



PROJETO CONCEITUAL DE UM REDUTOR DE VELOCIDADE PARA PROTÓTIPO BAJA

Lucas Soares Serafim, Lucassoaresserafim@gmail.com¹
Filipi Marques de Souza, Filipi.souza@ufob.edu.br²
Virginia Bezerra Oliveira Campos, vibezerra@hotmail.com³
Anderson Breno Souza, anderson.souza@ufob.edu.br²
Miguel Ângelo de Oliveira Shaw, eng.miguel.shaw@gmail.com²
Jefferson da Silva Nunes, jefferson4160@hotmail.com²

¹ Universidade Federal Rural do Semi-Árido, R. Francisco Mota, 572, Pres. Costa e Silva CEP: 59625-900 Mossoró – RN, Telefone: (84) 3317-8200.

² Universidade Federal do Oeste da Bahia, Av. Manoel Novais, 1064, Centro CEP: 47600-000 Bom Jesus da Lapa – BA, Telefone: (77) 3481-9700.

³ Universidade Federal do Cariri, R. Ten. Raimundo Rocha, 1639, Cidade Universitária CEP: 63048-080 Barbalha – CE, Telefone: (88) 3221-9200

Resumo. Este trabalho buscou apresentar o projeto conceitual de um redutor de velocidade aplicável a um veículo BAJA. O objetivo deste trabalho é realizar um estudo breve sobre os principais sistemas de transmissão de potência que são aplicáveis ao projeto BAJA, estabelecer parâmetros para o projeto do powertrain (trem de força) do protótipo e selecionar um sistema de transmissão que se adeque as especificações selecionadas. A metodologia deste projeto seguiu um fluxograma de projeto composto por quatro etapas, seguindo desde o estudo sobre cada sistema de transmissão de potência, uma filtragem dos mais utilizados, via benchmarking, estabelecer os principais parâmetros que o projeto deve abordar e selecionar o sistema que melhor se adeque aos parâmetros através de uma matriz de valoração qualitativa ponderada, atribuindo notas para cada especificação referente a cada tipo de sistema. Após realizar cada procedimento estabelecido na metodologia, concluiu-se que o sistema mais adequado às especificações determinadas na segunda etapa era um powertrain composto pela combinação de um CVT modelo Comet 780 e uma dupla redução por corrente, proporcionando um sistema com melhor combinação de desempenho, geometria, custos, fácil manutenção e menor peso.

Palavras chave: Projeto. Powertrain. Redutor. Engrenagem. Baja.

1. INTRODUÇÃO

O projeto Baja SAE (Society of Automobile Engineers) foi uma iniciativa criada pela Universidade da Carolina do Sul, nos Estados Unidos, tendo sua primeira competição em 1976 (SAE Brasil, 2010). Este projeto trata-se de um desafio lançados aos alunos de engenharia, onde o mesmo tem a oportunidade de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos dentro e fora de sala de aula. O aluno é exposto a uma situação real de desenvolvimento de projeto, que parte de sua concepção até o estágio final de fabricação, contribuindo para o curriculum do mesmo e preparando-o para o mercado de trabalho. Cada equipe é responsável pelo projeto e construção de seu protótipo, onde cada projeto será avaliado por juízes credenciados em provas estáticas e dinâmicas.

O protótipo é composto por um veículo off-road (fora de estrada), capaz de operar em qualquer situação de terreno, incluindo pedras, lama, troncos, grandes e pequenas inclinações e sobre qualquer condição. O sistema de powertrain (trem de força) de um protótipo Baja é composto por um motor Briggs & Stratton, 4 tempos, monocilíndrico, com 10 HP de potência, série 20, refrigerado a ar; um CVT (Continuously Variable Transmission) que atua como redutor de torque e uma redução fixa, composta por engrenagens, correias ou corrente, que recebe o torque da CVT, amplia e transmite as semi-árvores e conseqüentemente, as rodas.

A escolha do sistema de transmissão para um protótipo Baja é uma tarefa delicada para a equipe, visto que pelo fato das configurações do motor ser regulamentado e não poder ser alterado de forma significativa, o diferencial vem das relações de transmissões usado por cada equipe.

A partir dessa premissa, é necessária a escolha de um sistema que possa fornecer um balanceamento entre velocidade e tração, já que na competição Baja SAE existem provas que exigem ambas as características, individualmente ou em conjunto. Devido a isso, surge a necessidade do estudo sobre os tipos de transmissões de potência aplicáveis ao projeto Baja.

