METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO PARA UM VEÍCULO BAJA

José Henrique da Costa Queiroz Gonzalez – jhcqg.eng@uea.edu.br
Universidade do Estado do Amazonas, Escola Superior de Tecnologia, Engenharia Mecânica.
Avenida Darcy Vargas, 1200. Parque 10 de Novembro.
69050-020 – Manaus - Amazonas

Arlindo Pires Lopes – alopes@uea.edu.br
Universidade do Estado do Amazonas, Escola Superior de Tecnologia, Engenharia Mecânica.
Avenida Darcy Vargas, 1200. Parque 10 de Novembro.
69050-020 – Manaus - Amazonas

Lucas Souza de Oliveira – luso.eng@uea.edu.br
Universidade do Estado do Amazonas, Escola Superior de Tecnologia, Engenharia Mecânica.
Avenida Darcy Vargas, 1200. Parque 10 de Novembro.
69050-020 – Manaus – Amazonas

Adriana Alencar Santos – asantos@ufam.edu.br
Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Tecnologia, Engenharia Mecânica.
Av. General Rodrigo Octávio, 6200. Coroado I.
69080-900 – Manaus - Amazonas

Resumo: *Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia de cálculo para a determinação das relações de transmissão para um veículo Mini BAJA. Será apresentado o referencial teórico para os referidos cálculos e, posteriormente, será apresentada uma planilha criada no software Microsoft Office Excel. O principal objetivo da planilha é reduzir o tempo com os cálculos e apresentar uma gama de resultados que podem ser facilmente comparados durante a troca dos parâmetros em análise para o dimensionamento de uma transmissão. Além disso pode-se empregar os resultados aqui obtidos em diferentes disciplinas, como: Projetos de Sistemas Mecânicos, Elementos de Máquinas, Projetos de Máquinas, Manufatura Mecânica, Processos de Usinagem, dentre outras.*

Palavras-chave: *Transmissão, BAJA, Relação.*

1. INTRODUÇÃO

Em um veículo automotor a transmissão trata-se de um dos componentes mais importantes. A transmissão automotiva se faz necessária para adequar as velocidades do motor à velocidade das rodas, além do fato de realizar as conversões de torque de acordo com as exigências nas mais diversas situações que o veículo se encontra.

A não utilização de uma transmissão implicaria em um aumento da rotação do motor sem o proporcional aumento da velocidade do veículo, ou seja, velocidades mais elevadas não

poderiam ser alcançadas. Além de haver um consequente maior consumo de combustível, por não ser possível obter-se o resultado esperado em rotações baixas.

Este trabalho tem como principal objetivo descrever um método didático em como determinar as relações para uma transmissão automotiva, com ênfase em veículos Mini Baja. Portanto, valores e conceitos adotados podem divergir de demais veículos, principalmente de veículos comerciais.

2. CONCEITOS INICIAIS

Serão apresentados nesta seção alguns conceitos de fundamental importância tanto para a determinação das relações de um veículo, tanto para o entendimento do funcionamento da planilha eletrônica abordada neste trabalho.

2.1. Relação de Transmissão

É a relação entre o componente motor e o componente movido de determinada transmissão, podendo tratar-se de engrenagens, polias, dentre outros.
Há dois tipos de relações:

- Redução – (Relação > 1): Há redução da velocidade e aumento do torque transmitido.
- Multiplicação – (Relação < 1): Há aumento da velocidade e redução do torque transmitido.

2.2. Relação Global de Transmissão

Trata-se da relação que irá descrever o comportamento de todos os componentes envolvidos na transmissão. É a relação de transmissão de um conjunto com mais de um redutor ou multiplicador. A relação global pode ser obtida a partir da multiplicação das relações individuais de todos os componentes.

2.3. Gradiente

O termo gradiente refere-se à inclinação da via em que o veículo se encontra. Pode ser expresso convencionalmente em graus ou em porcentagem de subida em função do deslocamento horizontal.

2.4. Gradeability

Corresponde ao máximo gradiente que um veículo consegue superar, com velocidade constante.

2.5. Resistência a rolagem

Trata-se de todas as forças resistivas a que um pneu deve vencer para dar início ao seu movimento. De acordo com o dicionário automotivo *Motorera* alguns fatores influenciam diretamente nestas forças, tais como: Pressão dos pneus, rugosidade da via, temperatura e composição dos pneus, peso do veículo e resistência do ar.

2.6. Raio Dinâmico do Pneu

Refere-se ao raio efetivo do pneu em condições de trabalho. Ou seja, trata-se de um valor variável, que pode alterar-se com o acréscimo da velocidade do veículo.

