

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Relazione per la prova finale
**«PROGETTO DI UNA TRASMISSIONE DI
UN PROPULSORE ELETTRICO»**

Tutor universitario: Prof. Matteo Massaro

Laureando: Lorenzo Conte

Padova, 23/09/2024

Obiettivi

- Realizzare il progetto di una trasmissione di un veicolo elettrico con l'ausilio del tool Romax.

Procedimento

1. Determinazione dei parametri di progetto
2. Modellazione del motore elettrico
3. Disegno della trasmissione
4. Progettazione delle ruote dentate
5. Completamento della geometria della trasmissione
6. Inserimento dei cuscinetti
7. Valutazione dei costi
8. Valutazione dell'efficienza
9. Valutazione degli ordini di eccitazione
10. Inserimento del ciclo di guida

Prestazioni richieste dal veicolo

- Velocità massima: 161 km/h
- Accelerazione: 0-100 km/h in 7,9 s
- Prestazioni in pendenza: 25 km/h a 20°
- Autonomia: 280 km
- Massa massima della trasmissione: 60 kg
- Spazio disponibile: 1m (w) x 0,6m (d) x 0,7m (h)



Parametri motore

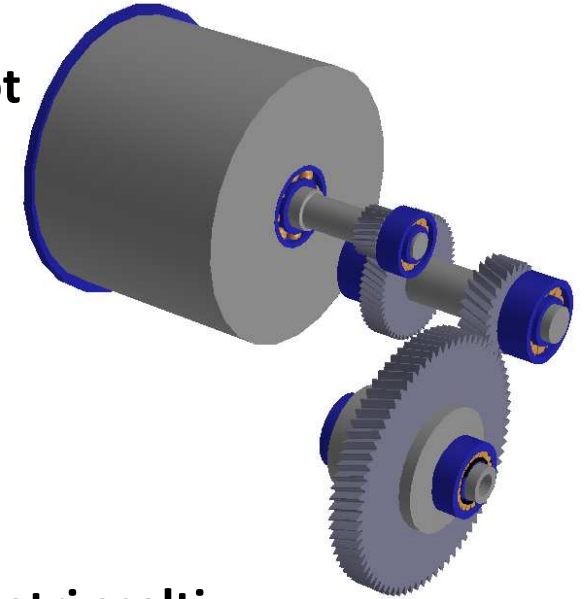
- Motore a magneti permanenti
- 8 poli
- 48 slots
- Materiale magnete: FeNdB
- Diametro esterno massimo: 250 mm

Parametri trasmissione

- Trasmissione a una velocità a due stadi
- Durata: 50.000 h
- Lubrificante: ISO VG 320, -/13/10 @70°C
- Materiale alberi: C40
- Materiale ruote dentate: acciaio temprato, AGMA grado 2
- Efficienza: >93%
- Dimensioni: 423(d)x252(w)x350(h)

Dimensioni veicolo (Peugeot e-208)

- Dimensione pneumatici: 195/55 R16
- Massa: 1910 kg
- Dimensioni: 4055x1745x1430



Parametri scelti:

- rapporto di trasmissione: 8:1
- velocità di rotazione massima: 11100 rpm
- coppia massima: 280 Nm
- velocità di rotazione nominale: 4250 rpm
- potenza nominale: 125 kW

Per progettare il motore si utilizza JMAG, un software di progettazione per apparecchiature elettriche in cui si può accedere direttamente da Romax. Dopo aver inserito i parametri voluti è possibile valutare la mappa dell'efficienza e della potenza del modello ottenuto.

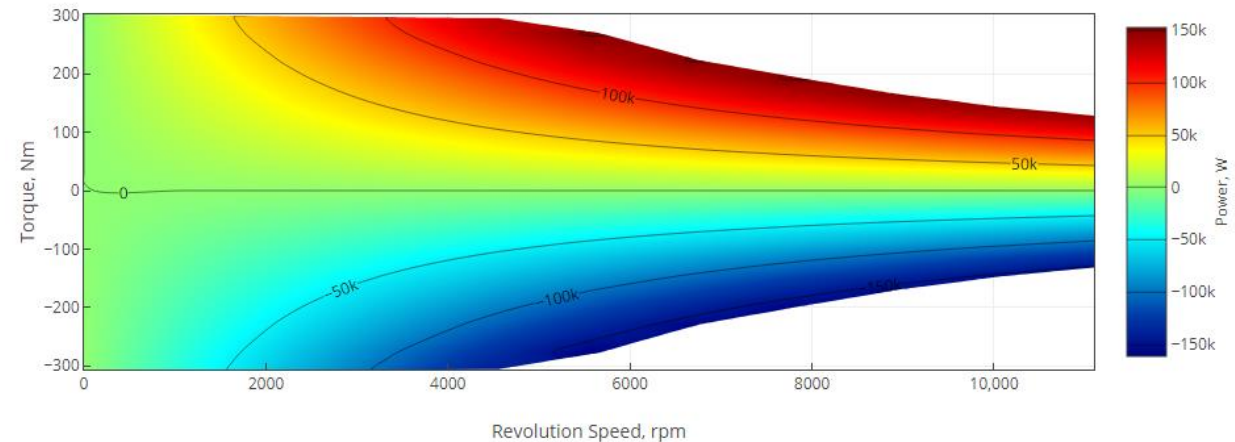
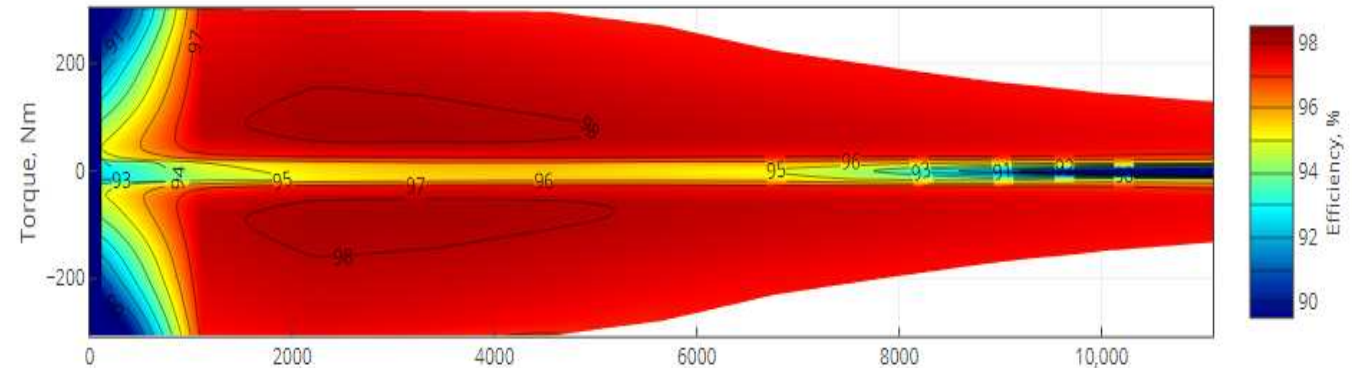
Targeted Value

