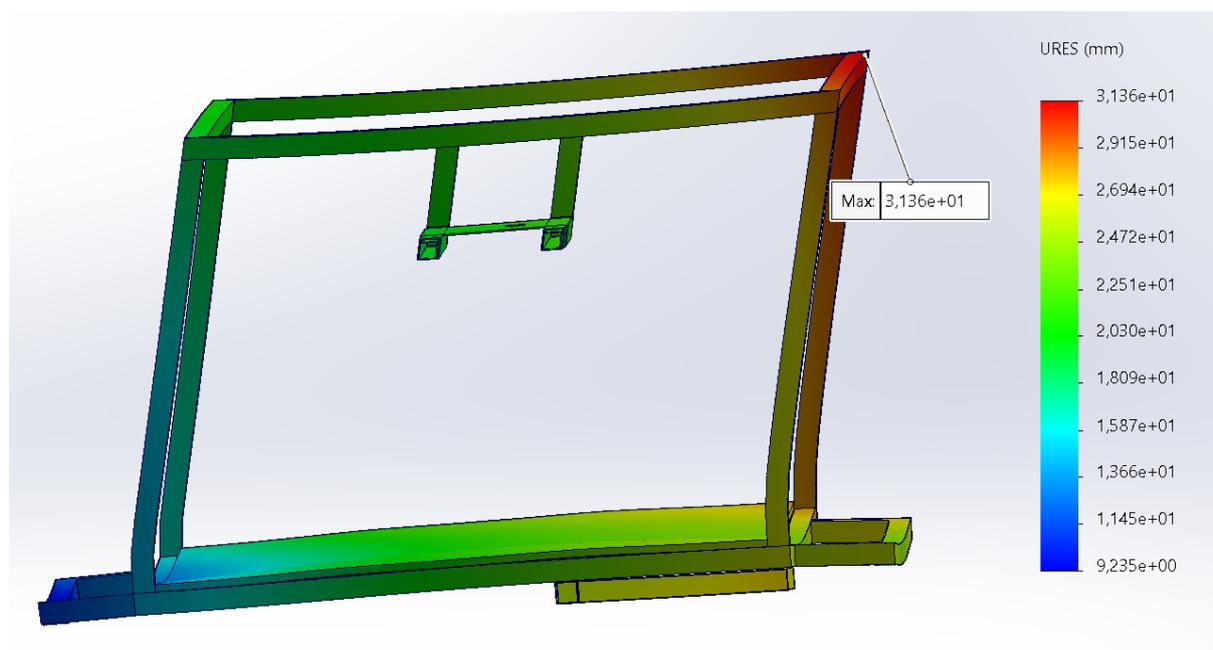


Figura 90 Distribuzione degli spostamenti della struttura: analisi dinamica

#### 4.3.4 Analisi di vita a fatica: copertone di camion

L'analisi di vita a fatica è stata eseguita sul pezzo di copertone usato come giunto tra il braccio di traino e la ruota di bicicletta, per stimare la sua vita utile. Sebbene *Baiskeli* abbia riferito, tramite utilizzi sul campo, che il copertone, utilizzato per lo stesso scopo, ha una durata di circa due mesi, l'analisi è stata condotta per verificare questa stima utilizzando i carichi e le forze specifiche del trailer in oggetto.

Per quanto riguarda la stima dello spessore del copertone, gli pneumatici utilizzati in molti Paesi africani, soprattutto in aree rurali o meno regolamentate, sono spesso usati fino all'usura estrema, andando oltre i limiti di sicurezza. Le condizioni stradali difficili accelerano questo processo, e il battistrada può essere ridotto a meno di 1 mm, a volte fino a rendere visibile e usurare la struttura interna dello pneumatico. A differenza di quanto avviene in Europa, dove uno pneumatico esaurito mantiene generalmente uno spessore variabile tra i 20 e i 30 mm, in queste aree l'usura può portare il copertone a spessori notevolmente inferiori. In questo contesto, è stato stimato uno spessore di 10 mm del copertone, considerato probabile data la mancanza di dati precisi e la forte usura osservata in queste condizioni.

L'implementazione dell'analisi è stata articolata nei seguenti passaggi:

- **Tipologia di analisi:** Per poter implementare correttamente un'analisi a fatica in *Solidworks Simulation*, è necessario eseguire un'analisi statica preliminare. Questa analisi fornisce al software i parametri chiave, come le sollecitazioni e le deformazioni. Vista la tipologia di materiale utilizzato, ossia la gomma, si è optato per un'analisi FEM non lineare, in quanto la gomma presenta un comportamento meccanico non descrivibile con un'analisi lineare. In particolare, la gomma è soggetta a non linearità geometrica e del materiale, dovute alla tipologia di curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  che caratterizza questo tipo di materiale. Pertanto, l'analisi non lineare ha permesso di rappresentare in modo più realistico la risposta del copertone alle sollecitazioni e di preparare correttamente i dati per l'analisi della vita a fatica.
- **Proprietà del materiale:** Le proprietà meccaniche e di resistenza a fatica del materiale sono state implementate in *Solidworks* in base ai dati riportati nel paragrafo 4.1.1.
- **Condizione di carico critica:** La fase di partenza in salita del trailer è stata considerata la condizione di carico più critica, poiché durante le fasi di sterzata il componente si piega ma non è soggetto a forze elevate. Al contrario, durante la partenza su di una pendenza di 20° deve essere applicata una forza, calcolata tramite la formula 10, pari a 598,9 N. Questa forza è stata distribuita sui due fori di fissaggio del copertone alla bicicletta.
- **Vincoli applicati:** Sono stati imposti vincoli di geometria fissa sul foro di fissaggio del copertone al braccio di traino. Questo vincolo è stato scelto per simulare correttamente le condizioni operative del componente, dove il copertone resta fisso rispetto al punto di attacco del braccio durante la trazione.
- **Ciclo di fatica:** Il ciclo di fatica utilizzato è un ciclo all'origine di ampiezza costante. Questo ciclo è stato scelto poiché rappresenta la condizione più critica per la vita a fatica, in quanto il componente è sottoposto a variazioni cicliche di stress che partono

da zero e si estendono fino al valore massimo di tensione senza fasi di rilassamento del materiale, aumentando quindi il rischio di danneggiamento.

In figura 91 viene mostrata l'implementazione dei carichi e vincoli appena descritti sul modello all'interno del software, così come le misure del provino.

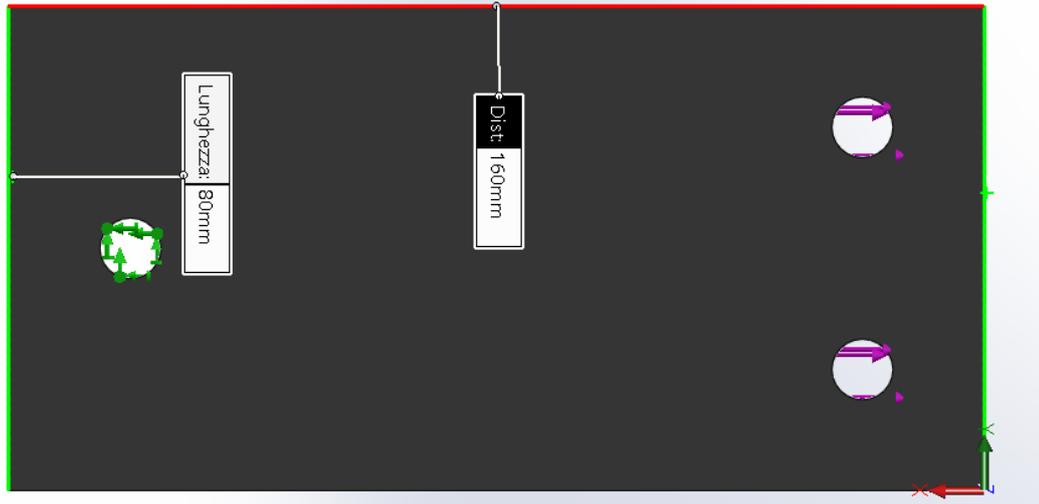


Figura 91 Configurazione di carichi e vincoli per analisi di vita a fatica

Di seguito vengono mostrati e discussi i risultati delle analisi.

In figura 92 è mostrata la distribuzione delle tensioni sul componente nell'analisi statica non lineare, a seguito dell'applicazione della forza. La zona più sollecitata risulta il bordo del foro di fissaggio del copertone al braccio di traino (a sinistra nell'immagine), questo è dovuto sia all'effetto intaglio sia all'applicazione del vincolo di geometria fissa su questo particolare. Anche i due fori nel lato opposto presentano delle concentrazioni di tensioni, seppur in maniera minore, sui bordi. Dalla mappa dei colori è possibile notare come le tensioni si distribuiscano sul resto del componente a partire dalle zone già citate.

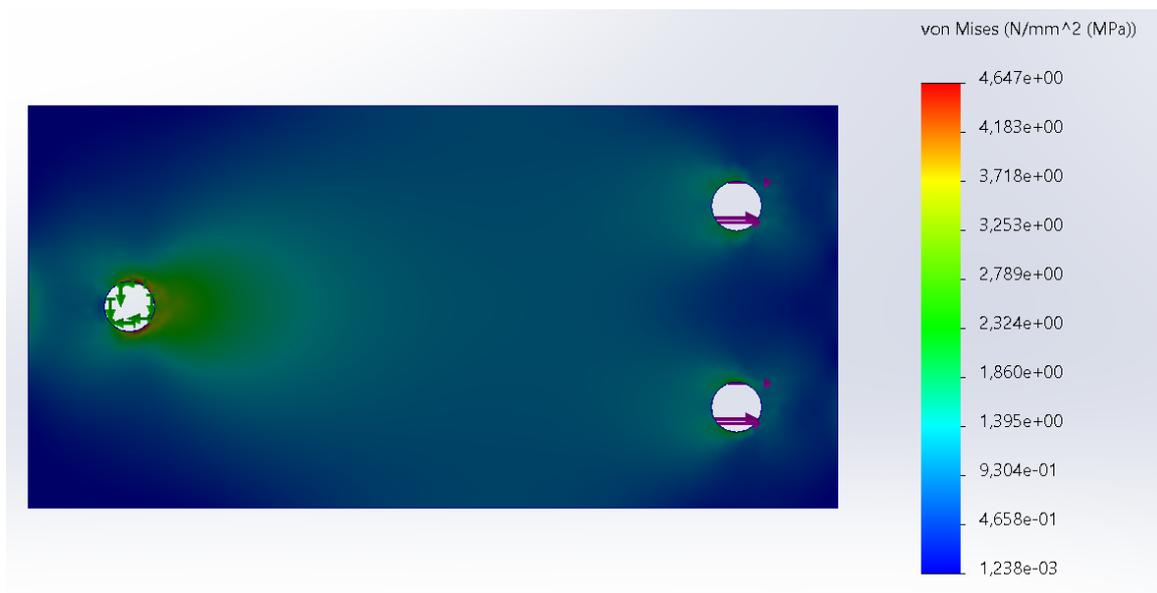


Figura 92 Distribuzione delle tensioni sul copertone: analisi statica

Il risultato dell'analisi a fatica, mostrato in figura 93, indica che il componente realizzato con il copertone esaurito di camion presenta una vita a fatica stimata in circa 10000 cicli nelle zone più critiche, localizzate dove le tensioni presentavano una concentrazione maggiore nell'analisi statica. Nelle aree estremali, meno sollecitate, la vita a fatica è stimata intorno agli 83000 cicli. Questo suggerisce che il cedimento inizierà probabilmente attorno ai fori di fissaggio, dove, a causa dell'effetto intaglio, si concentrano le sollecitazioni più critiche, riducendo la resistenza del materiale. Nonostante ciò, la vita complessiva del componente, stimata in 10000 cicli sotto i carichi specifici del trailer in esame, potrebbe risultare lievemente maggiore rispetto le testimonianze dei progettisti di *Baiskeli*, che indicano una durata del copertone di circa due mesi.