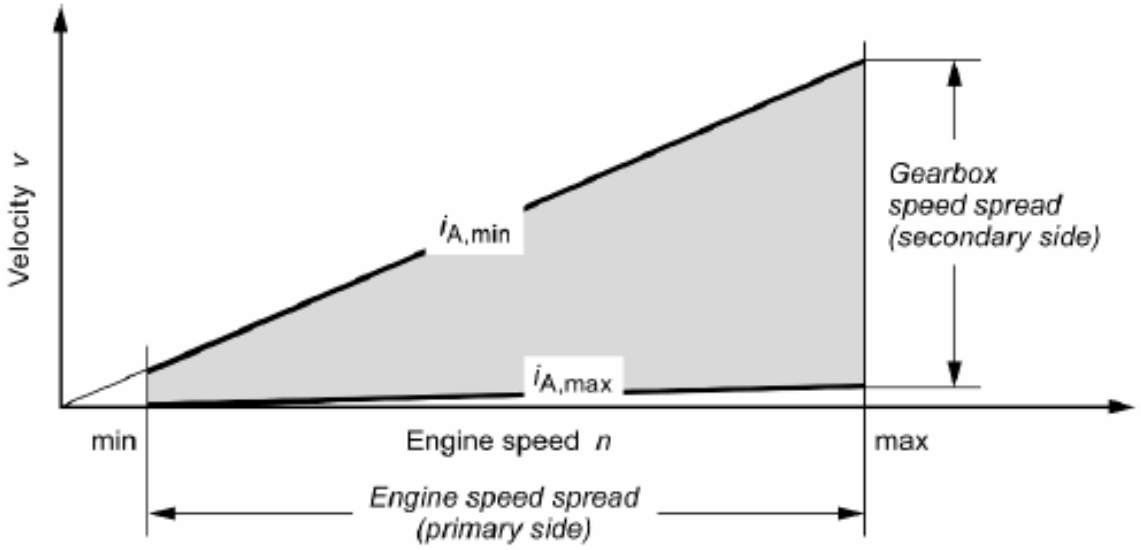
3. DETERMINAÇÃO DAS RELAÇÕES DE TRANSMISSÃO

Alguns fatores são essenciais para a determinação das relações de uma transmissão automotiva.

A maior relação servirá de base durante o projeto de uma transmissão e pode ser obtida observando-se as máximas condições a que o veículo será submetido. Após a determinação da maior relação, obtém-se a menor relação, a qual pode ser obtida visando elevadas velocidades do veículo.

A figura 1 mostra a variação da rotação do motor em função da velocidade do veículo de acordo com as relações de transmissão

Figura 1 – Diagrama Rotação X Velocidade, em função das relações de transmissão – NAUNHEIMER (2011)



Após uma minuciosa análise do diagrama apresentado percebe-se a importância inerente a transmissão de um veículo, principalmente no que diz respeito ao correto dimensionamento e escalonamento das relações.

Observa-se que a relação máxima proporciona um aumento da velocidade do motor, porém sem o proporcional aumento da velocidade do veículo. Ou seja, é uma relação destinada a retirar o veículo da inércia e vencer determinados obstáculos, de modo que para alcançar-se velocidades mais altas é necessário o emprego das demais relações de transmissão.

Conforme NAUNHEIMER (2011) um veículo precisa de uma máxima relação para iniciar seu movimento e para acelerações, e de uma mínima relação para baixas rotações do motor em altas velocidades do veículo, a fim de reduzir o consumo de combustível.

Ainda segundo NAUNHEIMER (2011) há duas condições a serem consideradas para determinação da relação máxima, ou seja, a relação de maior torque:

- Máximo gradiente que pode ser superado com uma aceleração nula.
- Máxima aceleração em um plano

A equação 1 mostra como pode ser determinada a máxima relação de transmissão de um veículo, a partir do conceito de *gradeability*:

$$i_{máx} = \frac{r_{din} mg(f_r \cos\alpha + \sin\alpha)}{T_{máx}\eta_{tot}} \quad (1)$$

Onde:

- r_{din} = Raio dinâmico do pneu;
- m = Massa do veículo;
- g = Aceleração da gravidade;
- f_r = Coeficiente de resistência a rolagem;
- α = Máximo gradiente considerado;
- $T_{máx}$ = Torque máximo disponível no motor;
- η_{tot} = Eficiência total do sistema.

A equação 2 mostra como pode ser determinada a mínima relação de transmissão de um veículo:

$$i_{mín} = \frac{3{,}6\frac{\pi}{30} n_{máx} r_{din}}{v_{máx}} \quad (2)$$

Onde:

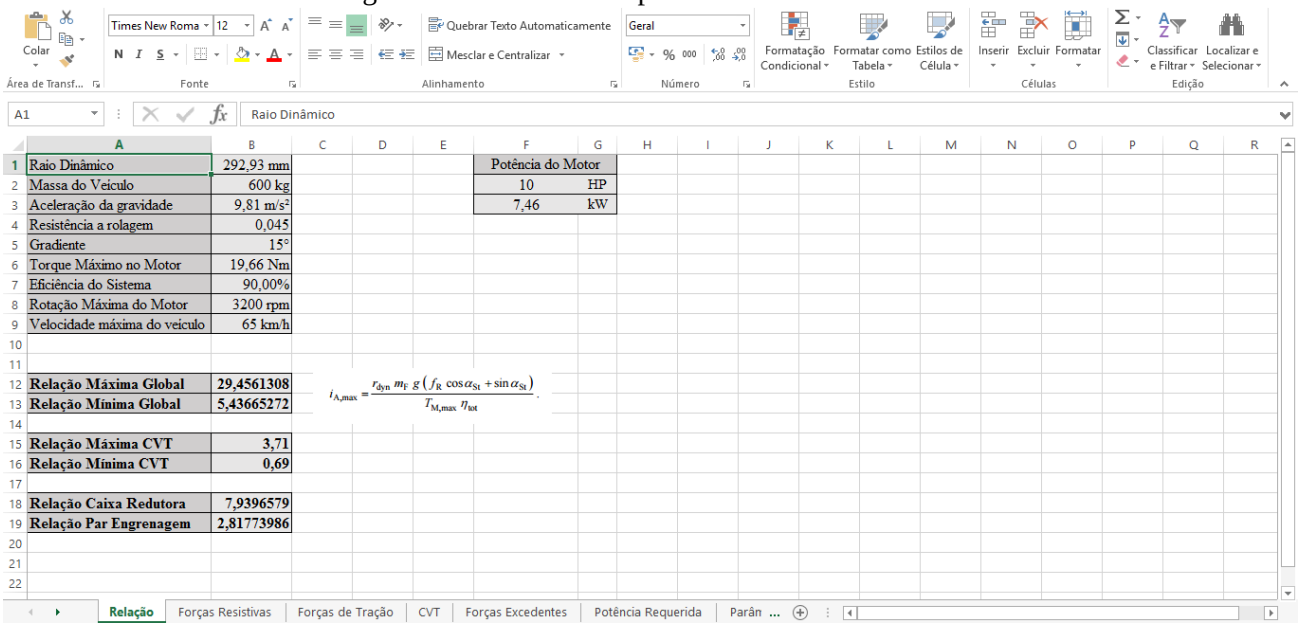
- $n_{máx}$ = Rotação máxima do motor;
- $v_{máx}$ = Velocidade máxima do veículo.

Para a determinação das relações intermediárias deve-se garantir que ao se realizar uma redução de marcha durante o pico de torque do motor não se exceda a rotação máxima. Alguns fatores são levados em consideração como: utilização do veículo; aumento de peso, devido ao aumento da quantidade de marchas; diagrama de torque do motor, dentre outros.

4. PLANILHA ELETRÔNICA PARA CÁLCULO DE RELAÇÕES DE TRANSMISSÃO

A seguir será apresentada a interface da planilha desenvolvida e os procedimentos para o preenchimento e coleta de informações a partir da mesma.

Figura 2 – Aba inicial da planilha de cálculos.



1	Raio Dinâmico	292,93 mm
2	Massa do Veiculo	600 kg
3	Aceleração da gravidade	9,81 m/s²
4	Resistência a rolagem	0,045
5	Gradiente	15°
6	Torque Máximo no Motor	19,66 Nm
7	Eficiência do Sistema	90,00%
8	Rotação Máxima do Motor	3200 rpm
9	Velocidade máxima do veiculo	65 km/h
12	**Relação Máxima Global**	**29,4561308**
13	**Relação Mínima Global**	**5,43665272**
15	**Relação Máxima CVT**	**3,71**
16	**Relação Mínima CVT**	**0,69**
18	**Relação Caixa Redutora**	**7,9396579**
19	**Relação Par Engrenagem**	**2,81773986**

Potência do Motor	
10	HP
7,46	kW

$$i_{A,max} = \frac{r_{dyn}\, m_F\, g\,(f_R \cos\alpha_{St} + \sin\alpha_{St})}{T_{M,max}\, \eta_{tot}}$$

A Figura 2 mostra a tela inicial da planilha onde serão inseridos os primeiros parâmetros e alguns dados importantes já poderão ser coletados.

As duas tabelas superiores serão os locais para inserção dos primeiros parâmetros. Deve-se incluir os dados conforme as unidades apresentadas.

O usuário deverá informar, conforme o seu projeto de transmissão, os seguintes dados na tela inicial: Radio Dinâmico (mm), Massa do Veículo (kg), Aceleração da gravidade (m/s²), Resistência a rolagem, Gradiente (º), Torque Máximo no Motor (Nm), Eficiência do Sistema, Rotação Máxima do Motor (rpm) e Velocidade máxima do veículo (km/h)

Os dados de potência do motor podem ser fornecidos em HP ou em kW, de modo que o usuário deverá selecionar na primeira linha qual unidade está utilizando.