Com base no conhecimento sobre o funcionamento de cada sistema e suas qualidades, e, levantando parâmetros desejados no projeto, será possível determinar um powertrain (trem de força) que se adeque as condições exigidas.

Nessa perspectiva o presente trabalho teve por objetivo elaborar o projeto conceitual de um redutor de velocidade a ser aplicado ao protótipo da equipe Caraubaja SAE, de acordo com os parâmetros pré-determinados pela equipe.

2. METODOLOGIA

Para a concepção de um projeto de redutor de velocidade aplicado a uma finalidade específica como o Projeto BAJA, é necessário seguir certos passos, definidos pelo seguinte fluxograma Fig. 1.

Figura 1. Fluxograma de projeto



A etapa 1 (um) consiste em um estudo sobre os principais sistemas mecânicos de transmissão de potência utilizados nos veículos off-Road Baja. Visto que segundo Niemann (1971), é necessário conhecer as condições de funcionamento do projeto, possuir dados suficientes para a determinação rápida das dimensões dos elementos que serão utilizados em função da potência que será transmitida.

Tais sistemas podem ser compostos por engrenagens, corrente ou correias e etc. Como a diversidade de sistemas é ampla, então é necessário um estudo sobre cada tipo para que possa ser feito um levantamento das características dos mesmos.

Após a análise dos possíveis sistemas de transmissão a serem utilizados partimos para a etapa 2 (dois), a fim de se estabelecer os parâmetros necessários para o projeto do protótipo.

Definidas as especificações, será realizada uma análise comparativa (etapa três) entre os mecanismos de transmissão estudados. Esta etapa tem como objetivo destacar as vantagens e desvantagens de cada sistema.

Após conclusão do processo comparativo, inicia a etapa 4, que consiste na escolha do sistema que melhor se adequa aos parâmetros definidos na etapa 2. A escolha será efetuada através de uma matriz de escolha com valoração qualitativa ponderada, atribuindo notas: 1 (insuficiente), 2 (ruim), 3 (regular), 4 (bom) e 5 (ótimo) para cada especificação, em relação à alguns sistemas de transmissão.

2.1. Construção da matriz de escolha com valoração qualitativa

A matriz será construída levando em consideração os parâmetros definidos na segunda etapa. Com a soma das notas ponderadas de cada especificação aplicado a cada sistema descrito na tabela, calcula-se o resultado final atribuído aos sistemas analisados, como demonstrado na Tab. 1.

Tabela 1. Exemplo de matriz de escolha com valoração qualitativa ponderada

MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE POTENCIA										
	PESO	R1		R2		R3		R4		IDEAL
		NP	NF	NP	NF	NP	NF	NP	NF	
PARAMETRO 1	5	2	10	3	15	4	20	5	25	25
PARAMETRO 2	4	2	8	3	12	4	16	5	20	20
PARAMETRO 3	3	2	6	3	9	4	12	5	15	15
PARAMETRO 4	2	2	4	3	6	4	8	5	10	10
PARAMETRO 5	1	2	2	3	3	4	4	5	5	5
RESULTADO			30		45		60		75	75
VD			0,4		0,6		0,8		1	1
%			40		60		80		100	100
LEGENDA:										
NP = NOTA PARCIAL										
NF = NOTA PONDERADA										
R1 = REDUÇÃO 1										
R2 = REDUÇÃO 2										
R3 = REDUÇÃO 3										
R4 = CVT X										

A partir dos resultados obtidos, define-se o sistema de transmissão que será utilizado, onde tal sistema é o que mais atende aos problemas propostos.

No entanto para construirmos a matriz é necessário que antes sejam estabelecidas as prioridades do projeto e um levantamento das especificações desejadas pela equipe, levando em consideração os parâmetros definidos pelo regulamento Baja SAE Brasil, além do fato de este ser o primeiro protótipo desenvolvido pela equipe Carubaja SAE, tendo isto em vista algumas especificações devem ser colocadas em destaque, as quais foram listadas na Tab. 2.

Tabela 2. Especificações do projeto

ASPECTO	ESPECIFICAÇÃO
GEOMETRIA	devido à existência de dimensões máximas e mínimas regulamentadas para o protótipo, surge a necessidade de um powertrain compacto, projetado de acordo com as limitações do chassi.
CUSTO	pelo fato de ser uma equipe novata, a mesma conta com poucos recursos financeiros e materiais, tornando este um fator limitante para o desenvolvimento do projeto.
PESO	menor peso total possível (inclusive peso do piloto) é um dos objetivos do projeto, pois o mesmo influencia no desempenho do veículo.
MANUTENÇÃO	a redução escolhida deve possibilitar uma rápida manutenção ou troca de peças.
DESEMPENHO	o projeto busca um powertrain com o melhor desempenho possível, utilizando todos os recursos disponíveis mesmo com as limitações existentes.