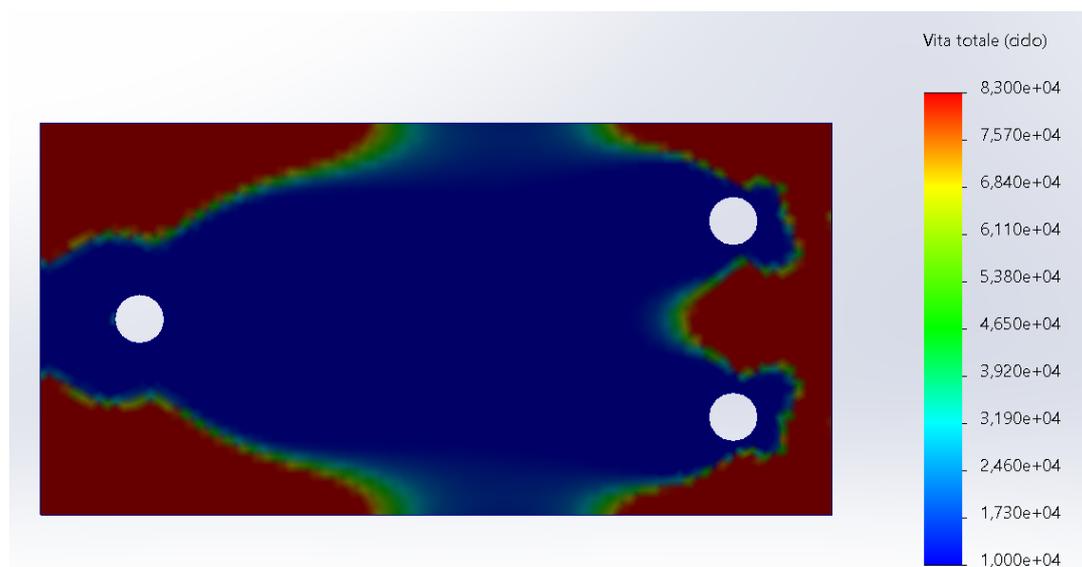


Figura 93 Risultati dell'analisi a fatica sul copertone

È importante notare che questi valori possono variare notevolmente utilizzando un copertone con uno spessore diverso da quello ipotizzato e che, nel concept finale, presentato in seguito, sono state aggiunte delle placche di rinforzo nelle zone di fissaggio dei fori per ridurre la deformazione dei fori e migliorare la distribuzione delle tensioni, allo scopo di prolungare la vita del componente.

#### 4.4 Progettazione del sistema di trasmissione del frullatore

La progettazione del sistema di trasmissione del frullatore ha richiesto di risolvere diverse problematiche dovute alla configurazione del piano di appoggio del frullatore sul trailer e alla necessità di adattare il sistema di trasmissione ad un frullatore fissato sul carrello cargo e non sulla bicicletta (come presentato nel capitolo 2). Sebbene il meccanismo generale di trasmissione adottato sia analogo a quello presentato nel paragrafo 2.2.1, che comprende un disco in gomma a contatto con la ruota della bicicletta, un albero di trasmissione e un collegamento dell'albero all'asse di rotazione del frullatore, realizzato tramite saldatura o perni, la progettazione ha richiesto degli accorgimenti per adattarlo alla configurazione del trailer. In particolare, a causa dell'integrazione del frullatore sul carrello e non sulla bicicletta, sono emerse diverse problematiche:

- **Variabilità dell'altezza del frullatore rispetto alla ruota:** La distanza tra il frullatore e la ruota della bicicletta non è fissa, ma varia in base alla tipologia di bicicletta e, in particolare, al tipo di ruota. Ciò è dovuto alla varietà dei modelli di bicicletta presenti sul mercato ugandese, che possono presentare differenti diametri delle ruote motrici. Questa variabilità rende più complessa l'integrazione di un sistema di trasmissione che possa funzionare con ogni tipologia di bicicletta senza la necessità di regolazioni meccaniche frequenti.
- **Posizione longitudinale del frullatore variabile:** Il sistema telescopico del trailer, che consente di regolare la posizione del frullatore rispetto alla bicicletta, crea un ulteriore ostacolo per il posizionamento della trasmissione. In particolare:
  - La retrazione, per motivi di sicurezza, del sistema durante la marcia non permette di fissare permanentemente la trasmissione sulla bicicletta, poiché la posizione del frullatore cambia durante l'estensione e la retrazione del braccio.
  - Quando il frullatore è in configurazione di utilizzo, e quindi il braccio totalmente esteso, l'albero di trasmissione si inserisce tra le griglie del portapacchi posteriore della bicicletta. Questo comporta un vincolo fisico: se si tenta di richiudere il sistema telescopico, l'albero di trasmissione va a sbattere contro le griglie del portapacchi, impedendo la retrazione totale dei bracci. Questa interferenza complica l'utilizzo del sistema in presenza di portapacchi, che sono comuni sulla maggior parte delle biciclette utilizzate in Uganda.
- **Oscillazioni laterali del trailer:** I piccoli spostamenti laterali del trailer, dovuti alle imperfezioni del terreno o alle vibrazioni generate dalla rotazione del frullatore, possono provocare un allontanamento del disco in gomma dalla ruota della bicicletta, causando un'interruzione della rotazione dell'albero e quindi delle lame del frullatore.

Per risolvere le problematiche sopra descritte, sono state sviluppate due soluzioni distinte: la prima soluzione, scartata a seguito di valutazioni sul modello 3D, ha permesso lo sviluppo della seconda, che va a risolvere i problemi riscontrati nella prima iterazione. Di questa seconda iterazione, è stato poi realizzato un prototipo su cui si sono effettuati dei test sperimentali per verificare il corretto funzionamento.

Di seguito vengono descritte entrambe le soluzioni e le scelte costruttive adottate.

#### 4.4.1 Prima soluzione

La prima soluzione è stata progettata per risolvere le problematiche descritte, prevedendo una regolazione precisa degli elementi in gioco.

Per risolvere il problema della variabilità dell'altezza del frullatore rispetto alla ruota della bicicletta, si è deciso di scomporre l'albero di trasmissione in due elementi: uno fisso, saldato all'asse di rotazione del frullatore, e uno mobile, filettato internamente nella zona di attacco del ruotino. L'albero mobile, di diametro inferiore rispetto a quello fisso, poteva essere inserito all'interno del primo e fissato tramite una fascetta reggitubo. Per garantire un corretto serraggio, sono stati realizzati degli intagli sull'estremità inferiore dell'albero fisso, rendendolo più deformabile. Il sistema è illustrato in figura 94.

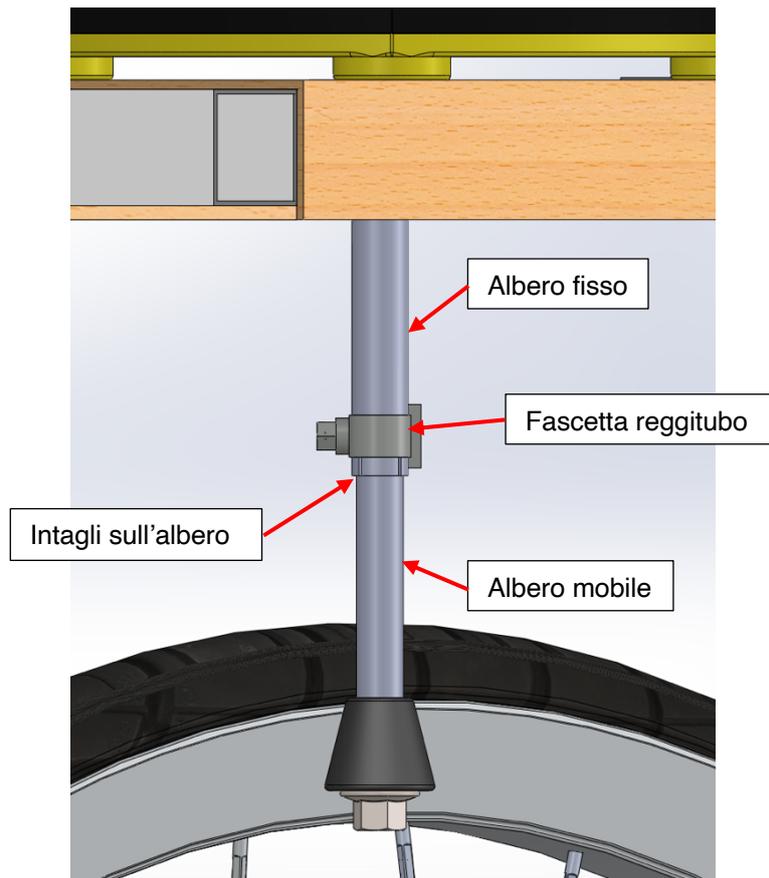


Figura 94 Particolare dell'albero di trasmissione: soluzione 1

Il ruotino in gomma, modellato di diametro 25 mm, è stato fissato all'albero mobile tramite una vite a testa esagonale. Il rapporto di trasmissione teorico è stato calcolato tramite la formula 16:

$$i = \frac{D_{ruota}}{D_{ruotino}} = \frac{660 \text{ mm}}{25 \text{ mm}} = 26,4 \quad (16)$$

La configurazione dell'albero di trasmissione ha permesso di risolvere:

- La variabilità dell'altezza del frullatore dalla ruota. L'albero mobile può essere regolato precisamente in altezza, in base alla tipologia di bicicletta e alla distanza tra il frullatore e la ruota, offrendo una maggiore flessibilità e precisione nel contatto.
- Le problematiche relative alla posizione variabile del frullatore. L'albero mobile può essere completamente sfilato dalla parte fissa quando il braccio telescopico deve essere richiuso, evitando l'interferenza con il portapacchi della bicicletta. Successivamente, l'albero può essere montato rapidamente durante la fase di utilizzo del frullatore.

Per risolvere l'ultima criticità, relativa alle oscillazioni laterali del trailer, è stato ideato un sistema di tensionamento dell'albero sulla ruota di bicicletta. Questo sistema, mostrato in figura 95, sfrutta il portapacchi della bicicletta per essere fissato ed è composto da:

- **Placca ad L:** Questo componente è libero di muoversi grazie a due slitte, ed ha la funzione di mantenere in tensione l'albero di trasmissione contro la ruota della bicicletta.

- **Placca di supporto fissa:** Questa placca è saldata direttamente al portapacchi della bicicletta e presenta due slitte laterali che permettono alla placca ad L di muoversi lungo la direzione desiderata.
- **Barre filettate:** Due barre filettate sono saldate alla placca ad L. Queste barre passano poi attraverso i fori presenti sulla placca di supporto fissa, permettendo la regolazione della posizione della placca ad L sulle slitte.
- **Dadi a farfalla:** Sono presenti due dadi a farfalla che, avvitati sulle barre filettate, permettono di regolare manualmente la posizione della placca ad L. Stringendo o allentando i dadi si può ottenere una regolazione fine della tensione dell'albero di trasmissione contro la ruota.
- **Cuscinetto a sfere:** Il cuscinetto viene saldato sulla placca ad L e l'albero di trasmissione viene fatto passare nell'anello interno: il suo scopo è ridurre l'attrito durante la rotazione dell'albero e permette allo stesso di mantenere una posizione fissa.

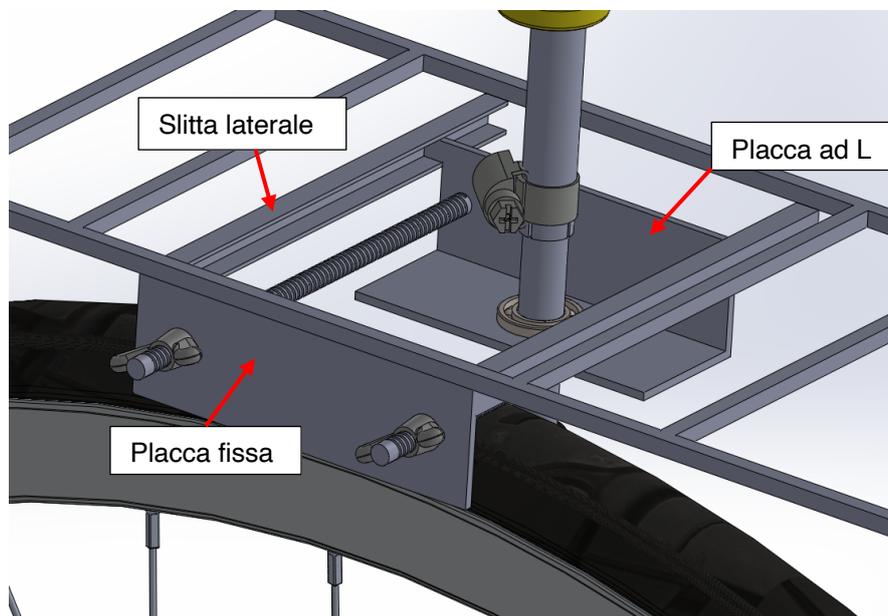


Figura 95 Sistema di tensionamento dell'albero di trasmissione: soluzione 1

Il sistema consente di mantenere un contatto saldo tra l'albero di trasmissione e la ruota della bicicletta, risolvendo il problema dei movimenti laterali del trailer. La regolazione precisa è garantita dai dadi a farfalla, che permettono di adattare il tensionamento a seconda delle necessità operative.

Questa soluzione è stata scartata a causa di diverse problematiche riscontrate a seguito di ragionamenti sulle condizioni operative. Il sistema di tensionamento, pur permettendo una regolazione precisa, si è rivelato troppo rigido. In presenza di cerchioni ammaccati o deformati, condizione frequente sulle biciclette utilizzate in Uganda, il ruotino rischiava di incastrarsi nelle irregolarità della superficie, causando l'interruzione della rotazione e compromettendo il funzionamento del frullatore.

