

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

PROTOTIPAGEM DIGITAL DE UM DIFERENCIAL MAGNETO-REOLÓGICO AUTOMOTIVO

Gabriel da Silva Lecchi, gabriel_lecchi@hotmail.com¹
Drielle Delpino, drielle.delpino@gmail.com¹
Arnaldo Gomes Leal Junior, arnaldo.leal@aluno.ufes.br¹
Rafhael Milanezi de Andrade, rafhaelmilanezi@gmail.com¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Avenida Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, 29075-910, Brazil

Resumo: O diferencial é um dispositivo mecânico que permite repartir o torque entre os semieixos das rodas motoras de um automóvel. Isso é indispensável para que o veículo mantenha sua estabilidade e possa fazer curvas. Entretanto o dispositivo pode ter um comportamento indesejável quando uma das rodas perde a aderência com o solo, podendo o veículo ficar imóvel, uma vez que a outra roda não é capaz de transmitir o torque necessário para o mesmo se movimentar. Para evitar esse comportamento, é preciso fazer adaptações ao dispositivo que limitam as velocidades relativas entre os eixos, não permitindo que uma roda gire excessivamente em relação a outra. Como alternativa, neste trabalho, é proposta a utilização de um acoplamento que utiliza fluido magneto-reológico (MR) com a função de transmitir torque à roda que perdeu a aderência. Os fluidos MR são materiais inteligentes que tem suas propriedades controladas por um campo magnético induzido. Tais materiais têm sido extensivamente utilizados no desenvolvimento de dispositivos, como amortecedores de suspensões veiculares, em válvulas, em próteses, por apresentarem baixo consumo de energia e alto torque/força resistivo em relação ao peso. Com o uso de fluido MR no acoplamento do diferencial, espera-se que o carro tenha mais estabilidade em terrenos irregulares. Este trabalho apresenta a prototipagem digital do dispositivo e a simulação do fluxo magnético pelo método dos elementos finitos para definir seus parâmetros geométricos. Com o modelo dinâmico do protótipo é possível implementar um controlador PID que é ativado pela diferença de velocidade entre os eixos, uma máquina de estados finitos foi implementada para atuar como uma chave lógica para fazer essa transição. Os resultados mostram que o diferencial MR desenvolvido é promissor para as aplicações propostas, as quais requerem tamanho compacto, baixo peso e rápido tempo de resposta.

Palavras-chave: Fluido magneto-reológico, diferencial automotivo, acoplamento magneto-reológico, prototipagem digital.

1. INTRODUÇÃO

O diferencial é um equipamento mecânico que reparte o torque do motor em dois semieixos e permite que o veículo faça curvas sem que haja deslizamento de uma das rodas. O arrasto das rodas pode fazer o veículo perder a tração, provocar desgaste dos pneus, dificuldade de controlar o veículo e falta de estabilidade. (Filippin, 2009; Catálogo Spicer, Eger 2007). O torque fornecido por uma roda motriz depende da sua aderência ao piso. Se uma roda deslizar sobre um piso de baixa aderência, o torque transmitido por ela será pequeno. Como o diferencial reparte igualmente o torque entre as rodas, a roda que está com o piso de menor aderência pode não ser capaz de mover o veículo (Filippin, 2009).

Soluciona-se esse problema aumentando o atrito interno do diferencial, para que a diferença de velocidade entre as rodas possa ser menor, fazendo com que, se pelo menos uma das rodas estiver com um piso com aderência, o carro se mova. Esse é o princípio dos sistemas de bloqueio de diferencial, conhecidos como diferenciais autoblocantes. Quando um diferencial autoblocante é empregado no sistema de transmissão do veículo, há, basicamente duas condições desejadas. Com alto fator de bloqueio, para iniciar o movimento do veículo por exemplo, e outra com baixo fator de bloqueio, para curvas fechadas e manobras. Os diferenciais convencionais não podem cumprir essas duas condições devido a sua natureza mecânica. (Robinson, 2003)

Na tentativa de contornar as limitações citadas, alguns autores tem dedicado esforços para desenvolver diferenciais com controle do fator de bloqueio utilizando fluido magneto-reológico (MR). O fluido MR é amplamente empregado

em freios, amortecedores, embreagens e acoplamentos, mas há poucos exemplos relativos à concepção e desenvolvimento de diferencial automotivo com o fluido MR (Lanzotti, 2003). Tal fluido possui até 80% do seu volume composto por partículas magnetizáveis, e quando é aplicado um campo magnético as micropartículas se alinham com as linhas do fluxo magnético promovendo um aumento da tensão limite de cisalhamento do fluido e consequente restrição da taxa de deformação. (Gomes, 2003; Yang et al., 2002).