A partir dos parâmetros estabelecidos para determinação do sistema a ser utilizado no primeiro protótipo da equipe Carubaja SAE, e das informações coletadas e indexadas anteriormente (na etapa dois), como dito anteriormente utilizaremos a matriz de valoração qualitativa ponderada para classificarmos os sistemas de transmissão utilizando um sistema de pesos variantes entre 1 (menor relevância), 2 (relevância média), 3 (relevância considerável) e 4 (maior

relevância), e notas variando de 1 (insuficiente), 2 (ruim), 3 (regular), 4 (bom) e 5 (ótimo) para cada especificação. A justificativa de cada peso atribuído aos parâmetros é apresentada na Tab. 4.

Tabela 4. Justificativa da atribuição de peso referente aos parâmetros analisados

CRITERIO	PESO	JUSTIFICATIVA
GEOMETRIA	5	O sistema escolhido deve ser compacto devido a limitação de espaço para alocação do mesmo. Compactando-o, diminui o tamanho dos eixos, ajudando também na redução de peso do conjunto.
CUSTO	4	A equipe não se disponibiliza de muitos recursos financeiros para o projeto por falta de patrocínios, então o custo tornou-se um fator limitante.
PESO	2	A máxima redução possível de peso final do protótipo (incluindo o peso do piloto) é um dos objetivos a ser alcançados, diminuindo a inércia do mesmo, influenciando no desempenho final do veículo. Mas para o primeiro protótipo, este não é um parâmetro influente, desde que o veículo funcione em primeira instância.
MANUTENÇÃO	3	Como o peso final do veículo não está recebendo tanta importância no primeiro projeto, tem-se que uma rápida manutenção do sistema de redução em caso de falhas durante a prova, ajuda a compensar a diferença de tempo gasto para realizar uma prova devido a baixa velocidade resultante do excesso de peso.
DESEMPENHO	3	Em primeiro caso, o protótipo visa conseguir completar todas as provas até o encerramento da competição, portanto, o desempenho do sistema de transmissão, neste caso, é menos relevante em relação a robustez que o veículo deve possuir.

Tendo sido estabelecido os pesos de cada aspecto desejado pela equipe temos o necessário para construir a matriz assim que a terceira etapa do fluxograma seja completa, realizando a comparação entre os sistemas de transmissão analisados.

4. RESULTADOS

Referente ao estudo sobre transmissões mecânicas, o benchmarking realizado foi utilizado para fazer uma filtragem entre os sistemas de transmissão de potências possíveis de aplicar ao projeto Baja. Por ele, foi possível verificar que os sistemas comumente usados pelas equipes são: Redução por duplo trem de engrenagens de dentes retos, redução por corrente (estágio único) e dupla redução por corrente.

Sobre a redução por duplo trem de engrenagens Mandarino e Gonçalves (2014) dizem que devido este tipo de engrenagem ser o modelo mais simples, são frequentemente mais utilizados em modelos cinemáticos para a estruturação de projetos e desenvolvimento de teorias. Leão (2014) complementa dizendo que este tipo de engrenagem, por ser mais simples, pode ser usado mais facilmente além de não gerar força axial durante a transmissão de potência.

Tanto a redução por corrente estágio único como a dupla redução por corrente aplicam-se a eixos paralelos com distância entre eixo maior em relação aos conjuntos compostos por engrenagens. Possui rendimento elevado, variando entre 97 e 98%. Um conjunto de transmissão por corrente é formado por duas rodas dentadas, uma maior denominada de coroa e uma menor denominada de pinhão, com uma corrente ligando as duas. O preço deste sistema em relação a conjuntos formados por engrenagens, é menor, em torno de 85%, apresentando também outras vantagens, como fácil manutenção, maior distância entre eixo e o fato de uma única corrente ser capaz de acionar mais de duas rodas dentadas, mas possui menor vida útil devido ao desgaste nas articulações da corrente (Niemann, 1971).