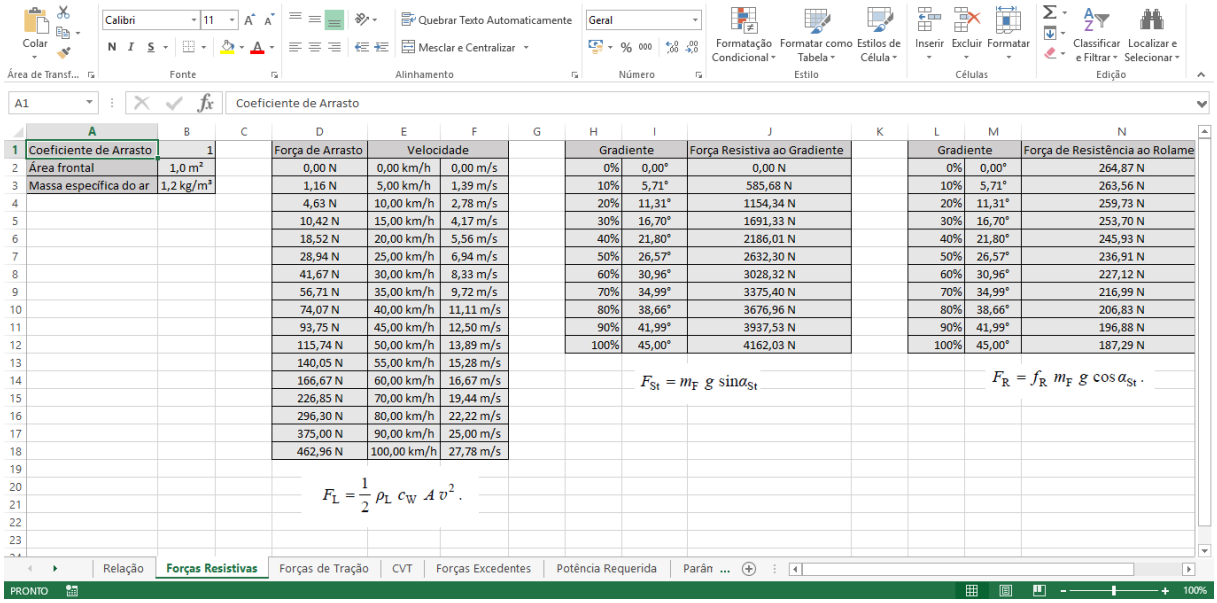
A partir destes dados será fornecido o valor da relação máxima global calculada a partir do *gradeability* (a equação utilizada encontra-se destacada na planilha) e a relação mínima global em função da velocidade máxima adotada.

Caso o projeto utilize Transmissão Continuamente Variável (CVT) o usuário deverá inserir o valor das relações máxima e mínima nos campos indicados, caso não possua deverá inserir 1 (um) nesses campos.

A partir da utilização ou não da CVT será fornecida a relação de transmissão da caixa redutora e, por conseguinte, do par de engrenagem.

A figura 2 mostra a aba “Forças Resistivas”, onde serão apresentadas as três forças resistivas presentes, a saber: Força de Arrasto, Força Resistiva ao Gradiente e Força de Resistência ao Rolamento.

Figura 2 – Aba “Forças Resistivas"



Coeficiente de Arrasto	1	
Área frontal	1,0 m²	
Massa específica do ar	1,2 kg/m³	

Força de Arrasto	Velocidade	
0,00 N	0,00 km/h	0,00 m/s
1,16 N	5,00 km/h	1,39 m/s
4,63 N	10,00 km/h	2,78 m/s
10,42 N	15,00 km/h	4,17 m/s
18,52 N	20,00 km/h	5,56 m/s
28,94 N	25,00 km/h	6,94 m/s
41,67 N	30,00 km/h	8,33 m/s
56,71 N	35,00 km/h	9,72 m/s
74,07 N	40,00 km/h	11,11 m/s
93,75 N	45,00 km/h	12,50 m/s
115,74 N	50,00 km/h	13,89 m/s
140,05 N	55,00 km/h	15,28 m/s
166,67 N	60,00 km/h	16,67 m/s
226,85 N	70,00 km/h	19,44 m/s
296,30 N	80,00 km/h	22,22 m/s
375,00 N	90,00 km/h	25,00 m/s
462,96 N	100,00 km/h	27,78 m/s

Gradiente		Força Resistiva ao Gradiente
0%	0,00°	0,00 N
10%	5,71°	585,68 N
20%	11,31°	1154,34 N
30%	16,70°	1691,33 N
40%	21,80°	2186,01 N
50%	26,57°	2632,30 N
60%	30,96°	3028,32 N
70%	34,99°	3375,40 N
80%	38,66°	3676,96 N
90%	41,99°	3937,53 N
100%	45,00°	4162,03 N