<input checked="" type="checkbox"/> Rated Power, kW	<input type="text" value="125"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Maximum Torque, Nm	<input type="text" value="280"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Rated Revolution Speed, rpm	<input type="text" value="4250"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Maximum Revolution Speed, rpm	<input type="text" value="11100"/>

Sizing Parameter

<input checked="" type="checkbox"/> Number of Poles	<input type="text" value="8"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Number of Slots	<input type="text" value="48"/>
<input type="checkbox"/> Power Supply Voltage(RMS), V	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Maximum Current(RMS), A	<input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Maximum Outer Diameter of Motor, mm	<input type="text" value="250"/>
<input type="checkbox"/> Maximum Motor Height, mm	<input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Winding	<input type="text" value="Distributed Winding"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Magnet	<input type="text" value="Neodymium"/>

Create the recommended geometry.
The dimensions, materials, winding and drive condition are updated by the sizing operation.



Si compie una modellazione iniziale agli alberi e successivamente si aggiunge il carico alla trasmissione.

Edit Load Case

Name: Description:

Duration: hrs

Defined				Calculated			
Name	Speed (rpm)	Torque (Nm)	Power (kW)	Name	Relative Power	Speed (rpm)	Torque (Nm)
Rotor 1	4,250.00	280.000	124.617	Power Load 1	×	527	-226

Primary input power load:

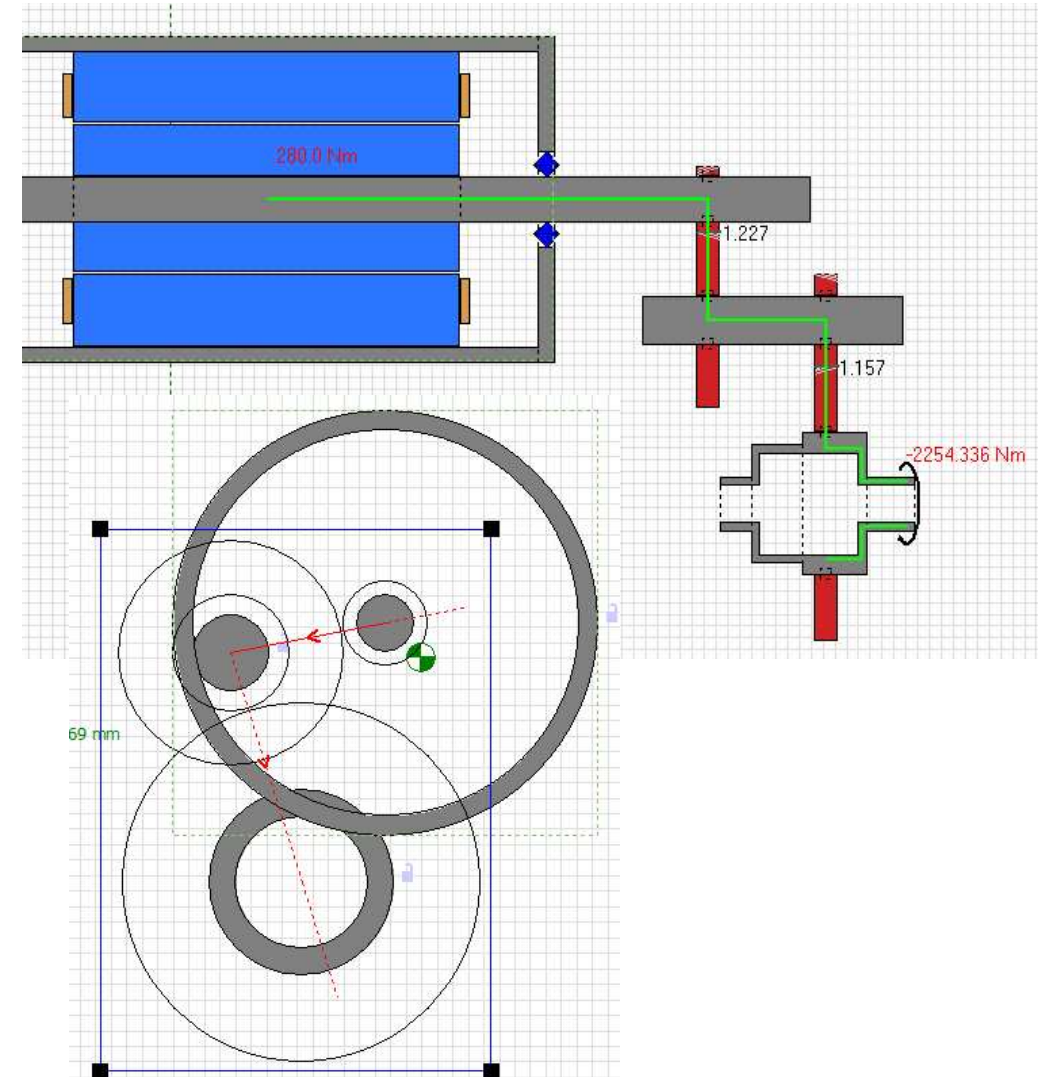
Linked Loads

A	B

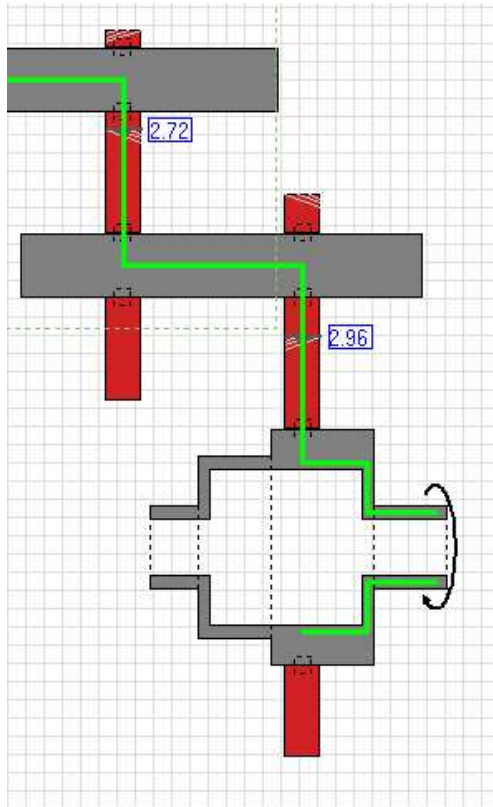
Define by:

Factors Percentage Fractions

A = % of B



Fase 1 (diametri primitivi)



In questa fase è possibile inserire il rapporto di trasmissione dello stadio in considerazione che insieme all'interasse inserito precedentemente serve per calcolare i diametri primitivi delle ruote.

Inoltre se si sceglie di progettare delle ruote elicoidali è possibile scegliere il verso dell'elica in base ai versi delle forze assiali prese in esame.

Si sceglie il verso in modo tale che le forze siano dirette verso lo spallamento delle ruote.

Loading Design | Concept Design | Detailed Design

Gear set name:

Description:

Pressure angle: deg

Helix angle: deg

Hand of Gear 1:

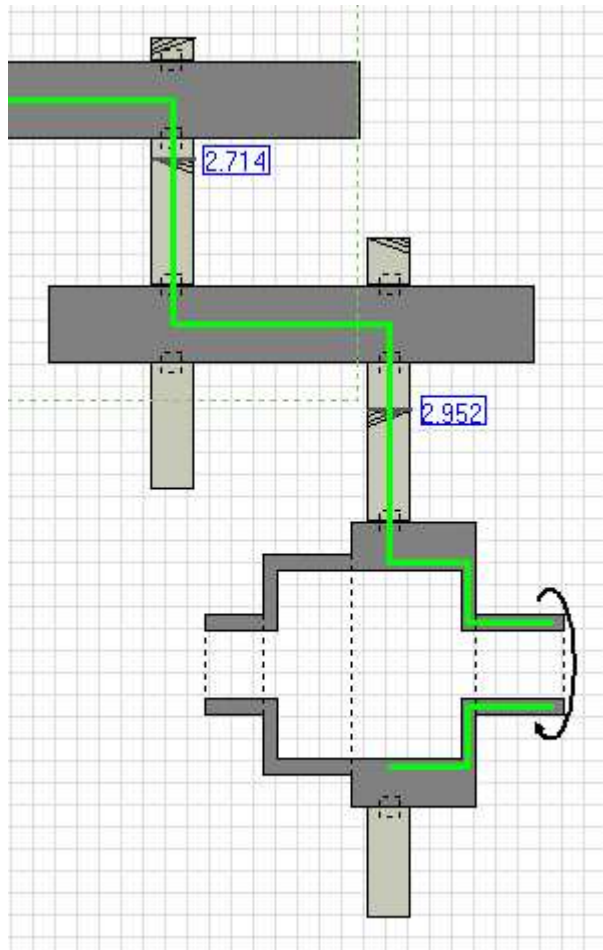
Gear 2 Gear ratio: =

Gear 1

	Name	Face width (mm)	Mean pitch diameter (mm)
<input checked="" type="checkbox"/>	Gear 1	25.000	54.839
<input checked="" type="checkbox"/>	Gear 2	25.000	149.161

Shaft	Gear	Helix Angle (deg)	Hand	Load case	
				Load case 1 (N)	Load case 2 (N)
albero intermedio	Gear 2 @ 65.000 mm	19.000	Right	3506.1	1502.6
	Gear 3 @ 164.000 mm	19.000	Right	-6720.1	-2880.0
	Total (N)			-3213.9	-1377.4
albero motore	Gear 1 @ 624.000 mm	19.000	Left	-3506.1	-1502.6
	Total (N)			-3506.1	-1502.6
differenziale	Gear 4 @ 89.000 mm	19.000	Left	6720.1	2880.0
	Total (N)			6720.1	2880.0

Fase 2: (numero di denti)



In questa fase si inserisce il modulo unificato e il rapporto di trasmissione desiderato. In questo caso il software calcola il numero di denti e il rapporto di trasmissione risultante.

La scelta del modulo va fatta tenendo in considerazione che, per motivi di ingranamento, è preferibile che la ruota minore abbia almeno 18 denti.