Un ulteriore problema è emerso dall'utilizzo di due alberi di trasmissione collegati tra loro. Il tipo di fissaggio utilizzato poteva non garantire un collegamento abbastanza stretto tra l'albero mobile e quello fisso in modo da renderli solidali, comportando perdite di potenza durante la rotazione. Infine, la necessità di saldare sul portapacchi della bicicletta la placca fissa del sistema di tensionamento potrebbe non essere vista di buon occhio dagli utilizzatori finali.

#### 4.4.2 Seconda soluzione

Sulla base delle criticità riscontrate nella prima soluzione, è stata sviluppata una seconda versione del sistema di trasmissione con l'intento di risolvere le problematiche relative alla configurazione del trailer e le criticità riscontrate nella prima iterazione. Di questa versione è stato realizzato un prototipo utilizzando solo materiali e tecnologie produttive disponibile localmente in Uganda.

A differenza del primo modello, in questo caso, per risolvere la problematica relativa alla variabilità dell'altezza del frullatore rispetto alla ruota, si è andati ad agire sul piano di appoggio del frullatore fissato ai bracci telescopici. Questa scelta è stata dettata dalla necessità di mantenere l'albero di trasmissione in un unico elemento, per non incorrere nelle perdite di efficienza riscontrate nella prima soluzione. La soluzione ideata è stata quella di scomporre il piano di appoggio in due elementi, uno solidale ai bracci telescopici del trailer, e l'altro pensato per ospitare il frullatore e regolabile in altezza, collegato al primo tramite tre barre filettate di lunghezza 150 mm e filettatura M8. Queste barre sono state fissate al piano mobile tramite dei dadi autobloccanti e permettono di regolare la sua altezza tramite dei dadi a farfalla avvitati a contatto con il piano fisso. Inoltre, esternamente alle barre sono state inserite delle molle di compressione, con lo scopo di facilitare l'abbassamento del piano mobile e mantenere il sistema stabile. Questo sistema permette una regolazione in altezza pari alla lunghezza delle barre filettate, inoltre, la presenza di tre barre, permette di compensare eventuali piccole inclinazioni del trailer per garantire la planarità del frullatore. Il sistema appena descritto è mostrato in figura 96.

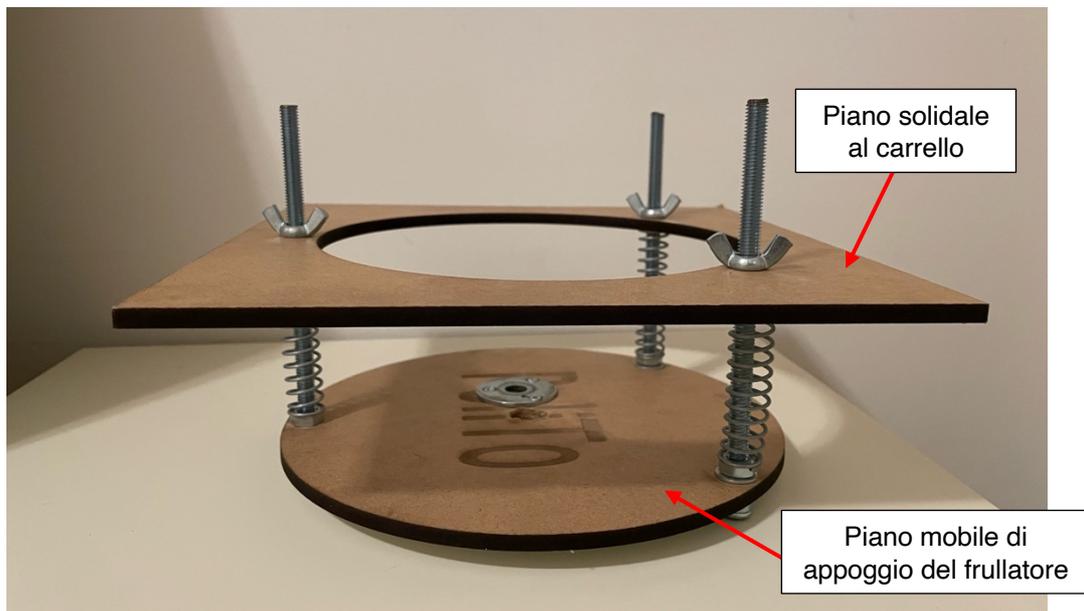


Figura 96 Sistema di regolazione dell'altezza del frullatore: soluzione 2

In questa soluzione si è scelto di non utilizzare un frullatore completo, ma di collegare al sistema di trasmissione solamente il supporto delle lame, le lame stesse e la caraffa (figura 97). Questa soluzione, oltre a comportare un risparmio economico rispetto all'acquisto di un frullatore intero, consente di eliminare le perdite di velocità associate ai meccanismi interni del frullatore, come l'attrito del motore elettrico e le connessioni meccaniche, assicurando una maggiore efficienza della soluzione.



*Figura 97 Esempio di frullatore utilizzato nella soluzione 2*

Questo approccio consente inoltre di evitare la saldatura dell'albero di trasmissione all'asse del frullatore, permettendo di unirli tramite un fissaggio a incastro o un perno.

Sulla base di queste considerazioni, è stato sviluppato un sistema di sgancio rapido dell'albero di trasmissione dal frullatore, atto a risolvere la problematica relativa alla posizione variabile del frullatore.

Il sistema, mostrato in figura 98, prevede il fissaggio dell'albero di trasmissione, realizzato in acciaio con un diametro di 10 mm ed una lunghezza di 130 mm per questo prototipo, tramite l'uso di due copiglie. La prima copiglia viene inserita in un foro realizzato sull'albero di trasmissione a contatto con la superficie superiore del piano mobile, mentre la seconda copiglia è inserita in un secondo foro a contatto con la superficie inferiore, simmetrico al primo rispetto al piano mobile.



*Figura 98 Sistema di sgancio dell'albero di trasmissione: In alto copiglia di fissaggio superiore, in basso copiglia inferiore*

Per ridurre l'attrito tra le copiglie, che ruotano durante il funzionamento del frullatore, e il piano mobile, sono state aggiunte delle rondelle in acciaio, che permettono una rotazione più fluida e riducono l'usura del pianale in legno.

Questo meccanismo di sgancio rapido consente, al termine dell'utilizzo del frullatore, di rimuovere facilmente l'albero di trasmissione: è sufficiente togliere la copiglia superiore e il perno che collega le lame all'albero, permettendo così di estrarre rapidamente l'intero sistema senza compromettere il movimento dei bracci telescopici.

Infine, il sistema di tensionamento adottato per compensare gli spostamenti laterali del trailer è simile a quello previsto nella soluzione 1, ma presenta alcune migliorie. Anche in questo caso, il meccanismo sfrutta il portapacchi della bicicletta come punto di supporto, tuttavia, a differenza del sistema precedente, non prevede la saldatura, ma un semplice appoggio, consentendo un'installazione più rapida.

La staffa di tensionamento è costituita da una piastra in acciaio piatta di dimensioni 200x50 mm. Per ridurre gli attriti tra l'albero di trasmissione e la piastra, oltre che per fissare correttamente la posizione dell'albero, è stato aggiunto un cuscinetto a sfere con dimensioni 10x28x8 mm. Il cuscinetto è stato saldato sulla piastra, garantendo che l'albero possa ruotare senza attrito e mantenere una posizione fissa rispetto alla piastra stessa.

Per risolvere i problemi di rigidità riscontrati nella prima iterazione, in questo prototipo sono stati utilizzati scarti di camera d'aria di bicicletta come tiranti, fatti passare attraverso dei fori realizzati sulla staffa. Questi elementi offrono sufficiente elasticità per assorbire urti o ammaccature sulla ruota, ma sono anche abbastanza rigidi per garantire un tiraggio adeguato. Le estremità dei tiranti sono dotate di un gancio, che consente una rapida regolazione del livello di tensionamento e della posizione della staffa in base alle necessità operative.

Questo sistema di tensionamento, mostrato in figura 99, garantisce una maggiore flessibilità rispetto alla prima iterazione e consente di mantenere l'albero di trasmissione correttamente allineato, riducendo gli effetti degli spostamenti laterali del trailer e migliorando la praticità complessiva del sistema.

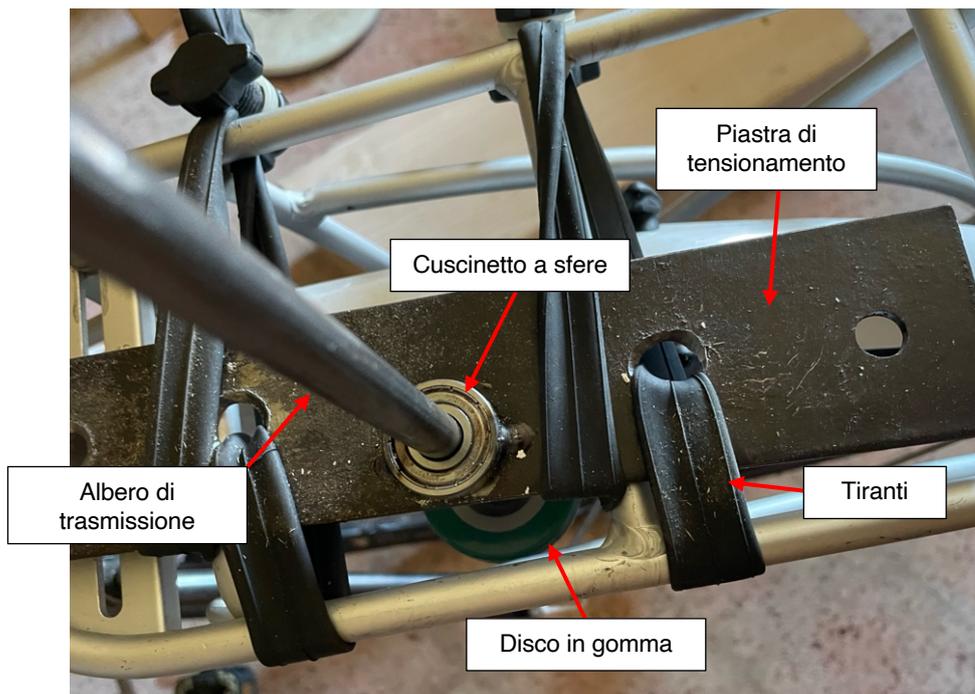


Figura 99 Sistema di tensionamento: soluzione 2

Il ruotino in gomma utilizzato in questa configurazione ha un diametro di 50 mm, ed è stato fissato all'albero, filettato internamente al tornio nella parte estrema, tramite una vite a testa esagonale M6x30. Il rapporto di trasmissione, calcolato rispetto alla ruota di bicicletta da 27,5" utilizzata nei test, è pari a (formula 17):

$$i = \frac{D_{ruota}}{D_{ruotino}} = \frac{698,5 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 13,97 \quad (17)$$

Come mostrato dalla formula, una riduzione del diametro del ruotino  $D_{ruotino}$  porterebbe ad un aumento del rapporto di trasmissione  $i$ , favorendo una velocità di rotazione più elevata. Tuttavia, a causa della difficoltà nel reperire un componente con un diametro inferiore, si è deciso di utilizzare, nei test, il componente con le dimensioni riportate sopra.

Per verificare il corretto funzionamento del sistema di trasmissione una volta collegato alla bicicletta (figura 100) sono state simulate manualmente le problematiche legate ai piccoli spostamenti laterali del piano di appoggio e alla variabilità dell'altezza del frullatore rispetto alla ruota della bicicletta. Le variazioni di altezza sono state emulate interponendo spessori in legno di diversa altezza tra il portapacchi ed il piano mobile, mentre gli spostamenti laterali sono stati replicati facendo oscillare trasversalmente il piano di appoggio: in entrambi i casi il sistema si è dimostrato capace di mantenere un contatto costante tra il ruotino e la ruota della bicicletta. Confermata la funzionalità delle soluzioni ideate, il sistema è stato quindi utilizzato per effettuare test sull'efficienza della trasmissione.