Gradiente		Força de Resistência ao Rolame
0%	0,00°	264,87 N
10%	5,71°	263,56 N
20%	11,31°	259,73 N
30%	16,70°	253,70 N
40%	21,80°	245,93 N
50%	26,57°	236,91 N
60%	30,96°	227,12 N
70%	34,99°	216,99 N
80%	38,66°	206,83 N
90%	41,99°	196,88 N
100%	45,00°	187,29 N

$$F_{St} = m_F \, g \, \sin\alpha_{St}$$

$$F_R = f_R \, m_F \, g \, \cos\alpha_{St} \, .$$

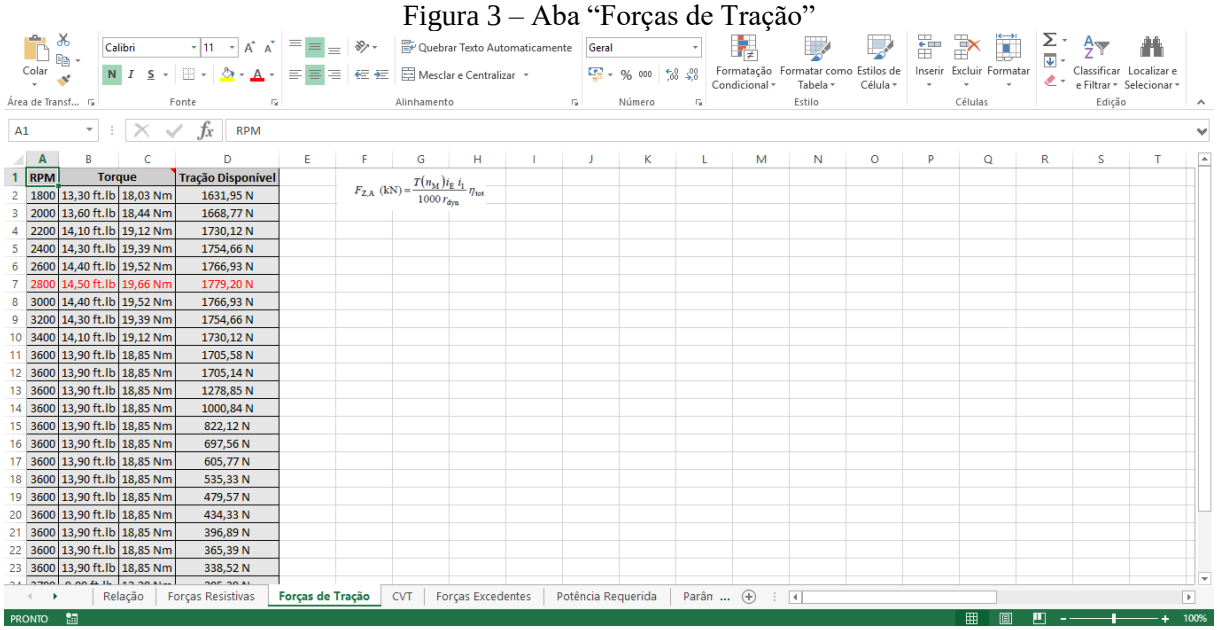
$$F_L = \frac{1}{2} \rho_L \, c_W \, A \, v^2 \, .$$

Para o cálculo das forças resistivas o usuário deverá inserir os valores, conforme o seu projeto de transmissão, os seguintes dados: Coeficiente de Arrasto Aerodinâmico, Área Frontal e Massa Específica do Ar.

As equações utilizadas para o cálculo das forças resistivas estão em destaque na planilha.

A figura 3 apresenta a aba “Forças de Tração”, a qual apresenta a tração disponível ao veículo em determinadas faixas de rotação.

Figura 3 – Aba “Forças de Tração”



RPM	Torque		Tração Disponível
1800	13,30 ft.lb	18,03 Nm	1631,95 N
2000	13,60 ft.lb	18,44 Nm	1668,77 N
2200	14,10 ft.lb	19,12 Nm	1730,12 N
2400	14,30 ft.lb	19,39 Nm	1754,66 N
2600	14,40 ft.lb	19,52 Nm	1766,93 N
2800	14,50 ft.lb	19,66 Nm	1779,20 N
3000	14,40 ft.lb	19,52 Nm	1766,93 N
3200	14,30 ft.lb	19,39 Nm	1754,66 N
3400	14,10 ft.lb	19,12 Nm	1730,12 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	1705,58 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	1705,14 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	1278,85 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	1000,84 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	822,12 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	697,56 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	605,77 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	535,33 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	479,57 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	434,33 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	396,89 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	365,39 N
3600	13,90 ft.lb	18,85 Nm	338,52 N