Loading Design Concept Design Detailed Design

Module / Tooth Numbers

Ratio and secondary gear teeth

Tooth numbers

Ratio and Module

Primary gear: Gear 2

Secondary gear: Gear 1

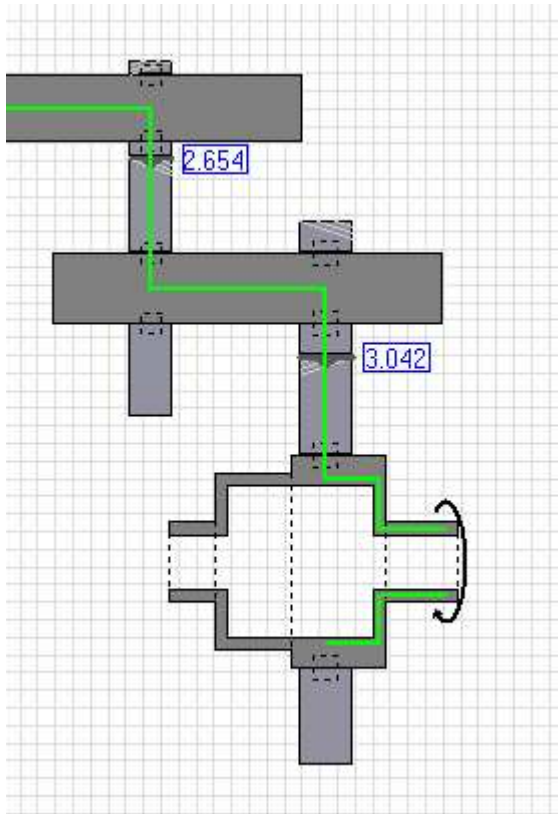
Ratio definition

Primary gear	Desired gear ratio:	2.720
Secondary gear	Actual gear ratio:	2.714

Normal module: 2.50000 mm

Name	Teeth
Gear 1 Secondary gear	21
Gear 2 Primary gear	57

Fase 3: (ruote totalmente definite)



In questa fase è possibile inserire un intervallo di vari parametri tra cui: modulo, larghezza ruota, interasse, angolo di pressione, angolo d'elica; successivamente, grazie ad un calcolatore, il software restituisce vari design delle ruote, in relazione al numero di parametri inseriti e al numero di step da calcolare per ogni intervallo. Per ogni design calcola vari valori riguardanti la geometria e l'accoppiamento delle ruote.

Basic geometry

Centre distances and teeth number
 Centre distances, module and ratio
 Module and teeth number

Face width: Minimum: 25.000 Maximum: 25.000 mm Steps: 1
 Gear module: Minimum: 2.00000 Maximum: 2.00000 mm Steps: 1
 Gear ratio: Minimum: 2.650 Maximum: 2.670 Gear 1 -> Gear 2

Name	Min CD (mm)	Max CD (mm)	Steps:
Gear 1 -> Gear 2	102.000	102.000	1

Name	Min teeth	Max teeth	Design Method	Selected Tool
Gear 1	26	27	Design for maximum contact ratio	
Gear 2	69	71	Design for maximum contact ratio	

Ignore integer tooth ratios Steps: 1

Involute geometry

Helix angle: Minimum: 18.000 Maximum: 22.000 deg Steps: 5
 Pressure angle: Minimum: 18.000 Maximum: 22.000 deg Steps: 5
 Profile shift coeff: (Gear 1) Minimum: -0.5 Maximum: 0.5 Steps: 10
 Calculated profile shift coeffs

Normal backlash: 0 mm 250 designs

Geometry results are up to date Generate Designs

In questo lucido è possibile vedere un estratto della tabella dei design restituiti dal software, e un riassunto della geometria delle ruote dentate.

Selection Criteria	Axial Contact Ratio: (none)	Gear 1 Bending Safety Factor (none)	Gear 1 Contact Safety Factor (none)	Gear 2 Bending Safety Factor (none)	Gear 2 Contact Safety Factor (none)
076	0.0	1.295	1.372	1.177	1.389
077	0.0	1.295	1.403	1.172	1.399
078	0.0	1.295	1.428	1.167	1.404
079	1.72797796928632e-2	1.295	1.444	1.161	1.404
080	3.32786253637372e-2	1.295	1.452	1.156	1.400
081	0.0	1.295	1.181	1.173	1.197
082	1.15952541845424e-3	1.295	1.221	1.181	1.240
083	6.6427419458286e-3	1.295	1.268	1.180	1.278
084	1.70871806634036e-2	1.295	1.314	1.176	1.310
085	3.16755557512564e-2	1.295	1.353	1.172	1.336
086	4.91862653526698e-2	1.295	1.385	1.167	1.357
087	6.57433405284694e-2	1.295	1.409	1.162	1.373
088	7.71295847287003e-2	1.295	1.426	1.157	1.383
089	8.21586079454131e-2	1.295	1.434	1.152	1.388
090	7.95407608967441e-2	1.295	1.434	1.146	1.388
091	0.0	1.295	1.193	1.175	1.136
092	0.0	1.295	1.244	1.172	1.183
093	8.31517639209676e-3	1.295	1.291	1.169	1.226
094	2.8928921341337e-2	1.295	1.331	1.165	1.264
095	5.19403386448685e-2	1.295	1.364	1.161	1.296
096	7.21579636476611e-2	1.295	1.390	1.156	1.323
097	8.59419046720332e-2	1.295	1.408	1.152	1.344
098	9.10251055307783e-2	1.295	1.417	1.147	1.359
099	8.68162714430602e-2	1.295	1.417	1.141	1.369
100	7.44256486385536e-2	1.295	1.409	1.136	1.374
101	0.0	1.361	1.226	1.096	1.485
102	0.0	1.361	1.277	1.107	1.500
103	0.0	1.361	1.325	1.117	1.509
104	0.0	1.361	1.370	1.127	1.513
105	0.0	1.361	1.412	1.137	1.511

Individual gear geometry

Gear:	Gear 1	Gear 2
Number of teeth:	26	69
Profile shift coefficient:	0.2778	0.5157
Generating profile shift coeff:	0.2778	0.5157
Working pitch diameter: (mm)	55.832	148.168
Reference pitch circle diameter:(mm)	54.996	145.952
Face width: (mm)	25.000	25.000
Effective face width:(mm)	25.000	25.000
Base diameter: (mm)	50.573	134.212
Root diameter: (mm)	49.557 (Input)	141.915 (Input)
Protuberance: (mm)	0 (Input)	0 (Input)
Root form diameter: (mm)	51.356 (Calculated)	142.766 (Calculated)
Tip diameter: (mm)	61.085 (Input)	153.443 (Input)
Tip form diameter: (mm)	61.085 (Calculated)	153.443 (Calculated)
Tool tip radius:(mm)	0.3671	0.5021
Addendum:(mm)	3.044	3.745
Dedendum:(mm)	2.719	2.018