Kavlicoglu et al. (2006) apresentam um estudo com a concepção, desenvolvimento e caracterização, de um acoplamento multi-discos magneto-reológico aplicado à um diferencial automotivo, com um sistema de controle de velocidade em circuito fechado on-off capaz de transferir torques elevados. Porém, o controle on-off pode apresentar respostas limitadas, uma vez que seu sinal de controle assume apenas dois valores. Kavlicoglu et al. (2007) expandem seus trabalhos com estudos teóricos e experimentais sobre aquecimento do acoplamento magneto reológico do diferencial.

Lanzotti et al. (2013) descrevem o desenvolvimento de um diferencial automotivo semi-ativo, com fluido magneto-reológico para controlar o travamento do torque entre eixos, melhorando a movimentação do veículo. Lanzotti et. al. (2014), fabricaram o protótipo físico, a fim de avaliar a eficácia do dispositivo e validar os processos de design. Ambos trabalhos não apresentam controlador e sistema de ativação lógica do projeto.

Com base no cenário exposto, nota-se que apesar dos avanços na área, os diferenciais desenvolvidos ainda apresentam limitações, restringindo a sua utilização na indústria automobilística. Neste trabalho é apresentada a prototipagem digital de um diferencial magneto-reológico com uma abordagem que vai desde sua concepção física até o controlador lógico. Os parâmetros geométricos do dispositivo são validados com a simulação do fluxo magnético pelo método dos elementos finitos. O modelo dinâmico do protótipo é usado para implementar um controlador PID que é ativado pela diferença de velocidade entre os eixos, em que a condição de ativação do sistema é feita pela teoria de máquinas de estados finitos.

2. PROTOTIPAGEM DIGITAL

A metodologia empregada nesse trabalho consiste na prototipagem digital do sistema de diferencial automotivo com acoplamento magneto-reológico interligando a carcaça aos semieixos que transmitem o torque para as rodas. A prototipagem digital permite o estudo e exploração do produto antes que ele esteja fabricado. É feito um dimensionamento via engenharia reversa utilizando o modelo real físico disponível no Laboratório de Metrologia – METROL, da Universidade Federal do Espírito Santo. O croqui desse projeto é mostrado na Figura 1.

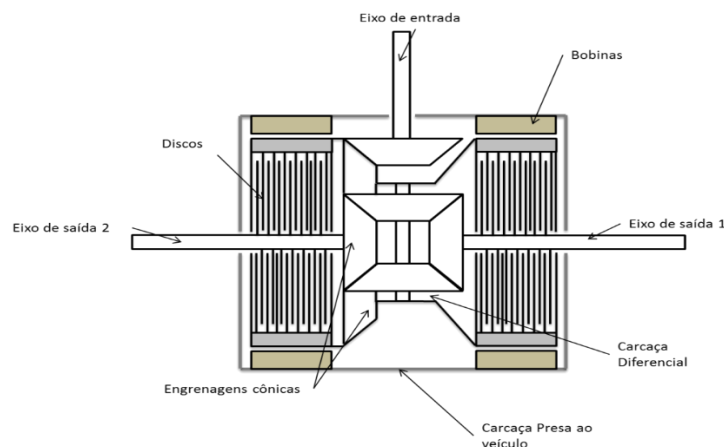


Figura 1: Croqui do Projeto.

O eixo de entrada recebe o torque vindo da transmissão do veículo, e transmite para os dois eixos de saída que são ligados às rodas. Para cada eixo, há um acoplamento com o fluido MR que, quando acionado, transmite o torque diretamente da carcaça do diferencial, que está conectada diretamente ao eixo de entrada, para o seu respectivo eixo de saída. O critério para o dimensionamento foram o torque e as limitações físicas do veículo, para não interferir na altura do eixo motriz em relação ao chão.