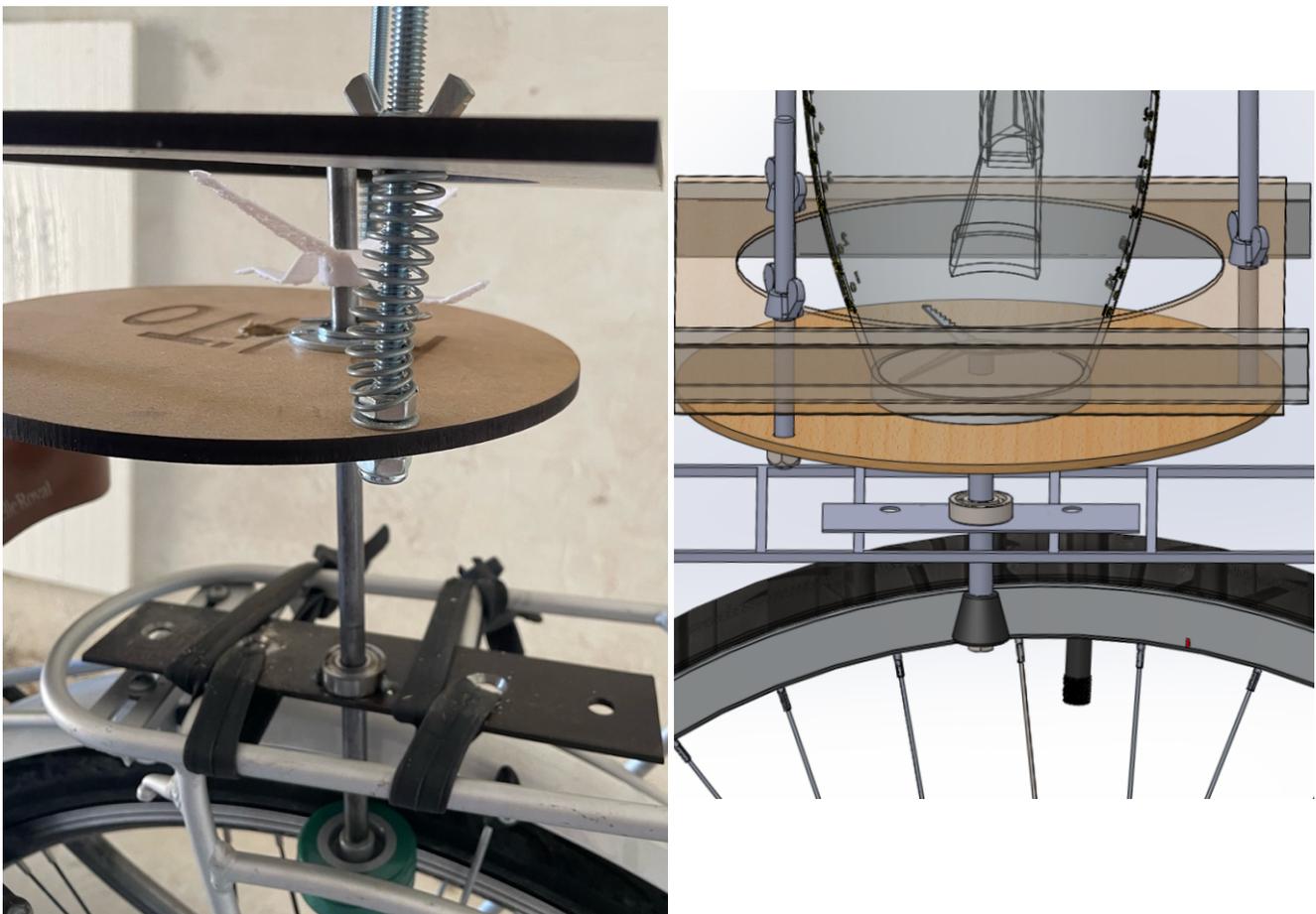


Figura 100 Sistema di trasmissione completo: soluzione 2 (a sx prototipo realizzato, a dx modello 3D completo di frullatore)

In particolare, con l'ausilio di un tachimetro laser, si è andati a misurare la velocità di rotazione dell'asse del frullatore, cercando di mantenere costante la velocità di rotazione della ruota di bicicletta a 70 rpm. Il setup per le misurazioni ha previsto l'applicazione di un contrassegno riflettente all'asse di rotazione del frullatore, con il tachimetro laser appoggiato sul piano fisso del frullatore e puntato verso il contrassegno. La velocità di rotazione è stata rilevata registrando i valori degli rpm a intervalli di 10 secondi. Il tachimetro utilizzato ha una risoluzione di 0,1 rpm fino a 999,9 misurati e di 1 rpm oltre questa soglia.

La figura 101 mostra il sistema durante il test, con l'asse in rotazione e il tachimetro in fase di acquisizione.

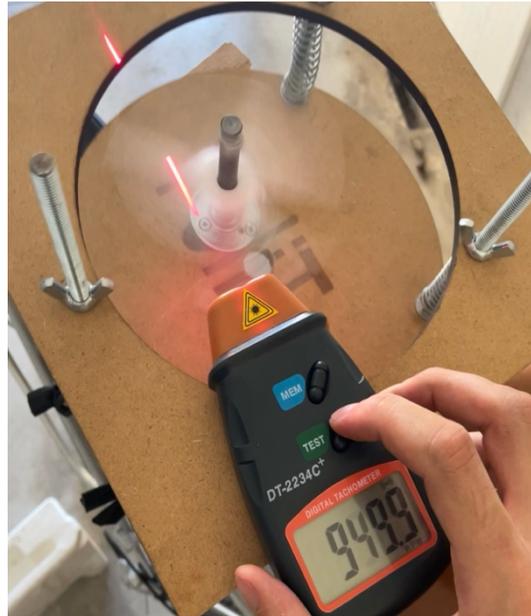


Figura 101 Tachimetro in fase di acquisizione

Il valore di velocità reale utilizzato per il calcolo dell'efficienza è una media dei risultati ottenuti dalle diverse misurazioni, riportati in tabella 13.

| N. misurazione | Valore [rpm] |
|----------------|--------------|
| 1              | 945,1        |
| 2              | 949,9        |
| 3              | 936,5        |
| 4              | 952,6        |
| 5              | 932,2        |
| <b>Media</b>   | <b>943,3</b> |

Tabella 13 Misurazioni di velocità dell'asse del frullatore

Questo dato è stato confrontato con la velocità teorica, calcolata con la formula 18:

$$\omega_{ruotino,teorica} = i \times \omega_{ruota} = 13,97 \times 70 \text{ RPM} = 977,7 \text{ RPM} \quad (18)$$

Da cui è stato possibile calcolare l'efficienza della trasmissione utilizzando la formula 19:

$$\eta = \frac{\omega_{reale}}{\omega_{teorica}} \times 100 = \frac{943,3 \text{ RPM}}{977,7 \text{ RPM}} \times 100 = 96,46\% \quad (19)$$

Nonostante l'elevata efficienza del sistema, è importante evidenziare che le condizioni di test non erano ideali. Le differenze tra le misurazioni della velocità reale potrebbero essere attribuite ad un'incapacità di mantenere costante a 70 rpm la velocità della ruota: poiché questa veniva generata manualmente tramite pedalata, è probabile che ci siano state variazioni involontarie nel ritmo, che hanno influenzato le misurazioni. Queste condizioni devono essere prese in considerazione per avere una lettura più chiara del valore di efficienza riportato in formula 19.

## 4.5 Ottimizzazione del modello

Conclusa la fase di progettazione e analisi del telaio, sono state eseguite diverse migliorie sui componenti allo scopo di migliorare l'esperienza utente e l'usabilità del mezzo: le modifiche sono state eseguite per assicurare la stabilità del carico, facilitare l'aggancio / sgancio del trailer alla bicicletta e stabilizzare orizzontalmente il carrello durante le fasi di inutilizzo. In particolare, le tre modifiche principali sono state le seguenti:

- **Sistema di ancoraggio del carico:** è stato aggiunto un sistema per garantire che il carico rimanga stabile sul pianale durante il trasporto, riducendo il rischio di movimenti non voluti.
- **Cavalletto:** è stato previsto un cavalletto a due gambe saldato o avvitato alla parte anteriore del trailer, dove si distribuisce maggiormente il peso del telaio, per stabilizzarlo orizzontalmente quando il mezzo è in sosta per permettere l'utilizzo del frullatore o non è agganciato alla bicicletta.
- **Meccanismo di aggancio del braccio di traino:** è stato implementato un sistema per fissare il braccio di traino alla ruota e facilitare il montaggio e lo smontaggio del trailer dalla bicicletta, migliorando la praticità e rendendo più veloci le operazioni di allestimento.

Di seguito vengono descritte nel dettaglio le modifiche effettuate e viene presentato il modello finale e la distinta base.

### 4.5.1 Sistema di ancoraggio del carico

Data la mancanza di superfici rigide laterali sul trailer a cui poter fissare tiranti per ancorare le diverse tipologie di carico durante il trasporto, è stata apportata una modifica al pianale di carico del mezzo per integrare un sistema di ancoraggio: questo è stato realizzato in legno per ridurre il peso complessivo rispetto ai pianali in plastica riciclata adottati nel prototipo 1 da Takataka Plastics. Questa scelta comporta un lieve incremento sia dei costi sia dell'impatto ambientale, in quanto si utilizza un componente nuovo e non di riciclo: tuttavia, contribuisce a mantenere il progetto entro le specifiche di peso prefissate e a migliorare la replicabilità del design.

La soluzione adottata per l'integrazione dei sistemi di fissaggio nel pianale prevede l'utilizzo di inserti filettati da 10 mm di lunghezza, con una filettatura esterna M8 e interna M6, facilmente avvitabili nel pianale di legno. Questi inserti consentono l'installazione di viti ad occhiello M6, che fungono da punti di ancoraggio. In figura 102 è mostrato un esempio in sezione di questo meccanismo, per illustrare più chiaramente il suo funzionamento.



Figura 102 Sezione del sistema di fissaggio inserti-viti ad occhiello

Per garantire la modularità del sistema, è stato realizzato un pattern di pre-fori distribuiti uniformemente sul pianale (figura 103), con un diametro di 7 mm, su cui possono essere inseriti gli inserti filettati.

In questo modo, le viti ad occhiello possono essere avvitate nell'inserto più idoneo in funzione della disposizione del carico, permettendo l'utilizzo di tiranti, sia rigidi che elastici, per mantenerlo fermo; questi possono anche essere realizzati usando copertoni di bicicletta esausti o camere d'aria, entrambi facilmente reperibili e a costo zero, ma sufficientemente resistenti per bloccare anche carichi più pesanti.

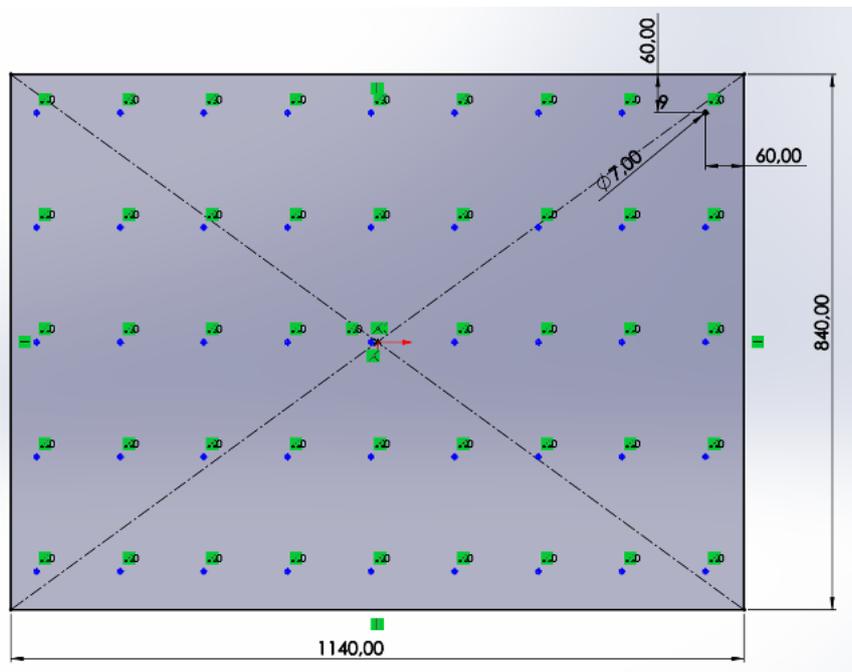


Figura 103 Pattern di pre-fori realizzati sul piano di carico

Infine, gli inserti filettati permettono di fissare facilmente sul piano di carico strumenti utili ai vari utilizzi, come piani di lavoro, contenitori, divisori o un lavabo, nel caso di un utilizzo commerciale del mezzo.

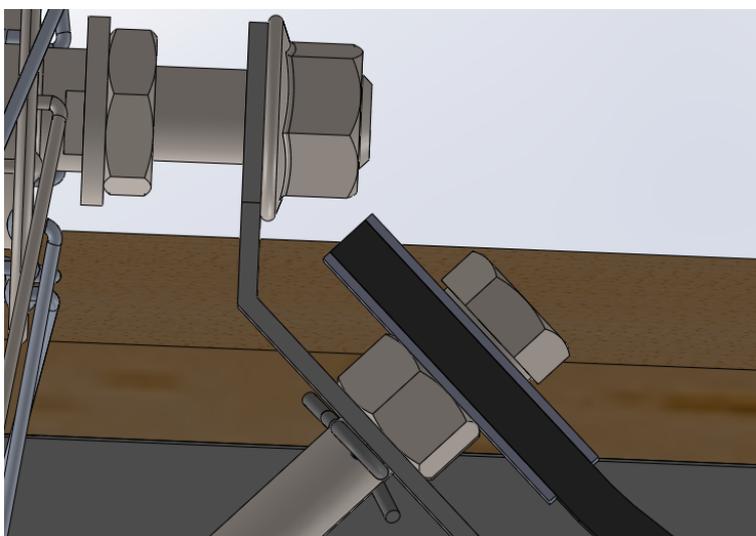
#### 4.5.2 Meccanismo di aggancio del braccio di traino

Come anticipato nel paragrafo 4.3.4, sulla base dei risultati dell'analisi a fatica condotta sul copertone di camion utilizzato come giunto di traino, si è deciso di inserire delle placchette di rinforzo su entrambe le estremità del copertone, nelle zone in cui si trovano i fori di fissaggio. Queste, una volta serrate, permettono di comprimere il copertone, distribuendo meglio le tensioni attorno ai fori e prolungando la vita del componente.