Um fator a ser observado é que 100% das equipes utilizam uma das três reduções acima citados combinados com uma CVT (Continuously Variable Transmission). Atualmente, na indústria automobilística, utilizam-se comumente dois tipos de câmbios CVT: a CVT de Polias Expansivas e a CVT Toroidal.

A transmissão CVT de Polias Expansivas é um mecanismo composto por duas polias expansivas – a motora que é acoplado ao eixo do motor, e a movida que liga a CVT a um segundo estágio de transmissão ou ao eixo de saída – e uma correia. Segundo Bianchi (2009), seu funcionamento se dá pelo deslocamento axial das polias, onde as polias se abrem ou fecham, aumentando o raio de contato com a correia, conseguindo, assim, uma infinidade de relações possíveis dentro do limite de redução imposto pelo mecanismo.

A CVT Toroidal é constituída por dois discos e dois roletes. Similarmente a CVT de polias expansivas, um disco é conectado ao motor enquanto o outro é ligado a árvore de transmissão, e ambos recebem a rotação dos roletes, que

possuem a mesma velocidade angular. A variação de relações ocorre com o posicionamento dos roletes no disco: quando um rolete se encontra no centro do disco ligado ao motor e o outro está localizado na extremidade do disco ligado a caixa de transmissão, a CVT possui relação de máximo torque, quando o inverso ocorre, relação encontrada é de máxima velocidade (OLIVEIRA, 2015).

Segundo Albuquerque (2003), devido à variação contínua de relações, adquirisse suavidade, removendo os trancos, que ocorrem comumente nos câmbios manuais e automáticos ao realizar a troca de marcha.

Haja vista que foram concluídas a etapa 1 e etapa 2, podemos então elaborar uma análise comparativa entre os três tipos de transmissões comumente mais usados nos protótipos bajas das diversas instituições, sendo o passo definido pela etapa 3.

O sistema de redução por duplo trem de engrenagens de dentes retos é composto por dois estágios, contendo quatro engrenagens e três árvores, uma para entrada, uma intermediária e uma de saída, assim permitindo maiores reduções de forma mais compacta, possui maior resistência mecânica, robustez e eficiência, em torno de 96-98%, mas em contra partida possui maior peso, inércia e custo mais elevado em relações em relação aos outros sistemas. A manutenção deste mecanismo ocorre de forma mais complexa em relação aos itens aqui listados.

O sistema de redução por corrente (estágio único) nos permite baixas reduções, possui ótimo custo de aquisição, pode ser encontrado facilmente no mercado, permite maior distância entre eixos, manutenção do sistema é simples, em virtude a simplicidade do conjunto, mas em relação ao conjunto formado por engrenagens, possui rendimento menor devido a menor resistência das peças, sofrendo desgaste nas articulações da corrente. A eficiência varia entre 97-98%. Possui perdas de eficiência em caso de folga na corrente.

Já a dupla redução por corrente, pode ser determinado como uma combinação entre redução por engrenagens cilíndricas e por corrente. Possui como vantagens sua alta eficiência, menor preço de mercado, facilidade de aquisição, permite maiores reduções tornando-o compacto em comparação à redução de estágio único, facilidade de manutenção. Em contrapartida este sistema de transmissão apresenta menor rendimento, possui perdas em caso de folgas.

Como dito anteriormente, todas as equipes utilizam um sistema de redução em conjunto com uma CVT pela praticidade proporcionada. Com ele, não há necessidade de um sistema de embreagem ou de acionamento. Quando está no caso de menor rendimento, equipara-se aos sistemas compostos por engrenagens cilíndricas, mas adquire vantagem devido o menor peso, consequentemente, menor inércia. O modelo mais usado é o CVT Comet 780, que possui relação de transmissão variante entre 3,71:1 e 0,69:1, possui rendimento de 92% para relação de transmissão de 1:1.

Para melhor comparação entre os dados citados anteriormente utilizaremos a Tab. 3.

Tabela 3. Comparativo entre características dos sistemas de transmissões comumente utilizados no projeto Baja

SISTEMAS	CARACTERÍSTICAS					
	EFICIÊNCIA	RESISTÊNCIA	RIGIDEZ **	CUSTO*	MANUTENÇÃO	POSSUI PERDA?
ECDR	96-98%	ELEVADA	ELEVADA	X	MODERADA	NÃO
RC	97-98%	BAIXA	MODERADA	0,85X	FÁCIL	SIM
DRC	97-98%	BAIXA	MODERADA	0,85X	FACIL	SIM
*Custos dos outros sistemas são baseados em um valor aleatório X das ECDR						
**Rigidez referente aos componentes do sistema						
ECDR = Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos						
RC = Redução por corrente						
DRC = Dupla redução por corrente						

A partir dos dados levantados e da análise comparativa feita na terceira etapa, os integrantes do subsistema de powertrain puderam com base nisto atribuírem as notas a cada aspecto dos componentes eleitos como possíveis peças para o sistema de transmissão do protótipo. Com base nisso, montamos a matriz de valoração qualitativa ponderada, mostrada na Tab. 4 logo abaixo.