Individual gear geometry

Gear:	Gear 3	Gear 4
Number of teeth:	24	73
Profile shift coefficient:	0.2778	0.1015
Generating profile shift coeff:	0.2778	0.1015
Working pitch diameter: (mm)	76.701	233.299
Reference pitch circle diameter:(mm)	76.149	231.619
Face width: (mm)	30.000	30.000
Effective face width:(mm)	30.000	30.000
Base diameter: (mm)	70.024	212.989
Root diameter: (mm)	67.667 (Input)	223.308 (Input)
Protuberance: (mm)	0 (Input)	0 (Input)
Root form diameter: (mm)	70.704 (Calculated)	224.982 (Calculated)
Tip diameter: (mm)	85.192 (Input)	240.833 (Input)
Tip form diameter: (mm)	85.192 (Calculated)	240.833 (Calculated)
Tool tip radius:(mm)	0.4538	0.8217
Addendum:(mm)	4.522	4.607
Dedendum:(mm)	4.241	4.155

Per inserire i cuscinetti è necessario prima inserire il vincolo generico e in seguito fare l'analisi delle forze agenti sui vincoli. Successivamente con il coefficiente di carico dinamico richiesto è possibile selezionare il cuscinetto adeguato da un ampio database.

intermedio SX	
Bearing Type	Required Dynamic Load Rating (N)
Radial ball, rows: 1	2.681e5
Cylindrical roller, rows: 1	8.48e4

The screenshot shows the 'Bearing Database' application window. The 'Manufacturer(G)' dropdown is set to 'SKF'. Search criteria are defined as follows:

- Designation: (empty)
- (d) Bore: Minimum 35.000, Maximum 35.000, Unit mm
- (D) Outer diameter: Minimum 80.000, Maximum 80.000, Unit mm
- (B) Width: Minimum 31.000, Maximum 31.000, Unit mm
- ISO 281 dynamic load rating (C): Minimum 8.397e4, Maximum +Infinity, Unit N
- Availability: (empty)

The results table is sorted by 'Designation' and shows the following data:

Catalog	Designation	Type	Rows:	d	D	B	Dynamic Load Rating	C. Ang.	Availability:
SKF	NJ2307EC	Cylindrical roller	1	35.000	80.000	31.000		0	
SKF	NJG2307VH	Cylindrical roller	1	35.000	80.000	31.000		0	
SKF	NU2307EC	Cylindrical roller	1	35.000	80.000	31.000		0	
SKF	NUP2307EC	Cylindrical roller	1	35.000	80.000	31.000	9.13e4	0	

In questo lucido è presente la trasmissione completa dei cuscinetti e un estratto della tabella dei cuscinetti con i rispettivi coefficienti di carico dinamico.

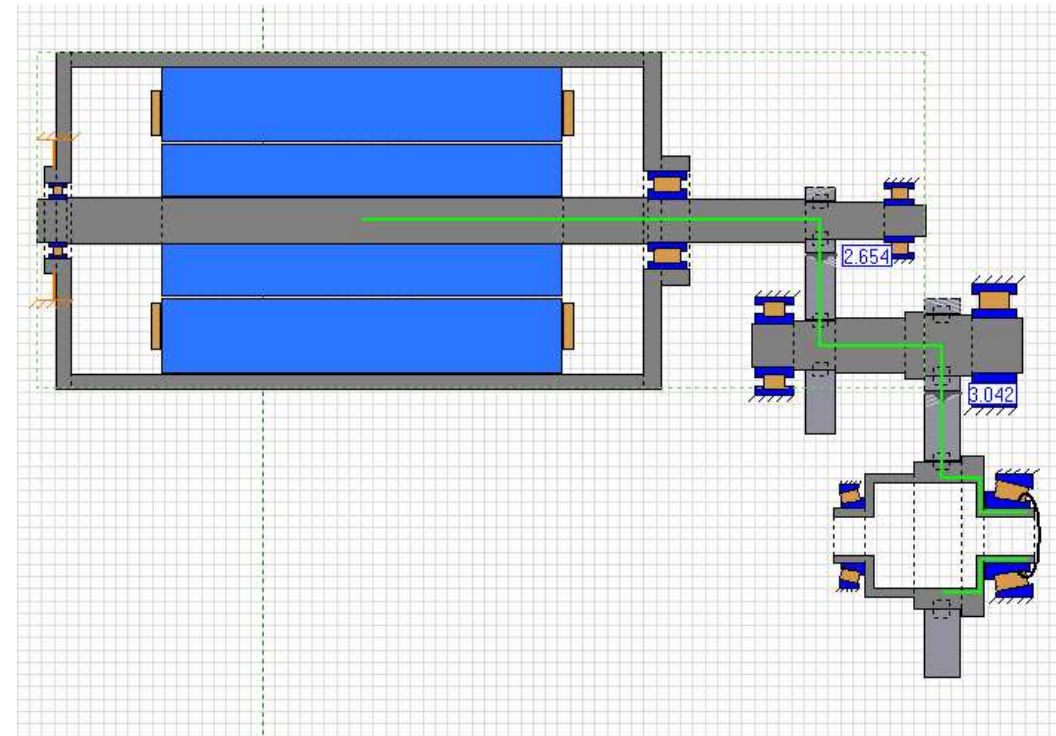
Load Case	Duration (hrs)
Load case 1	5.0e4
Load case 2	1.0000

differenziale DX [Taper roller 32309-SKF Explorer]	
Selected data	Actual Dynamic Load Rating (N)
Taper roller: 32309-SKF Explorer	1.73e5
Bearing Type	Required Dynamic Load Rating (N)
A/C Ball, rows: 1	2.737e5
Taper roller, rows: 1	1.077e5
Spherical roller bearing with symmetrical roller, rows: 1	1.502e5