Le due estremità del giunto sono collegate in modo differente alla staffa della bicicletta ed al braccio di traino, in modo da permettere lo sgancio rapido di solo una delle due estremità. Le strutture di fissaggio utilizzate vengono descritte di seguito:

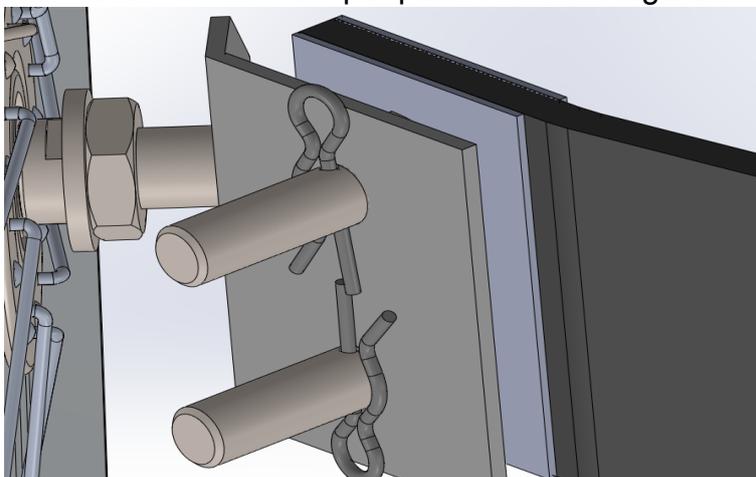
1. **Estremità fissata alla staffa della bicicletta:** per questa estremità, che prevede il meccanismo di sgancio rapido, la struttura può essere descritta in modo migliore suddividendola in due parti.

1. Serraggio delle placchette (figura 104): Le due placche di rinforzo, realizzate in acciaio, vengono posizionate sopra e sotto il copertone, creando un sistema di compressione intorno ai fori di fissaggio. Questo, come già accennato, aiuta a evitare concentrazioni di tensione localizzate e distribuisce uniformemente le sollecitazioni. Due bulloni M10x50 passano attraverso queste placche ed il copertone, comprimendolo, e vengono serrati utilizzando dadi posizionati tra la staffa della bicicletta e la placchetta inferiore.



*Figura 104 Serraggio delle placchette di rinforzo*

2. Fissaggio alla staffa (figura 105): La staffa, collegata alla ruota della bicicletta, è lasciata libera di ruotare attorno all'asse della ruota stessa per adattarsi ai movimenti della bicicletta. I bulloni M10x50, che attraversano le placche e il copertone, servono anche a fissare il sistema alla bicicletta. In corrispondenza della parte inferiore della staffa, vengono inserite due copiglie sui bulloni, per impedire il loro movimento e per permettere uno sgancio rapido.

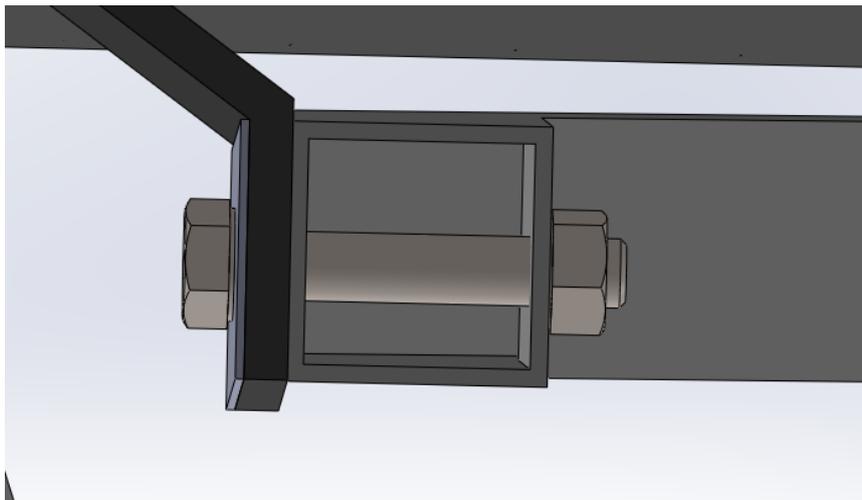


*Figura 105 Fissaggio del copertone alla staffa della ruota*

Questa soluzione è stata ideata sulla base dell'efficacia del sistema di sgancio utilizzato nella progettazione della trasmissione del frullatore.

Questo sistema consente di sganciare facilmente il trailer dalla bicicletta senza dover smontare completamente la struttura, migliorando l'usabilità del mezzo.

2. **Estremità fissata al braccio di traino:** per comprimere il copertone è stata utilizzata una sola placchetta di rinforzo con un singolo foro, poiché la superficie del braccio svolge la funzione di placca interna. La placchetta superiore viene serrata tramite un solo bullone M10x50, che attraversa il copertone e si inserisce nel braccio del trailer, fermato dall'altra parte con un dado autobloccante, che svolge sia la funzione di serraggio che di fissaggio al braccio. Questo sistema, illustrato in figura 106, garantisce una connessione rigida tra il braccio e il copertone.



*Figura 106 Fissaggio del copertone al braccio di traino*

La vista complessiva del meccanismo è stata presentata in figura 58.

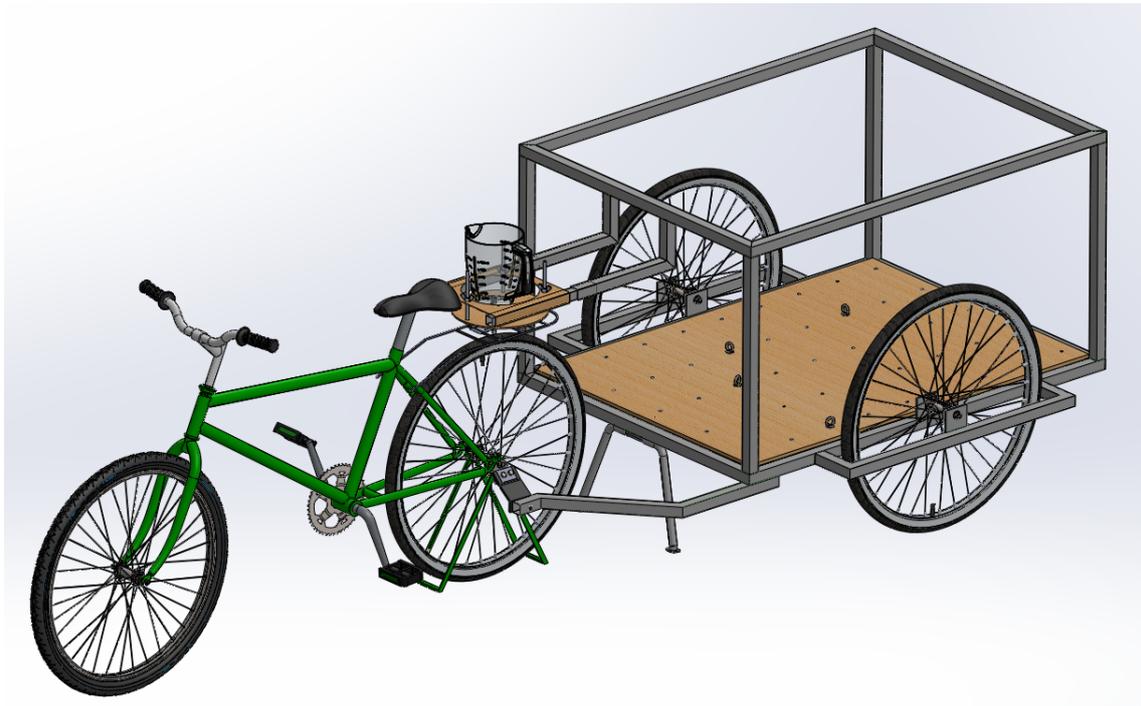
Le placche di rinforzo hanno uno spessore fisso di 2 mm, mentre le altre dimensioni, che nel modello presentato sono 40x80 mm, dipendono dal ritaglio eseguito sul copertone e devono essere tali da poter allineare i fori presenti sulle placche e sul giunto. Inoltre, poiché lo spessore del copertone può variare di molto, essendo un componente di recupero, la lunghezza dei bulloni M10 utilizzati deve essere adattata di conseguenza, al fine di garantire un fissaggio sicuro.

Infine, il funzionamento del sistema durante la partenza della bicicletta può essere descritto come segue: in fase di avviamento, la staffa ruota leggermente all'indietro sotto il peso del trailer, e, quando il ciclista applica una forza sufficiente a superare l'attrito statico, questa viene trasmessa dal giunto al braccio di traino permettendo il movimento del trailer. Il grado di libertà di rotazione della staffa della ruota consente di "assecondare" il movimento della bicicletta, minimizzando i picchi di tensione che si verificherebbero con un fissaggio rigido.

#### 4.5.3 Modello definitivo e distinta base

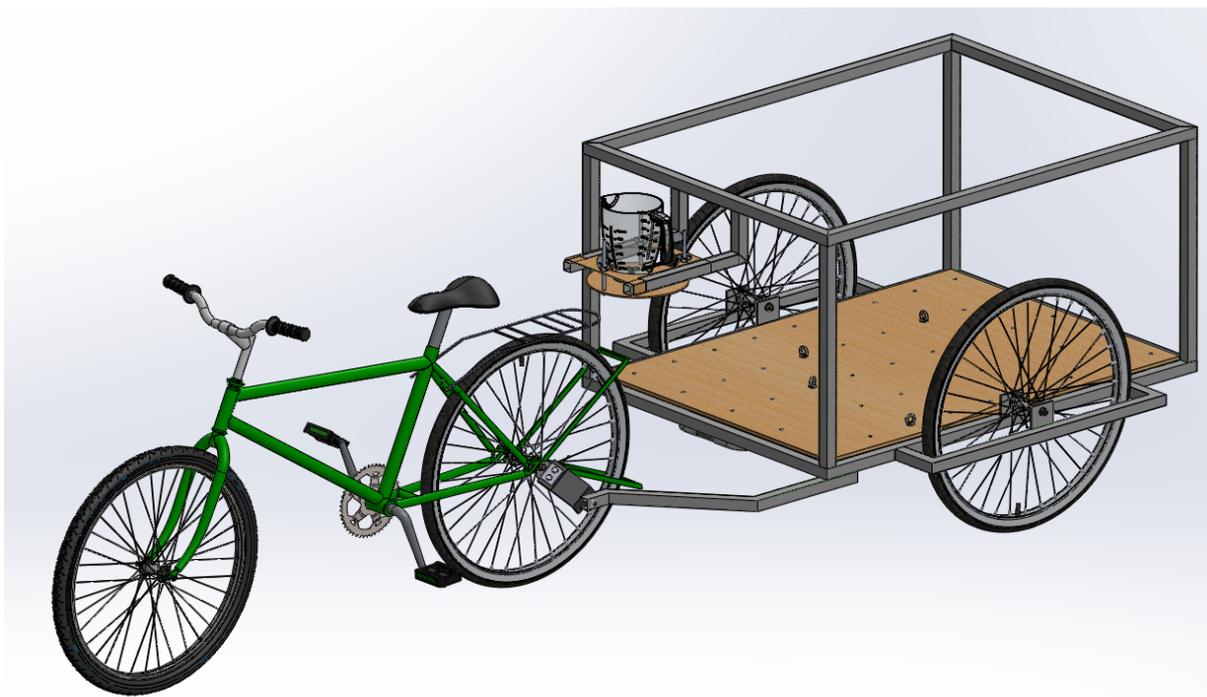
In figura 107 e 108 è illustrato il modello definitivo del trailer collegato alla bicicletta: è stato integrato il sistema di trasmissione del frullatore, come descritto nel paragrafo 4.4.2, ed un cavalletto per rialzare la ruota motrice della bicicletta durante la fase di utilizzo del frullatore. Quest'ultimo componente non è stato progettato nel dettaglio in quanto TakaTaka Plastics ha provveduto al suo sviluppo per il prototipo 1 e non ha riscontrato problematiche nel suo utilizzo. In figura 107 viene mostrata la configurazione del sistema durante la fase di utilizzo

del frullino, quindi con il piano di appoggio dello stesso in configurazione estesa e con il sistema di trasmissione collegato. Per stabilizzare orizzontalmente il carrello, il cavalletto è in configurazione ribassata.