2.1. Dimensionamento do Acoplamento

O comportamento do fluido MR na presença de um campo magnético é aproximada pelo modelo plástico de Bingham (Lanzotti, 2014):

$$\tau_{MR} = \tau_Y + \mu_{MR}\dot{\gamma} \quad (1)$$

Sendo τ_{MR} a tensão de escoamento do fluido MR, τ_y é a tensão limite de cisalhamento do fluido. O termo μ é a viscosidade do fluido e $\dot{\gamma}$ representa a taxa de cisalhamento do fluido.

O cisalhamento do fluido é proporcional a velocidade angular dos discos ω e ao raio r_D do disco como mostra a Eq. (2). O gap de trabalho dos discos é representado por h .

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega r_D}{h} \quad (2)$$

O fluido se comporta como sólido até que a tensão de limite de cisalhamento, τ_y , seja excedida. Assim, o fluido exibe uma relação linear entre tensão τ e a taxa de deformação $\dot{\gamma}$.

A modelagem do torque é a mesma utilizadas em diversos trabalhos encontrados na literatura (Lanzotti *et al.*, 2014), (Kavlikoglu *et al.*, 2006) e (Guo *et al.*, 2012). Sendo r_D o raio do disco, e A é a área de contato entre os discos e o fluido.

$$T = \int_{r_i}^{r_o} \tau_{MR} r_D dA \quad (3)$$

A área de contato entre os discos é representada pela Eq. (4).

$$A = N_g \pi \int_{r_i}^{r_o} r_D dr_D \quad (4)$$

Sendo N_g o número de gaps, r_i e r_o os raios interno e externos dos discos. Reescrevendo a equação do Torque substituindo as Eq. (1), Eq. (2) e Eq. (4) em Eq. (3), temos a Eq. (5):

$$T = N_g \pi \int_{r_i}^{r_o} \left(\tau_y + \mu_{MR} \frac{\omega r_D}{h} \right) r_D (r_D dr_D) = 2N_g \pi \left[\frac{\tau_y}{3} (r_o^3 - r_i^3) + \frac{\omega \mu_{MR}}{4h} (r_o^4 - r_i^4) \right] \quad (5)$$

Através de processos iterativos calcula-se as dimensões e quantidade de discos para o acoplamento. Com 85 discos, de raio externo de 53 mm e raio interno de 20 mm foi obtido um torque de 1065 Nm, suficiente para aumentar a capacidade de torque em uma roda. O espaçamento utilizado (gaps) é de 0,3 mm. Foi obtido um valor de 42,492 kPa de tensão de escoamento do fluido, com um campo magnético de 0,7 T aproximadamente.

2.2. Dimensionamento da Bobina

O campo magnético é representado em um ponto do espaço pelo vetor B representa a densidade de campo magnético. O vetor H refere-se à força do campo magnético. Ainda que distintos, o campo “ B ” e “ H ” se relacionam através da permeabilidade magnética (μ) na seguinte formulação Eq. (6):

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (6)$$

Onde:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} \quad (7)$$

Em que μ_o é a permeabilidade do vácuo, que é uma constante com o valor de $4\pi * 10^{-7}$ H/m. O modelo é previsto a fim de direcionar o fluxo magnético perpendicularmente aos discos, sendo a região cercada por áreas com um material de baixa permissividade magnética. Nesse caso foi escolhido o Alumínio. A Figura 2 mostra um croqui simplificado do acoplamento, mostrando o sentido do fluxo magnético criado pela bobina, e em cinza o material isolante:

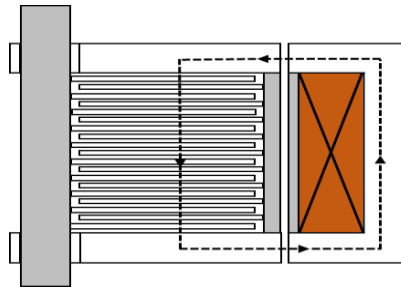


Figura 2: Percurso do fluxo magnético no acoplamento.