differenziale SX [Taper roller 30209]	
Selected data	Actual Dynamic Load Rating (N)
Taper roller: 30209	6.6e4
Bearing Type	Required Dynamic Load Rating (N)
A/C Ball, rows: 1	9.87e4
Taper roller, rows: 1	3.577e4
Spherical roller bearing with symmetrical roller, rows: 1	7.721e4

intermedio DX [Cylindrical roller NU 2309 ECML-SKF Explorer]	
Selected data	Actual Dynamic Load Rating (N)
Cylindrical roller: NU 2309 ECML-SKF Explorer	1.6e5
Bearing Type	Required Dynamic Load Rating (N)
Radial ball, rows: 1	3.081e5
Cylindrical roller, rows: 1	8.574e4
Needle roller, rows: 1	2.323e5

intermedio SX [Cylindrical roller NUP2307EC]	
Selected data	Actual Dynamic Load Rating (N)
Cylindrical roller: NUP2307EC	9.13e4
Bearing Type	Required Dynamic Load Rating (N)
Radial ball, rows: 1	2.681e5
Cylindrical roller, rows: 1	8.48e4



Valutazione dei costi dei materiali e dei cuscinetti

Cost Breakdown

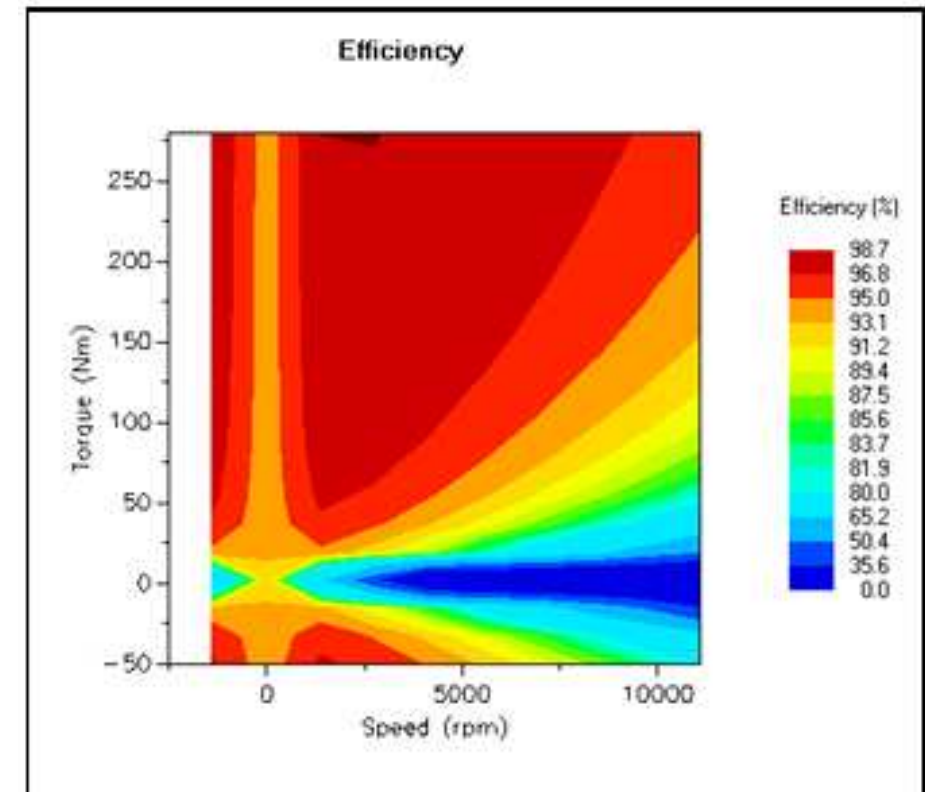
Component	Mass (kg)	Cost / unit mass: (1/kg)	Cost scale factor	Estimated cost	Specified Cost
albero intermedio	2.686	10.000	0.35	9.399	-
differenziale	4.357	10.000	0.35	15.249	-
accoppiamento 1	3.343	10.000	0.4	13.371	-
accoppiamento 2	7.819	10.000	0.4	31.277	-

Component	Specified Cost
differenziale DX [Taper roller 32309-SKF Explorer]	38.530
differenziale SX [Taper roller 30209]	19.970
intermedio DX [Cylindrical roller NU 2309 ECML-SKF Explorer]	81.320
intermedio SX [Cylindrical roller NUP2307EC]	86.170

Dopo aver inserito i cuscinetti si procede con la valutazione dell'efficienza della trasmissione che per i parametri di progetto deve superare il 93%.