*Figura 107 Concept finale del carrello: configurazione di utilizzo del frullatore*

In figura 108 viene invece mostrato il sistema nella configurazione di moto: in questo caso i due cavalletti, della bicicletta e del carrello, vengono richiusi, mentre il sistema di trasmissione viene smontato dal frullatore e riposto nel vano di carico e, contestualmente, il piano di appoggio riportato in posizione ritratta. Dalla figura si può notare anche il copertone ruotato leggermente in senso antiorario, atto a simulare la fase di partenza della bicicletta in cui questo viene "tirato" dal peso del carrello.



*Figura 108 Concept finale del carrello: configurazione di movimento del sistema*

Per le pareti laterali del trailer, non visibili in figura, si è scelto di utilizzare una rete elettrosaldata per recinzioni, come fatto da Takataka Plastics nel prototipo 2. Questo componente garantisce sia un risparmio sia economico, grazie ai bassi costi di acquisto, sia di peso, poiché anche a fronte di grandi quantità non si raggiungerebbe il peso di una superficie realizzata in legno o plastica. Inoltre, la rete permette di poter facilmente realizzare vani di accesso al carico nelle zone laterali o posteriore, in base alle preferenze degli utilizzatori e alla grandezza delle merci, nonché di affiggere cartelloni pubblicitari per promuovere l'attività commerciale ambulante di produzione di frullati.

Il peso totale della struttura, ad esclusione solamente delle ruote, è di 20,47 kg, lievemente maggiore rispetto al limite imposto di 20 kg, ma considerato accettabile data la presenza degli accessori come il cavalletto in acciaio, che da solo contribuisce ad aumentare il peso di circa 1,8 kg.

Infine, in tabella 14 viene mostrata la distinta base del trailer, con i pesi relativi dei componenti ove disponibili.

| <b>Materiale</b>             | <b>Dimensioni</b> | <b>Quantità</b> | <b>Peso [kg]</b> |
|------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| Profilati in acciaio         | 30x30x1mm         | 14,2 m          | 13,62            |
| Profilati in acciaio         | 30x30x2 mm        | 0,94 m          | 1,34             |
| Profilati in acciaio         | 25x25x1mm         | 0,7 m           | 0,53             |
| Ruote                        | 26"               | 2               | 3,7              |
| Pianale in legno             | 1140x840 mm       | 1               | 1,52             |
| Supporti ruote               | 70x60x5 mm        | 4               | 0,96             |
| Supporti angolari            | 80x80x2 mm        | 4               | 0,20             |
| Cavalletto                   |                   | 1               | 1,85             |
| Piano frullatore fisso       | 250x250x2 mm      | 1               | 0,014            |
| Piano frullatore mobile      | Ø250x2 mm         | 1               | 0,031            |
| Staffa ruota                 |                   | 1               | 0,047            |
| Pezzo di copertone di camion | 160x80x10 mm      | 1               | 0,14             |
| Placche di rinforzo          | 80x40x2 mm        | 3               | 0,15             |
| Bulloni                      | M10x50            | 3               |                  |

|                        |            |    |       |
|------------------------|------------|----|-------|
| Albero di trasmissione | Ø10x130 mm | 1  | 0,073 |
| Barre filettate        | M8x150     | 3  |       |
| Dadi a farfalla        |            | 3  |       |
| Copiglie               |            | 4  |       |
| Ruotino in gomma       | Ø50x8 mm   | 1  |       |
| Vite a testa esagonale | M6x30      | 1  |       |
| Cuscinetto a sfere     | 10x26x8    | 1  |       |
| Dadi                   | M10        | 3  |       |
| Inseri filettati       | M8xM6x10   | 45 |       |
| Viti a occhiello       | M6x10      | 12 |       |

*Tabella 14 Distinta base del trailer*



## 5 Analisi di impatto ambientale ed economico

Questo capitolo descrive le analisi LCA di impatto ambientale ed economica, quest'ultima condotta in riferimento sia all'Italia che all'Uganda, relative al trailer sviluppato. Gli obiettivi di queste analisi sono stati sia valutare l'impatto ambientale del prodotto durante le fasi di produzione, utilizzo, manutenzione e fine vita, utilizzando il metodo GWP 100 per stimare le emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e), sia la sostenibilità economica del progetto. Le emissioni sono state confrontate con quelle di un furgone a benzina attualmente impiegato per gli stessi scopi, mentre l'analisi economica ha esaminato i costi di produzione del trailer in Uganda, mettendoli a confronto con quelli stimati per la produzione in Italia.

### 5.1 Analisi di impatto ambientale LCA

Nell'analisi LCA del trailer, sono state fatte diverse ipotesi operative per stimare le emissioni relative a produzione, utilizzo, manutenzione e fine vita del trailer, con l'obiettivo di rendere i risultati più realistici e confrontabili. Il metodo LCA utilizzato è stato il GWP 100 (Global Warming Potential) per stimare le emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e). Questo approccio è stato scelto per rendere i risultati confrontabili con quelli riportati dalla European Commission (2020) che ha analizzato le emissioni del ciclo di vita di un furgone a benzina in Europa. Nonostante il contesto sia diverso, a causa della mancanza di dati specifici per l'Uganda, si è ritenuto valido l'uso di questo riferimento. Secondo il report, la vita utile del furgone è stimata in 240.000 km, con emissioni medie di 387 gCO<sub>2</sub>e/km considerando l'intero ciclo di vita, e di 210 gCO<sub>2</sub>e/km considerando solo la fase di utilizzo.

Il database ELCD (European Life Cycle Database) è stato utilizzato, all'interno del software *OpenLCA*, per la maggior parte dei dati di emissioni, ma per elementi non presenti nel database, come gli elettrodi di saldatura ed il mix energetico ugandese, sono stati consultati studi e paper aggiuntivi.

Le ipotesi fatte per le diverse fasi di vita del trailer vengono descritte di seguito:

#### - Fase di produzione

- **Profilati in acciaio:** Nel peso dei profilati in acciaio per il calcolo delle emissioni è stato incluso anche quello delle varie staffe utilizzate nel trailer e dei componenti in acciaio delle ruote: il peso totale considerato è di 17,07 kg.
- **Processo produttivo:** sia per i profilati di acciaio che per gli estrusi di alluminio che compongono la ruota sono state considerate nei valori di emissione di CO<sub>2</sub>e le fasi di estrazione, produzione e riciclo.
- **Trasporto dell'acciaio:** per il trasporto dei profilati di acciaio si è considerata la distanza tra il fornitore utilizzato da Takataka, situato a Kampala, e la fabbrica di produzione, situata a Gulu. La distanza risultante è di 335 km.
- **Saldatura SMAW:** per considerare le emissioni di CO<sub>2</sub>e dovute al consumo dell'elettrodo di saldatura si sono utilizzati i dati ricavati da Sproesser (2015), dove l'elettrodo considerato è composto al 62% da materiale di apporto, ed al 38% di rivestimento di protezione e le emissioni totali dovute al suo consumo sono di 3,2 kgCO<sub>2</sub>e/kg di elettrodo.

Tramite il tool online fornito dall'azienda ESAB (2024), sono stati stimati i parametri di saldatura ideali utilizzando un elettrodo da 2 mm: questi sono 18 V e 80 A per la potenza, un tasso di deposito di 0,90 kg/h ed un peso dell'elettrodo di 0,2591 kg/m. I valori sono stati poi inseriti in *Solidworks* che ha restituito un peso totale della saldatura di 1,81 kg, a fronte di una lunghezza del cordone approssimata a 7 m.

Grazie a questi dati è stato possibile stimare il tempo totale di saldatura con la formula 20:

$$t = \frac{1,81 \text{ kg}}{0,90 \text{ kg/h}} = 2,01 \text{ h} \quad (20)$$

Il quale ha permesso di ricavare, tramite la formula 21, il consumo energetico:

$$E = 18 \text{ V} \times 80 \text{ A} \times 2,01 \text{ h} = 2,89 \text{ kWh} \quad (21)$$

- **Emissioni legate al mix energetico:** Il valore delle emissioni di CO<sub>2e</sub> legate al mix di elettricità utilizzato in Uganda, di cui è stato fatto un approfondimento nel paragrafo 1.2.3, è stato ricavato da LowCarbonPower (2022) e vale 0,04644 kgCO<sub>2e</sub>/kWh. Questo valore tiene conto anche delle emissioni legate alle infrastrutture ed al trasporto dell'elettricità e non solo al suo consumo.  
A causa delle frequenti interruzioni di corrente e del conseguente utilizzo di generatori a gasolio, approfondito anch'esso nel paragrafo citato, è stato considerato anche l'impatto ambientale legato all'utilizzo di un generatore da 5 kW. Secondo Jakhrani (2012), le emissioni stimate per questo tipo di generatore sono pari a 1,94 kgCO<sub>2e</sub>/kWh.  
Questi valori, sia per il generatore che per il mix energetico, sono stati utilizzati per stimare le emissioni legate al consumo di elettricità delle operazioni di saldatura. In particolare, si è ipotizzato che metà dell'energia consumata provenga dalla rete elettrica, mentre l'altra metà sia generata attraverso il generatore a gasolio, al fine di rappresentare realisticamente le condizioni di lavoro in Uganda.
- **Copertoni di gomma:** All'interno di questo valore sono stati considerati i copertoni delle ruote di biciclette. Le emissioni relative alla produzione di copertoni di ruote di bicicletta sono state prese dal lavoro svolto da Lin (2016), il quale ha stimato un'emissione di 3,775 kgCO<sub>2e</sub>/kg di copertone prodotto (utilizzando grafene al posto di nerofumo).
- **Giunto di traino:** Questo componente, le cui emissioni sono state calcolate, in modo approssimativo, utilizzando lo stesso dato dei copertoni delle ruote, è stato sottratto alla stima totale, in quanto trattasi di copertoni di camion riciclati che vengono sottratti dall'ambiente.
- **Fase di utilizzo:**
  - **Vita utile del trailer in km:** La vita utile del trailer è stata stimata in 70000 km. A causa della mancanza di dati riferiti a questa tipologia di mezzo, la vita è stata stimata basandosi sulla durata di una bicicletta di alta qualità, stimata in circa 80000 km (Cyclingbeast, 2024), e ridotta leggermente per considerare i maggiori stress meccanici che vengono subiti dal mezzo.
  - **Vita utile in anni:** La vita utile in anni è stata calcolata ipotizzando una percorrenza media giornaliera di 20 km per 365 giorni all'anno, che porta ad una stima di circa 9,5 anni.
- **Manutenzione:**
  - **Copertoni delle ruote:** È stato ipotizzato che i copertoni delle ruote vengano sostituiti ogni 3500 km, per un totale di 20 volte durante il ciclo di vita.
  - **Giunto di traino:** Il giunto di traino, realizzato in gomma riciclata, è stato stimato dover essere sostituito ogni 3 mesi, per un totale di 38 volte. Questo componente, essendo costituito da copertoni di camion riciclato, contribuisce

a ridurre l'impatto ambientale. L'emissione, così come per la fase di produzione, è stata considerata negativa.

- **End-of-life:**

- **Acciaio ed alluminio:** per questi materiali il costo del riciclo è già stato considerato nella fase di produzione.
- **Pianale in legno e giunto di traino:** per questi componenti si è ipotizzato l'incenerimento, poiché in Uganda non sono disponibili tecnologie di riciclo per questi materiali. Per questo processo, nel caso del legno è stato utilizzato il valore di emissione presente nel database ELCD, mentre per il giunto realizzato in copertone si è considerato un valore di emissione pari a 1,90 kgCO<sub>2e</sub>/kg di gomma combusto, ricavato da OpenCO<sub>2</sub> (2024).

I dati, non elaborati, delle emissioni di CO<sub>2e</sub> per ogni processo vengono riportati in tabella 15.

| <b>Processo</b>                           | <b>Quantità</b> | <b>Emissioni [kg CO<sub>2e</sub>]</b> |
|---|-----------------|---------------------------------------|
| Produzione acciaio                        | 17,07 kg        | 20,94                                 |
| Produzione alluminio                      | 1,66 kg         | 13,12                                 |
| Produzione copertoni                      | 1,80 kg         | 6,80                                  |
| Produzione legno                          | 1,57 kg         | 0,05                                  |
| Elettrodo di saldatura                    | 1,81 kg         | 5,79                                  |
| Energia elettrica (Rete elettrica Uganda) | 1,45 kWh        | 0,07                                  |
| Energia elettrica (Generatore a gasolio)  | 1,45 kWh        | 2,81                                  |
| Trasporto acciaio                         | 5858 kg·km      | 0,47                                  |
| Sostituzione copertoni                    | 36,03 kg        | 135,99                                |
| Sostituzione giunto                       | 5,32 kg         | -20,08                                |
| Incenerimento legno                       | 1,57 kg         | 2,69                                  |
| Incenerimento giunto                      | 5,32 kg         | 10,11                                 |
| <b>TOTALE</b>                             |                 | <b>178,76</b>                         |

*Tabella 15 Emissioni di CO<sub>2e</sub> dei processi nel ciclo di vita del trailer*

Questi valori sono stati rielaborati per stimare il contributo percentuale alle emissioni di CO<sub>2</sub>e di ciascuna fase del ciclo di vita. I risultati sono illustrati in figura 109, che evidenzia il contributo delle fasi di produzione, manutenzione e fine vita: la fase di utilizzo, per come sono stati elaborati i dati, comporta un contributo nullo alle emissioni di CO<sub>2</sub>e del mezzo.