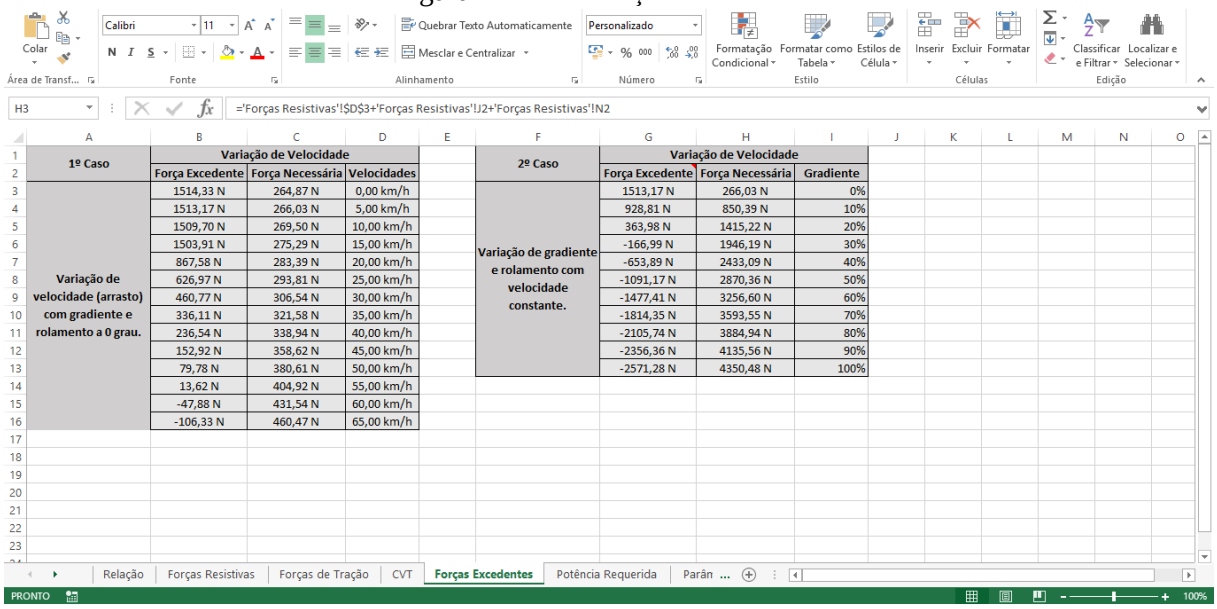
$$F_{Z,A} \, (\mathrm{kN}) = \frac{T(n_M) \, i_g \, i_1}{1000 \, r_{dyn}} \, \eta_{tot}$$

Nesta aba o usuário deverá informas os valores de Torque (ft.lb) para as rotações apresentadas. E será fornecida a Tração Disponível para cada faixa de rotação.

A aba “CVT” não necessita do input de dados e funciona apenas como banco de dados para utilização nas demais abas.

A figura 4 mostra a aba “Forças Excedentes”, onde são mostradas as forças excedentes em duas situações: Variação de velocidade com gradiente nulo e variação de gradiente com velocidade constante.

Figura 4 – Aba “Forças Excedentes”



1º Caso	Variação de Velocidade		
	Força Excedente	Força Necessária	Velocidades
Variação de velocidade (arrasto) com gradiente e rolamento a 0 grau.	1514,33 N	264,87 N	0,00 km/h
	1513,17 N	266,03 N	5,00 km/h
	1509,70 N	269,50 N	10,00 km/h
	1503,91 N	275,29 N	15,00 km/h
	867,58 N	283,39 N	20,00 km/h
	626,97 N	293,81 N	25,00 km/h
	460,77 N	306,54 N	30,00 km/h
	336,11 N	321,58 N	35,00 km/h
	236,54 N	338,94 N	40,00 km/h
	152,92 N	358,62 N	45,00 km/h
	79,78 N	380,61 N	50,00 km/h
	13,62 N	404,92 N	55,00 km/h
	-47,88 N	431,54 N	60,00 km/h
	-106,33 N	460,47 N	65,00 km/h