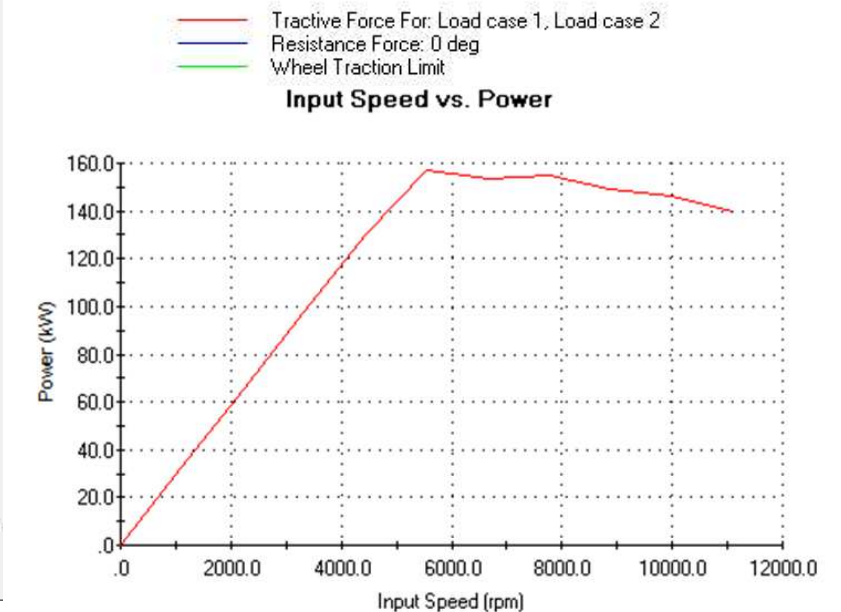
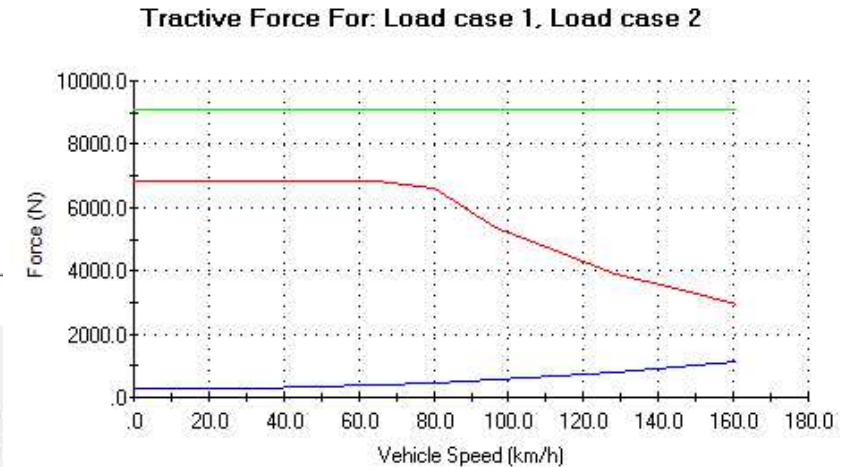
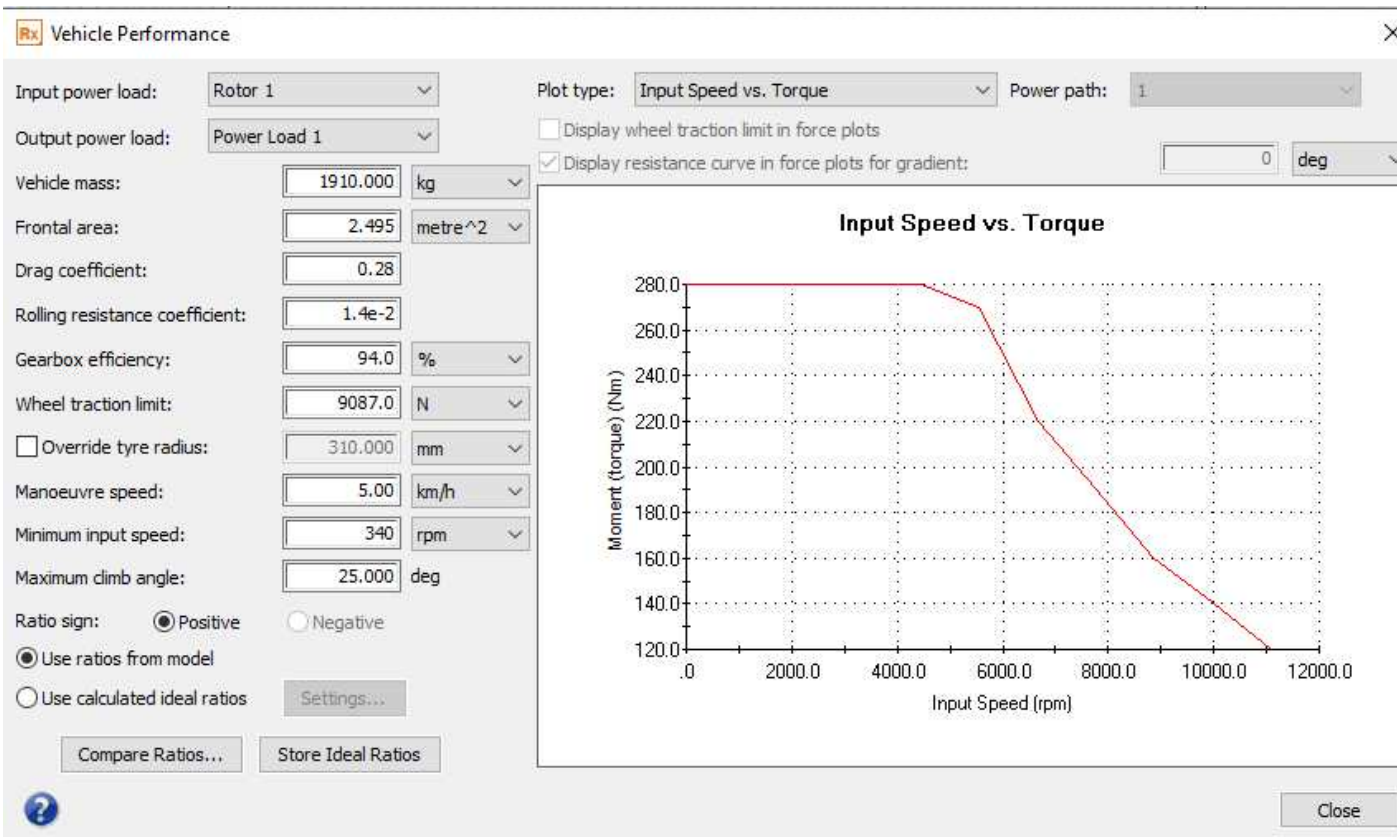
Load case 1	
Total power in (kW)	124.616509
Total power out (kW)	122.740392
Total power loss (kW)	1.876117
Total cylindrical gear blank drag power loss (kW)	0.504
Total bevel gear blank drag power loss (kW)	0
Total helical gear mesh drag power loss (kW)	0.3655
Total bevel gear mesh drag power loss (kW)	0
Total bearings power loss (kW)	1.006691
Total efficiency (%)	98.5