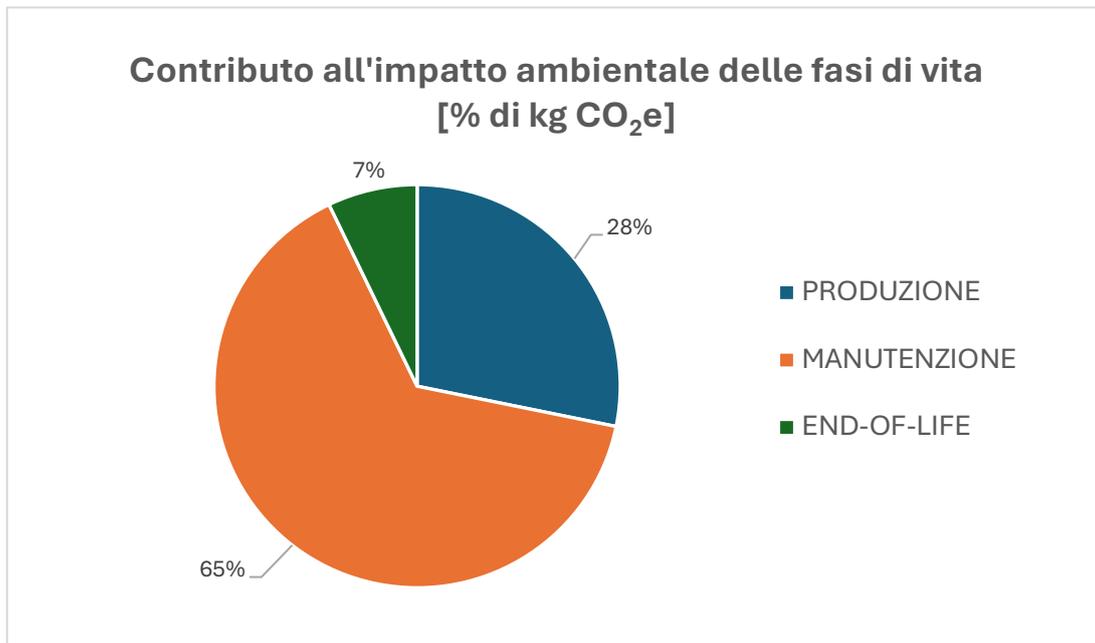


Figura 109 Contributo di emissioni in percentuale delle varie fasi di vita del trailer

Il processo più impattante in termini percentuali risulta la produzione dell'alluminio, con 13,12 kg di CO<sub>2</sub>e emessa per soli 1,66 kg di materiale: questo elevato valore è dovuto ai processi di estrazione e lavorazione dell'alluminio, che richiedono molta energia. Tuttavia, il contributo più significativo in termini assoluti proviene dalla sostituzione degli pneumatici, che rappresenta il 76,07% del totale delle emissioni del ciclo di vita del trailer.

Le emissioni totali del trailer sono state confrontate con quelle del van a benzina, il cui valore di emissione è pari a 387 gCO<sub>2</sub>e/km. Per effettuare un confronto con le stesse condizioni operative, il valore delle emissioni del van è stato rielaborato come segue: prima il valore è stato portato in kgCO<sub>2</sub>e/km. Successivamente è stato moltiplicato per il chilometraggio stimato del trailer, pari a 70000 km, ed infine è stato considerato il carico massimo trasportabile dal trailer, pari a 150 kg, per stimare la percentuale di occupazione del volume di carico del van, ipotizzata al 15%. Il procedimento è illustrato in formula 22:

$$Emissioni\ van = (387\ gCO_2e/km * 0,001) * 70000\ km * 15\% = 4063,5\ kgCO_2e \quad (22)$$

Il risultato delle emissioni totali del van, considerando la percentuale di carico utile, ammonta a circa 4063,5 kg di CO<sub>2</sub>. Confrontando questo dato con le emissioni totali del trailer, pari a 178,76 kg di CO<sub>2</sub>, si ottiene una riduzione percentuale delle emissioni del 95,60%. Questo dimostra il notevole vantaggio ambientale dell'utilizzo del trailer rispetto al van per il trasporto dello stesso carico.

In conclusione, le ipotesi adottate per stimare le emissioni di alcuni componenti, insieme al mancato utilizzo di un database più ampio ed aggiornato, possono aver influenzato l'accuratezza dei risultati ottenuti. Tuttavia, i risultati emersi appaiono comunque realistici e

possono costituire una solida base di partenza per future analisi LCA più dettagliate e conformi agli standard normativi europei.

## 5.2 Analisi economica

L'analisi dei costi del trailer è stata condotta tenendo conto dei prezzi dei materiali e della manodopera in Italia e Uganda. Per l'Italia, i costi dei materiali sono stati ottenuti dalla media dei prezzi delle grandi distribuzioni e dalle acciaierie locali, mentre per l'Uganda sono stati considerati i costi dei materiali utilizzati da Takataka Plastics per la realizzazione del primo prototipo nel 2024, con una maggiorazione del 15% per tenere conto dell'inflazione e dell'aumento dei costi in generale.

Si è ipotizzato un tempo di costruzione del trailer pari ad una giornata lavorativa in cui vengono impiegati due operatori, portando le ore totali di lavoro a 16 ore.

Nella tabella 16, i prezzi per il mercato ugandese sono espressi in scellini ugandesi (UGX), e sono stati convertiti in euro utilizzando il cambio attuale (1 UGX  $\approx$  0,00024 €). I materiali e i costi sono stati stimati come segue:

| Materiale              | Q. tà | Prezzo Italia [€] | Prezzo Uganda [UGX] | UGX →€       |
|------------------------|-------|-------------------|---------------------|--------------|
| Acciaio 1 mm [kg]      | 13,62 | 27                | 69462               | 16,67        |
| Acciaio 2 mm [kg]      | 1,34  | 3                 | 6834                | 1,64         |
| Acciaio 25x25 [kg]     | 0,53  | 1                 | 2703                | 0,65         |
| Ruota 26"              | 2     | 76                | 25000               | 6,00         |
| Cuscinetto             | 1     | 6                 | 6000                | 1,45         |
| Legno                  | 1     | 15                | 25000               | 6,00         |
| Cavalletto             | 1     | 30                | 12000               | 2,88         |
| Minuteria              |       | 20                | 22000               | 5,28         |
| Frullatore             | 1     | 20                | 100000              | 24,00        |
| Albero di trasmissione | 1     | 8                 | 13000               | 3,12         |
| Manodopera             | 16    | 480               | 57143               | 13,71        |
| <b>TOTALE</b>          |       | <b>686</b>        | 342406              | 81,40        |
| Maggiorazione 15%      |       |                   | 393767              | <b>93,60</b> |

Tabella 16 Stima dei costi di realizzazione del trailer in Italia ed in Uganda

Il costo totale in Italia è di 686 €, in linea con i prezzi dei carrelli cargo di dimensioni simili, mentre in Uganda il costo totale stimato, convertito in euro, è di circa 93,60 €. Analizzando la differenza percentuale, si osserva che il costo totale in Uganda è il 13,65% di quello italiano. Questo divario è dovuto principalmente ai costi della manodopera.

In particolare, la manodopera in Italia, con un costo di 30 €/h, rappresenta circa il 70% del costo totale, mentre in Uganda, il costo della manodopera, pari a 3571,43 UGX/h (circa 0,86 €/h), costituisce circa il 16,7% del totale, valore significativamente più basso rispetto all'Italia.

Per un'analisi più accurata, il costo dei materiali in Uganda dovrebbe essere aggiornato considerando i prezzi effettivi odierni.

Infine, l'analisi attuale mostra che il costo stimato risulta ampiamente inferiore rispetto al prezzo di vendita prefissato di 1.000.000 UGX (circa 240 €), permettendo di rendere il trailer più accessibile alla popolazione locale, sia in una logica di autocostruzione, sia se acquistato da associazioni o imprese con un prezzo maggiorato rispetto al costo di produzione.



## 6 Conclusione e sviluppi futuri

Questo lavoro ha riguardato lo sviluppo di un trailer cargo con frullino per l'azienda Takataka Plastics, progettato utilizzando tecnologie appropriate alla realizzazione e utilizzo in contesti rurali e urbani di Paesi come l'Uganda, dove l'accessibilità ai mezzi di trasporto motorizzati e tecnologie costruttive comunemente utilizzate in Europa è spesso limitata. La progettazione del carrello ha richiesto una particolare attenzione nell'assicurare che la costruzione e la manutenzione dello stesso sia facilmente eseguibile con le risorse disponibili localmente, con l'obiettivo di ridurre sia l'impatto economico che ambientale del dispositivo.

Dopo una prima fase di analisi del contesto ugandese e dei prodotti disponibili commercialmente e applicati in un contesto simile, si è passati, con il supporto di TakaTaka, alla stima dei vincoli progettuali, riguardanti sia i processi produttivi che gli scopi di utilizzo. In particolare, la selezione di materiali e componenti, economici e disponibili localmente, ha rappresentato un passaggio fondamentale: l'acciaio al carbonio è stato scelto per la struttura del telaio in quanto unico materiale facilmente reperibile ed economico, le ruote di bicicletta da 26" hanno rappresentato una scelta obbligata per garantire l'universalità del design, ed infine il giunto di traino è stato progettato utilizzando copertoni di scarto di camion, permettendo così di ridurre la complessità del sistema e l'impatto ambientale.

Il processo realizzativo è stato affiancato da analisi agli elementi finiti (FEM) per assicurare che le soluzioni adottate siano in grado di soddisfare le difficili condizioni di utilizzo del luogo e le condizioni di carico del mezzo. In particolare, si sono simulate differenti condizioni critiche come l'urto di una ruota del carrello contro una buca, la partenza su una salita con inclinazione di 20°, o le vibrazioni causate dalla percorrenza di un terreno dissestato: queste analisi hanno permesso di validare l'utilizzo del trailer anche nelle condizioni più difficili. Sul giunto di traino è stata invece eseguita un'analisi di vita a fatica del componente, i cui risultati hanno stimato una durata minima di circa 10000 cicli, ritenuta soddisfacente considerando anche la facile reperibilità del materiale.

Il meccanismo di attuazione del frullatore tramite pedalata ha richiesto di progettare diverse soluzioni per garantire la corretta funzionalità del dispositivo: per verificarla, è stato realizzato un prototipo utilizzando solamente tecnologie appropriate al contesto ugandese. Su questo sono stati poi eseguite dei test per verificare l'efficienza del sistema ed eventuali perdite di potenza.

Per verificare la sostenibilità ambientale del dispositivo, al termine del processo di design è stata eseguita un'analisi di tipo Life Cycle Assessment (LCA): questa ha permesso di individuare come fase più significativa, in termini di emissioni di CO<sub>2</sub>e, quella di manutenzione del sistema. Le emissioni del ciclo-vita del mezzo sono state poi confrontate con quelle di un furgone alimentato a benzina, mezzo utilizzato ad oggi per gli stessi scopi di utilizzo del carrello, individuando un'importante riduzione dell'impatto ambientale se le operazioni effettuate con il furgone vengono sostituite dal mezzo progettato.

Infine, l'analisi economica eseguita sul processo costruttivo del carrello ha confermato che le scelte adottate permettono di mantenere un basso costo di produzione, addirittura inferiore rispetto al costo massimo stabilito da TakaTaka.

Sono stati previsti sviluppi futuri ed aggiunte al sistema, allo scopo di migliorare l'usabilità dello stesso. Ad esempio, nell'utilizzo del carrello per la produzione e la vendita di frullati, il pianale di carico potrebbe ospitare un piano di lavoro per il taglio della frutta ed un lavabo removibile, fissabili tramite viti sugli inserti filettati presenti sul piano di carico, con l'obiettivo di rendere più pratiche le operazioni di pulizia e preparazione. La rete elettrosaldata utilizzata per le pareti laterali potrebbe anche fungere da supporto per affiggere cartelloni pubblicitari, migliorando così la promozione dell'attività ambulante.

Per gli utilizzi di trasporto merci o raccolta dei rifiuti, lo stesso sistema di ancoraggio a inserti filettati potrebbe consentire di agganciare contenitori, eventualmente realizzati in plastica riciclata da TakaTaka, per suddividere il carico in base alla tipologia di materiali trasportati. Infine, nell'utilizzo del sistema per la raccolta dei rifiuti, il meccanismo di trasmissione utilizzato per il frullino potrebbe essere modificato per integrare un tritatore meccanico di bottiglie di plastica direttamente presso le stazioni di raccolta: questo ridurrebbe il volume di materiale da trasportare e permetterebbe di ottimizzare il processo di trattamento dei rifiuti presso gli stabilimenti di TakaTaka, riducendo i tempi di trattamento ed ampliando la capacità produttiva.