Tabela 5. Matriz de valoração qualitativa ponderada para determinação do sistema de transmissão que melhor se adequa ao projeto de acordo com as especificações

MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE POTENCIA										
	PESO	R1		R2		R3		R4		IDEAL
		NP	NF	NP	NF	NP	NF	NP	NF	
GEOMETRIA	5	4	20	3	15	5	25	4	20	25
CUSTO	4	2	8	4	16	3	12	4	16	20
PESO	2	2	4	4	8	3	6	4	8	10
MANUTENÇÃO	3	2	6	4	12	3	9	3	9	15
DESEMPENHO	3	5	15	2	6	4	12	4	12	15
RESULTADO			53		57		64		65	85
VD			0,62		0,67		0,75		0,76	1
%			62,4		67,1		75,3		76,5	100
LEGENDA:										
NP = NOTA PARCIAL										
NF = NOTA PONDERADA										
R1 = REDUÇÃO POR TREM DE ENGRENAGEM DE DENTES RETOS										
R2 = REDUÇÃO POR CORRENTE (ESTÁGIO ÚNICO)										
R3 = DUPLA REDUÇÃO POR CORRENTE										
R4 = CVT Comet 780										

5. CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos após a construção da matriz de valoração qualitativa ponderada, conclui-se que o sistema de powertrain que melhor se adequa as especificações selecionadas é o conjunto formado pela CVT Comet 780 e um Duplo Redutor por Corrente.

A busca por um sistema compacto em primeira instância, devido à limitação de espaço para alocar a transmissão, seguido por peso moderadamente menor em relação a outros sistemas e baixo custo de aquisição devido às limitações financeiras, foi atendida pelo sistema acima mencionado, proporcionando também um desempenho considerável, pois a dupla redução por corrente proporciona uma redução equivalente à de uma caixa de marcha de duplo estágio, mas com menor peso, considerando o conjunto dupla redução e CVT, que elimina a necessidade de um sistema de embreagem, diminuindo a inércia total do sistema. O conjunto possui resistência menor dos elementos, desgastando mais rápido, sofrendo falhas nas articulações da corrente, mas essa desvantagem é compensada pela facilidade na manutenção do sistema, possibilitando a troca de peças de maneira rápida e eficiente.

A partir da premissa desse trabalho, que compõe a segunda etapa do projeto de powertrain do protótipo da equipe Caraubaja SAE, pretende-se dar continuidade elaborando o projeto preliminar do sistema de transmissão aqui determinado, gerando um esboço do sistema real, com dimensões arbitrárias, sendo otimizado a cada momento até obtenção do produto final com dimensões ideais no projeto detalhado.

6. REFERÊNCIAS

- Albuquerque, A.A., 2003. *Caracterização da Resposta Dinâmica de uma CVT por Polias Expansivas*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- Bianchi, K.E., 2009. *Desenvolvimento de um Sistema de Transmissão Mecânica Baseado em Engrenagens Cônicas e Faciais*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

Leão, V.R., 2014. “Projeto Conceitual de uma Caixa Redutora para Protótipo Baja SAE”. In XIII Jornada de Trabalho de Conclusão de Curso – 2014. Campina Grande, Brasil.

Mandarino, C.G. e Gonçalves, G.S., 2014. *Projeto de um redutor de velocidade para veículo baja SAE*. 2014. 157 f. Tese de conclusão de curso, Universidade de Brasília, Brasília.

Niemann, G., 1971. *Elementos de Máquinas*. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1ª edição.

OLIVEIRA, P.G., 2015. *Simulação numérica do comportamento mecânico de um câmbio continuamente variável utilizado em veículos do tipo BAJA*. Tese de conclusão de curso, Universidade Federal Fluminense, Niterói.

SAE Brasil, 2010. “Regulamento Baja SAE Brasil”. 28 Ago. 2016 <<http://saebrasil.org.br/BN-2016/Regras.aspx>>.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.