Load case 2	
Total power in (kW)	139.486714
Total power out (kW)	127.321032
Total power loss (kW)	12.165682
Total cylindrical gear blank drag power loss (kW)	8.978385
Total bevel gear blank drag power loss (kW)	0
Total helical gear mesh drag power loss (kW)	0.2932
Total bevel gear mesh drag power loss (kW)	0
Total bearings power loss (kW)	2.894111
Total efficiency (%)	91.3

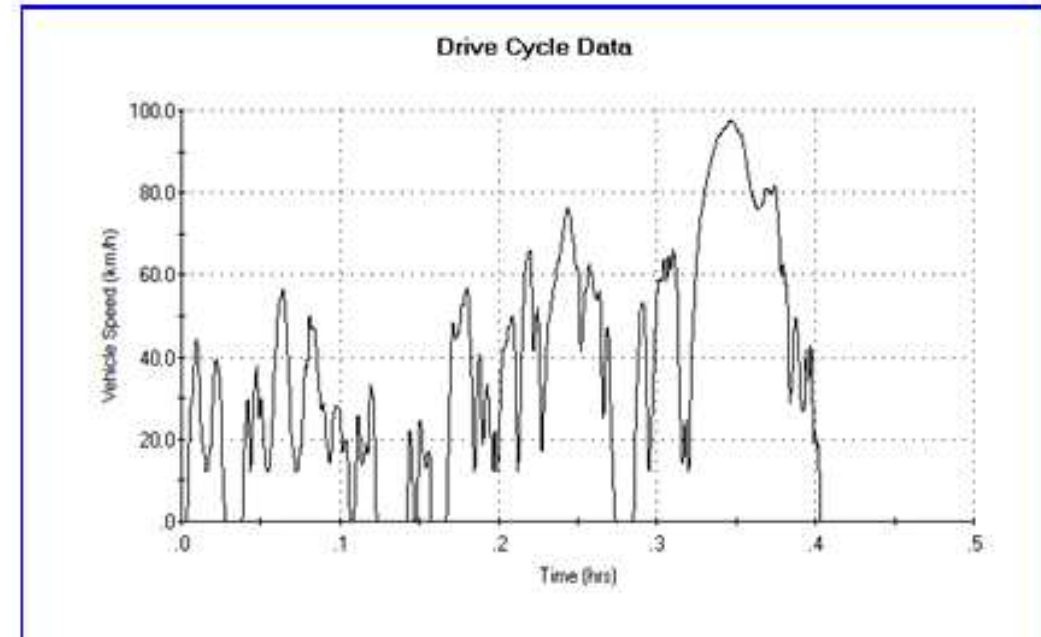
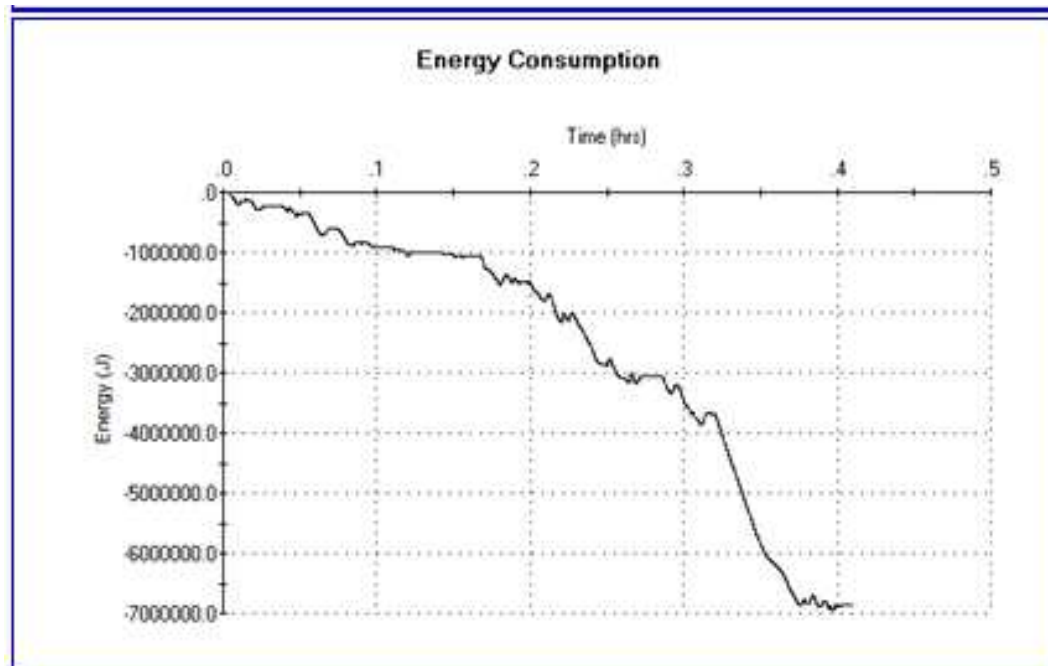


Al massimo regime di rotazione non è stato possibile rispettare il vincolo di efficienza imposto poiché riducendo troppo le ruote aumentano le forze e di conseguenza le dimensioni dei cuscinetti che non risulterebbero più compatibili con gli alberi della trasmissione.

Qui è possibile valutare le prestazioni del veicolo in relazione al motore scelto e agli ingombri di veicolo.
Nel caso in esame si sono utilizzate le dimensioni dell'auto Peugeot e-208.



Per la simulazione dei consumi si utilizza un ciclo guida armonizzato a livello mondiale, il WLTC classe 3, ovvero la classe legata ai veicoli più performanti.



Energy Consumption Data

Net energy consumption (J)	6.865e6
Distance travelled (km)	14.847
Total energy used in driving operation (J)	9.538e6
Total energy reclaimed in coasting operation (J)	2.673e6
Average driving system efficiency (%)	90.8
Average driving motor efficiency (%)	99.2
Average driving gearbox efficiency (%)	91.6
Average coasting system efficiency (%)	93.5
Average coasting motor efficiency (%)	99.0
Average coasting gearbox and braking efficiency (%)	94.5

In conclusione si può dire che la trasmissione è correttamente dimensionata e pronta per le successive fasi di analisi.