In conclusione, il sistema carrello-frullino sviluppato come oggetto di questo lavoro rappresenta una soluzione resistente, economica e sostenibile, progettata in conformità alle tecnologie appropriate per il contesto ugandese, ed uno strumento adeguato per rispondere a diversi degli obiettivi *SDG*, come l'obiettivo uno "*No poverty*" o l'obiettivo undici "*Sustainable Cities and Communities*".



## Bibliografia

Adams, V., Askenazi, A., 1999. *Building Better Products with Finite Element Analysis*. OnWord Press, Santa Fe, NM.

Al-Raheem, S., Jweej, M., Hassan, A., 2021. *Design and Construction of Device for Rubber Material Fatigue Test*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1094. 012173. DOI: 10.1088/1757-899X/1094/1/012173.

Anyanwu, S., Anthony, A.E., 2016. *Design and Fabrication of a Pedal Operated Power Generator*. Innovative Systems Design and Engineering, 7, pp. 01-14.

Autori di Wikipedia, 2024. *Uganda*. Wikipedia, L'enciclopedia libera. <https://it.wikipedia.org/wiki/Uganda>. Consultato il 02/04/2024.

Baiskeli Uganda, 2024. *Progetto Baiskeli realizzato a Gulu, Uganda – Iniziativa dell'Ing. Marcello Rava*.

Berkeley, 2020. *PhD student turns recycled plastic into face shields for Ugandan medics*. UC Berkeley Research. <https://vcresearch.berkeley.edu/news/phd-student-turns-recycled-plastic-face-shields-ugandan-medics>. Consultato il 03/04/2024.

Bijli Bicycle, 2016. *Side Project 1: Pedal Powered Blender*. <https://bijlibicycle.wordpress.com/2016/07/20/side-project-1-pedal-powered-blender/>

Branch, A., 2009. *Humanitarianism, Violence, and the Camp in Northern Uganda*. Civil Wars. 11. 477-501. DOI: 10.1080/13698240903403857.

Camacho, R., Recchia, E., Kracht, P., 2021–2024. *Bike blender*. Appropedia. [https://www.appropedia.org/Bike\\_blender#cite\\_note-5](https://www.appropedia.org/Bike_blender#cite_note-5). Consultato il 27/03/2024

Cargo Bike Festival, 2023. *Powering New African Mobility: with Valerie Labi*. International Cargo Bike Festival. <https://cargobikefestival.com/features/bycs-perspectives-powering-new-african-mobility-with-valerie-labi/>. Consultato il 07/04/2024.

Cargobike for Africa, 2024. *“Technical development-education program”*. <http://www.cargobike.africa/index.html>. Consultato il 06/04/2024.

Ciclofficina Sociale, 2024. *“Baiskeli – Coltiva biciclette insieme a noi”*. <https://www.ciclofficinasociale.com/baiskeli/>. Consultato il 06/04/2024.

CityChanger CargoBike, 2019. *20 Good Reasons to Ride a Cargo Bike*. [www.cyclelogistics.eu](http://www.cyclelogistics.eu).

CooP-Africa, 2024. *“Our Story”*. Cycling out of poverty – a bike makes the difference. <https://www.coop-africa.org/en/our-story/>. Consultato il 06/04/2024.

Cyclingbeast, 2024. *“How Long Do Bikes Last? (And Lifespan of Common Components)”*. <https://cyclingbeast.com/how-long-bikes-last/>. Consultato il 24/08/2024.

D'Hondt, J., Juwet, M., Demeester, E., & Slaets, P. (2022). *Development of an Electric Tricycle for Service Companies and Last-Mile Parcel Delivery*. *Transport Problems*, 17(2), 175-187. DOI: 10.20858/tp.2022.17.2.15.

De Decker, K., 2011. *Pedal powered farms and factories: The forgotten future of the stationary bicycle*. *Low-Tech Magazine*. <https://solar.lowtechmagazine.com/2011/05/pedal-powered-farms-and-factories-the-forgotten-future-of-the-stationary-bicycle/>. Consultato il 08/04/2024

Eickmans, L., 2022. *The Coop-Bike: a cargo bike for Africa*. *International Cargo Bike Festival*. <https://cargobikefestival.com/features/coop-africa-blog-1-the-coop-bike-a-cargo-bike-for-africa/>. Consultato il 06/04/2024

EN 15194:2017+A1:2023. *Cycles - Electrically power assisted cycles - EPAC Bicycles*. European Committee for Standardization.

EN 17860-5:2024. *Carrier cycles - Part 5: Electrical aspects*. European Committee for Standardization.

ESAB, 2024. *Quick Weld Productivity Analyzer (QWPA)*. ESAB Saldatura S.p.A. [https://esab.com/it/eur\\_it/support/tools/calculators/quick-weld-productivity-analyzer/](https://esab.com/it/eur_it/support/tools/calculators/quick-weld-productivity-analyzer/)

European Commission, Directorate-General for Climate Action, Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S., Nokes, T. et al., 2020. *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA: Final report*. Publications Office of the European Union, 2020. DOI: 10.2834/91418

Faizah, R., Priyosulistyo, H., Aminullah, A., 2019. *The Properties of Waste Rubber Tires in Increasing the Damping of Masonry Wall Structure*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 650. 012041. DOI: 10.1088/1757-899X/650/1/012041

Goodfellow, T., 2022. *Book Review: Uganda: The Dynamics of Neoliberal Transformation by Jörg Wiegratz, Giuliano Martiniello and Elisa Greco*. *Africa Spectrum*, 57(3), 343-345. DOI: 10.1177/00020397221132567

Greenfoot Africa, 2024. "About Us". <https://greenfoot.africa/about-us/>. Consultato il 07/04/2024

Gregory, J., 2019. "How Much Electricity Can a Human Generate?". *PedalPC.com*. <https://www.pedalpc.com/blog/how-much-electricity-can-human-generate/>. Consultato il 12/04/2024

Hazeltine, B., Bull, C., 2003. *Field Guide to Appropriate Technology*. Academic Press, New York.

Heinrich Böll Foundation, 2021. *The European Mobility Atlas 2021 (2nd ed.)*. ISBN 978-9-46400743-5

Human Rights Watch, 2005. *Uprooted and Forgotten: Impunity and Human Rights Abuses in Northern Uganda*. Human Rights Watch, New York.

- IEA, 2023. *Uganda 2023 - Energy Policy Review*. International Energy Agency. <https://memd.go.ug/wp-content/uploads/2020/07/Uganda2023-Energy-Policy-Review.pdf>.
- ISO 4210:2023. *Cycles — Safety requirements for bicycles*. International Organization for Standardization.
- ISO 8608:2016. *Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data*. International Organization for Standardization.
- Jakhrani, A., Rigit, A., Othman, A., Samo, S., Kamboh, S., 2012. *Estimation of Carbon Footprints from Diesel Generator Emissions*. Proceedings of the 2012 International Conference in Green and Ubiquitous Technology, GUT 2012. DOI: 10.1109/GUT.2012.6344193.
- Kampala Cycling, 2024. “Club”. Kampala Cycling. <https://www.kampalacycling.com/#club>. Consultato il 02/04/2024.
- Kennedy, J., Oakley, C., Sumon, S.K., Parry, I., Wilkinson, E., & Brown, J., 2004. *Impact of road humps on vehicles and their occupants*. Transport Research Laboratory, 004. Crowthorne, U.K.: TRL.
- Kirkels, M., 2016. *Short history of the cargo bike*. International Cargo Bike Festival. <https://cargobikefestival.com/news/short-history-of-the-cargo-bike/>. Consultato il 06/04/2024.
- Li, Z., Kolmanovsky, I., Atkins, E., Lu, J., Filev, D., 2015. *Road anomaly estimation: Model based pothole detection*. American Control Conference (ACC), Chicago, IL, USA, 2015, pp. 1315-1320, DOI: 10.1109/ACC.2015.7170915.
- Lin, T.-H., Chien, Y.-S., Chiu, W.-M., 2016. *Rubber tire life cycle assessment and the effect of reducing carbon footprint by replacing carbon black with graphene*. International Journal of Green Energy, 14(1), pp. 97–104. DOI: 10.1080/15435075.2016.1253575.
- Lombaert, G., Degrande, G., 2003. The experimental validation of a numerical model for the prediction of the vibrations in the free field produced by road traffic. *Journal of Sound and Vibration*, 262(2), 309-331. DOI: 10.1016/S0022-460X(02)01048-9
- LowCarbonPower, 2022. “Electricity in Uganda in 2022”. <https://lowcarbonpower.org/region/Uganda>
- Mayapedal, 2010. *Pedal Powered Blender*. <http://www.mayapedal.org/Blender.pdf>
- Micah, L., 2023. *The NYC DOT Is Taking Action to Authorize Larger Pedal-Assist Cargo Bikes for Deliveries*. Bicycling. <https://www.bicycling.com/news/a44831711/nyc-dot-larger-pedal-assist-cargo-bikes/>. Consultato il 10/04/2024.
- Ministry of Works and Transport, 2013. *Non-Motorised Transport Policy*. Ministry of Works and Transport, Uganda.
- Ministry of Works and Transport, 2022. *Road Transport*. Ministry of Works and Transport, Uganda. <https://www.works.go.ug/resources/news-impact/item/81-road-transport>.

Morris, J. A. (2008). *Design with the Majority: The Collaborative Design of a Cargo Bicycle for Uganda*. INNOVATION: Winter 2008, Vol. 27, p.45.

NatuReS, 2021. *Plastic Banks in Gulu City for Increased Recycling*. Nature Stewardship. <https://nature-stewardship.org/uncategorized/plastic-banks-in-gulu-city-for-increased-recycling/>. Consultato il 02/04/2024.

Okoye Onyinye V., et al., 2021. *Performance Evaluation of Pedal Powered Generator for Energy Generation in Nnewi, Anambra State*. IOSR Journal of Applied Physics (IOSR-JAP), 13(2), pp. 01-05.

OpenCO<sub>2</sub>, 2024. "Rubber waste, combustion". <https://www.openco2.net/en/emission-factors/waste/rubber-waste-combustion/423>

Prażnowski, K., Mamala, J., 2016. *Classification of the road surface condition on the basis of vibrations of the sprung mass in a passenger car*. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 148 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/148/1/012022

Rinasclta, 2024. "Bike Wheels". [Rinasccltabike.com. https://rinasccltabike.com/category/bike/parts/wheels/](https://rinasccltabike.com/category/bike/parts/wheels/). Consultato il 23/04/2024.

Rock the Bike, 2024. *Fender Blender Pro*. <https://rockthebike.com/shop/bike-blenders/fender-blender-pro/fender-blender-pro/>. Consultato il 06/04/2024.

ScienceDirect, 2024. *Appropriate Technology – definition based on "Field Guide to Appropriate Technology, 2003"*. <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/appropriate-technology>

Siemens Stiftung, 2024. "ZELO e-Cargo bikes". <https://empowering-people-network.siemens-stiftung.org/solutions/e-cargo-bikes/>. Consultato il 08/04/2024.

Sproesser, G., Chang, YJ., Pittner, A., Finkbeiner, M., Rethmeier, M., 2017. *Sustainable Technologies for Thick Metal Plate Welding*. In: Stark, R., Seliger, G., Bonvoisin, J. (eds) Sustainable Manufacturing. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-48514-0\_5

Sykes, I., 2023. *What is a cargo bike? Everything you need to know*. Cyclingnews. <https://www.cyclingnews.com/features/cargo-bikes/>. Consultato il 03/04/2024.

TakaTaka Plastics, 2024. *About Us*. <https://www.takatakaplastics.com/about-us>. Consultato il 28/03/2024.

The Guardian, 2015. *Kampala: Uganda's Cycling Boom is Turning the City into a Bike-Friendly Haven*. <https://www.theguardian.com/world/2015/aug/21/kampala-uganda-cycling-bike-friendly-city>. Consultato il 30/04/2024.

UNDP, 2022. *Socio Economic Update of Uganda - First Edition, October 2022*. United Nations Development Programme.

United Nations, 2024. *Sustainable Development Goals*. <https://sdgs.un.org>.

WHO, 2023. *Uganda – Data overview*. World Health Organization. <https://data.who.int/countries/800>

Wilson, D.G., 2004. *Bicycling Science*. The MIT Press, Cambridge.

World Bank, 2020b. *Tackling the Demographic Challenge in Uganda*. World Bank, Washington, DC.

Worldbank, 2020a. *“Uganda Economic Update”*. World Bank, Washington, DC. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/571011581515307951/pdf/Uganda-Economic-Update-14th-Edition-Strengthening-Social-Protection-to-Reduce-Vulnerability-and-Promote-Inclusive-Growth.pdf>