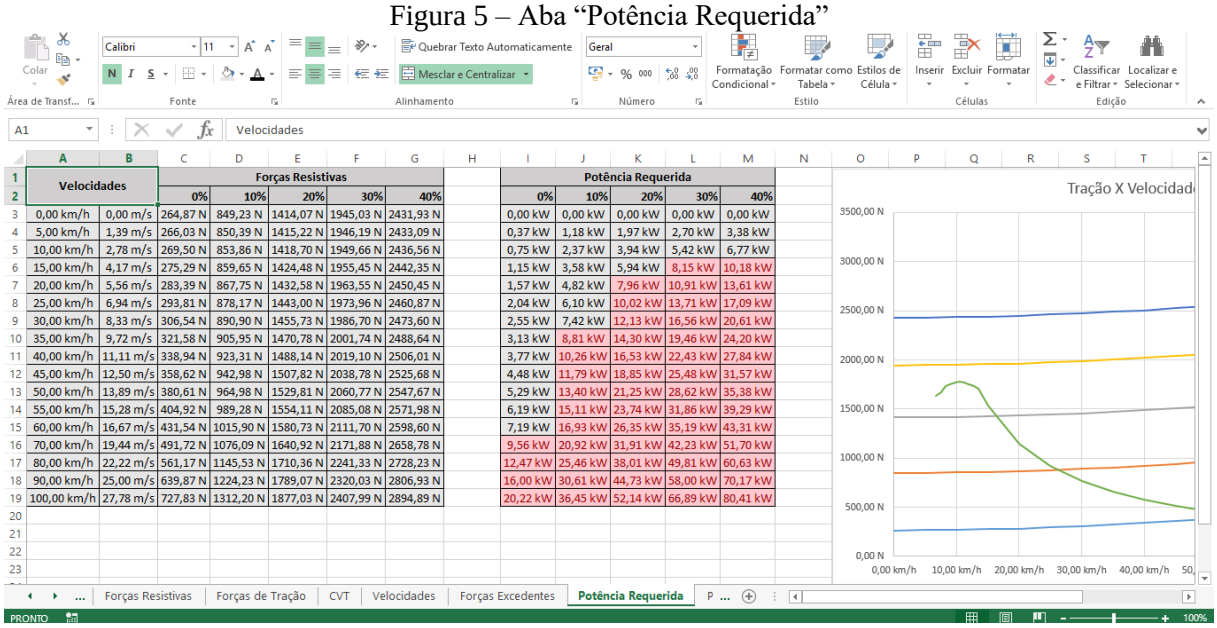
2º Caso	Variação de Velocidade		
	Força Excedente	Força Necessária	Gradiente
Variação de gradiente e rolamento com velocidade constante.	1513,17 N	266,03 N	0%
	928,81 N	850,39 N	10%
	363,98 N	1415,22 N	20%
	-166,99 N	1946,19 N	30%
	-653,89 N	2433,09 N	40%
	-1091,17 N	2870,36 N	50%
	-1477,41 N	3256,60 N	60%
	-1814,35 N	3593,55 N	70%
	-2105,74 N	3884,94 N	80%
	-2356,36 N	4135,56 N	90%
	-2571,28 N	4350,48 N	100%

Nesta aba é possível observar o comportamento do veículo em duas situações distintas. Onde já é possível observar a velocidade máxima do veículo (com aproximação de 5km/h) e o máximo gradiente que o veículo consegue superar.

Vale ressaltar que, para a análise do gradiente, é indicado que o usuário informe na Aba “Relação” apenas a massa do veículo. Uma vez que o dimensionamento parte do pressuposto de um veículo carregado, e neste ponto da análise é preferível um veículo descarregado.

A figura 5 mostra a aba “Potência Requerida” apresenta as forças resistivas e a potência requerida para cada faixa de velocidade e gradiente. Além de apresentar um gráfico Tração X Velocidade, o qual pode ser visualizado na figura 6, onde o cruzamento das linhas indica a velocidade máxima a ser obtida para determinado gradiente.

Figura 5 – Aba “Potência Requerida”



Velocidades		Forças Resistivas 0%	10%	20%	30%	40%	Potência Requerida 0%	10%	20%	30%	40%
0,00 km/h	0,00 m/s	264,87 N	849,23 N	1414,07 N	1945,03 N	2431,93 N	0,00 kW	0,00 kW	0,00 kW	0,00 kW	0,00 kW
5,00 km/h	1,39 m/s	266,03 N	850,39 N	1415,22 N	1946,19 N	2433,09 N	0,37 kW	1,18 kW	1,97 kW	2,70 kW	3,38 kW
10,00 km/h	2,78 m/s	269,50 N	853,86 N	1418,70 N	1949,66 N	2436,56 N	0,75 kW	2,37 kW	3,94 kW	5,42 kW	6,77 kW
15,00 km/h	4,17 m/s	275,29 N	859,65 N	1424,48 N	1955,45 N	2442,35 N	1,15 kW	3,58 kW	5,94 kW	8,15 kW	10,18 kW
20,00 km/h	5,56 m/s	283,39 N	867,75 N	1432,58 N	1963,55 N	2450,45 N	1,57 kW	4,82 kW	7,96 kW	10,91 kW	13,61 kW
25,00 km/h	6,94 m/s	293,81 N	878,17 N	1443,00 N	1973,96 N	2460,87 N	2,04 kW	6,10 kW	10,02 kW	13,71 kW	17,09 kW
30,00 km/h	8,33 m/s	306,54 N	890,90 N	1455,73 N	1986,70 N	2473,60 N	2,55 kW	7,42 kW	12,13 kW	16,56 kW	20,61 kW
35,00 km/h	9,72 m/s	321,58 N	905,95 N	1470,78 N	2001,74 N	2488,64 N	3,13 kW	8,81 kW	14,30 kW	19,46 kW	24,20 kW
40,00 km/h	11,11 m/s	338,94 N	923,31 N	1488,14 N	2019,10 N	2506,01 N	3,77 kW	10,26 kW	16,53 kW	22,43 kW	27,84 kW
45,00 km/h	12,50 m/s	358,62 N	942,98 N	1507,82 N	2038,78 N	2525,68 N	4,48 kW	11,79 kW	18,85 kW	25,48 kW	31,57 kW
50,00 km/h	13,89 m/s	380,61 N	964,98 N	1529,81 N	2060,77 N	2547,67 N	5,29 kW	13,40 kW	21,25 kW	28,62 kW	35,38 kW
55,00 km/h	15,28 m/s	404,92 N	989,28 N	1554,11 N	2085,08 N	2571,98 N	6,19 kW	15,11 kW	23,74 kW	31,86 kW	39,29 kW
60,00 km/h	16,67 m/s	431,54 N	1015,90 N	1580,73 N	2111,70 N	2598,60 N	7,19 kW	16,93 kW	26,35 kW	35,19 kW	43,31 kW
70,00 km/h	19,44 m/s	491,72 N	1076,09 N	1640,92 N	2171,88 N	2658,78 N	9,56 kW	20,92 kW	31,91 kW	42,23 kW	51,70 kW
80,00 km/h	22,22 m/s	561,17 N	1145,53 N	1710,36 N	2241,33 N	2728,23 N	12,47 kW	25,46 kW	38,01 kW	49,81 kW	60,63 kW
90,00 km/h	25,00 m/s	639,87 N	1224,23 N	1789,07 N	2320,03 N	2806,93 N	16,00 kW	30,61 kW	44,73 kW	58,00 kW	70,17 kW
100,00 km/h	27,78 m/s	727,83 N	1312,20 N	1877,03 N	2407,99 N	2894,89 N	20,22 kW	36,45 kW	52,14 kW	66,89 kW	80,41 kW

Figura 6 – Gráfico Tração X Velocidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo da planilha desenvolvida é reduzir o tempo utilizado durante a realização do projeto de transmissão de um veículo Mini BAJA. Após a realização deste trabalho percebe-se a importância do método utilizado, pois é possível realizar alterações nos parâmetros do projeto de forma rápida, a fim de realizar comparações.

Haja vista a dificuldade em encontrar bibliografias especializadas no projeto de uma transmissão para um veículo Mini BAJA, principalmente em português, sabe-se que este material será de grande importância para aqueles que desejam aprofundar seus conhecimentos na área de transmissão automotivas e servirá de auxílio, também, durante o projeto da transmissão.

Para trabalhos futuros há a possibilidade de montar uma nova planilha, onde seja possível abordar questões relacionadas com o dimensionamento físico da caixa redutora, tais como: engrenagens e eixos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAEN, Olav, Clutch Tuning Handbook, Racing. Aaen Performance, 2009. 82 p.

BUDYNAS, Richard G. (Richard Gordon). Shigley's Mechanical Engineering Design / Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. —9th ed. p. cm. — (McGraw-Hill series in mechanical engineering).

Dictionary of Automotive Terms – 'Gr' – Disponível em: <http://www.motorera.com/dictionary/gr.htm> Acesso em: 10 abr. 2017.

GILLESPI, THOMAS D. Fundamentals of Vehicle Dynamics, Ed. SAE International, Warrendale.

LEAL, Longuinho da Costa Machado. ROSA, Edison da. NICOLAZZI, Lauro Cesar. Uma Introdução à Modelagem Quase-estática de Veículos Automotores de Rodas. Publicação Interna do GRANTE. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008

LECHNER, Gisbert; NAUNHEIMER, Harald; RYBORZ, Joachim. Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application. Springer, 1999. 715 p.

MELCONIAN, Sarkis. Elementos de Máquinas. 9ª ed. 2000 São Paulo. Érica. 375 p.

SHIGLEY, Joseph E. Projeto de engenharia mecânica / Joseph E.Shigley, Charles R. Mischke, Richard G. Budynas: tradução João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar - 7ª ed. - Porto Alegre: Bookman, 2005. 1084 p.

YAMSANI, Akilesh. Gradeability for Automobiles. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2014.

METHODOLOGY FOR DESIGN OF A TRANSMISSION RATIO FOR A BAJA VEHICLE

Abstract: *This research aimed to present a methodology of calculation to determinate the Transmission Ratio to a BAJA Vehicle. First, a theoretical approach will be presented, then a Microsoft Office Excel Sheet, that was created. The main objective of this sheet is to reduce the time while projecting and presents many results that could be easily compared while parameters are changed to make analysis in Transmission Project. The results obtained here are able to be used for different areas, like: Mechanical Systems Projects, Machine Elements, Machine Projects, Mechanical Manufacturing, Machining Process, etc.*

Key-words: *Transmission, BAJA, Ratio.*