Cada elemento do circuito possui uma relutância magnética (R_i), que é uma grandeza análoga à resistência elétrica, e seu cálculo leva em consideração fatores como o tamanho do componente (l_i), a área da seção transversal (A_i) e a permissividade magnética do material (μ_i), como mostra a Eq. (8):

$$R_i = \frac{l_i}{\mu_i A_i} \quad (8)$$

As relutâncias que necessitam ser determinadas são as do fluido MR, dos discos de aço e do núcleo de Aço. Como o valor do fluxo magnético (ϕ) no fluido MR é um parâmetro de projeto, determinado pela saturação magnética do fluido, pode-se descrever o fluxo em função dos parâmetros raios internos e externos (r_i e r_e) e campo magnético (B), dados pelas Eq. (9) e Eq. (10):

$$\phi = \pi(r_o^2 - r_i^2)B \quad (9)$$

$$\phi = \frac{NbI}{\sum R_i} \quad (10)$$

Dessa forma, a partir da geometria do projeto e do valor da somatória das relutâncias magnéticas, é calculado o fluxo. A partir da permeabilidade magnética de cada material foram calculadas as relutâncias. Com as relutâncias calculadas e com o valor do fluxo no circuito, é possível calcular o número de voltas da bobina. O fio de cobre escolhido foi o AWG 26, que suporta uma corrente elétrica de 2 A. O valor encontrado para o número de voltas na espira é de 1853.

2.3. Simulação do Campo Magnético

As equações de dimensionamento da bobina apresentadas anteriormente têm validade apenas se não ocorre saturação dos elementos do circuito magnético. Para garantir essa condição, é conduzida uma simulação do campo magnético pelo método dos elementos finitos (FEM) usando o software ANSYS.

Dentro do software é iniciada uma análise do tipo nodal eletromagnética. São criados materiais para assimilação ao modelo. Para os materiais que tem comportamento ferromagnético (Aço 1008, material do núcleo de ferro e dos discos, e o fluido MR), são utilizados pontos das curvas B-H para realizar a caracterização. Os demais recebem um valor de permissividade igual a 1. A partir disso, foram definidas as condições de contorno, isolando o eixo de alumínio e as regiões externas às áreas criadas da simulação. A entrada de carga é a densidade de corrente aplicada na área relativa à seção transversal da bobina. A Figura 3 representa os resultados obtidos da simulação, sendo, respectivamente, as linhas de campo magnético e a densidade de fluxo magnético:

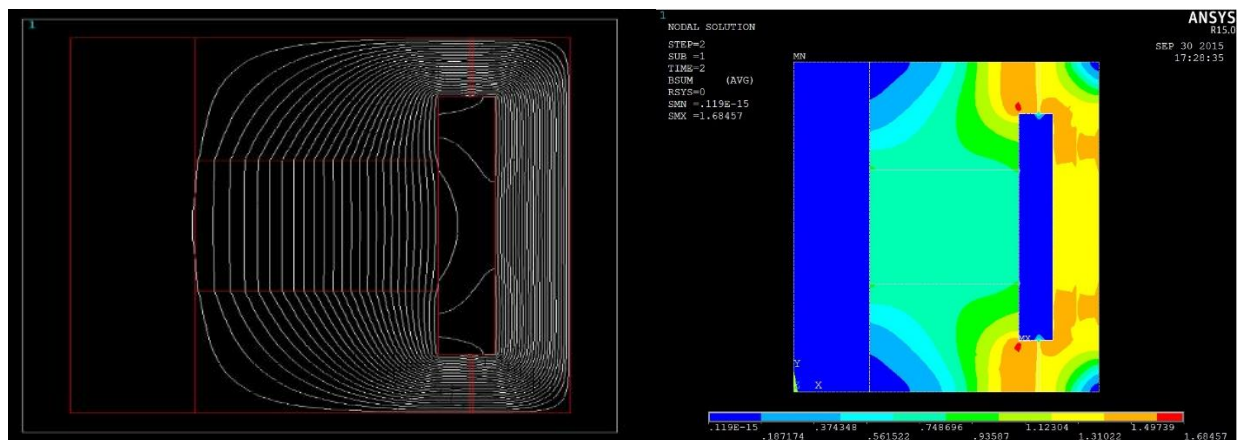


Figura 3: Linhas de campo Magnético e valores de densidade de fluxo magnético encontrados na simulação.

Na Figura 3, percebe-se que a direção do fluxo magnético é perpendicular ao cisalhamento do fluido MR, condição fundamental para a maior resistência ao cisalhamento do fluido. Além disso, o valor máximo do campo magnético é de 1,39T no núcleo de Aço. Por fim, avalia-se o valor da densidade na área equivalente ao fluido MR. O valor encontrado na região é por volta de 0,74T, superior ao valor mínimo esperado de 0,7T, validando o projeto.

2.3 Design Final

A Figura 4 apresenta o modelo 3D do diferencial MR.

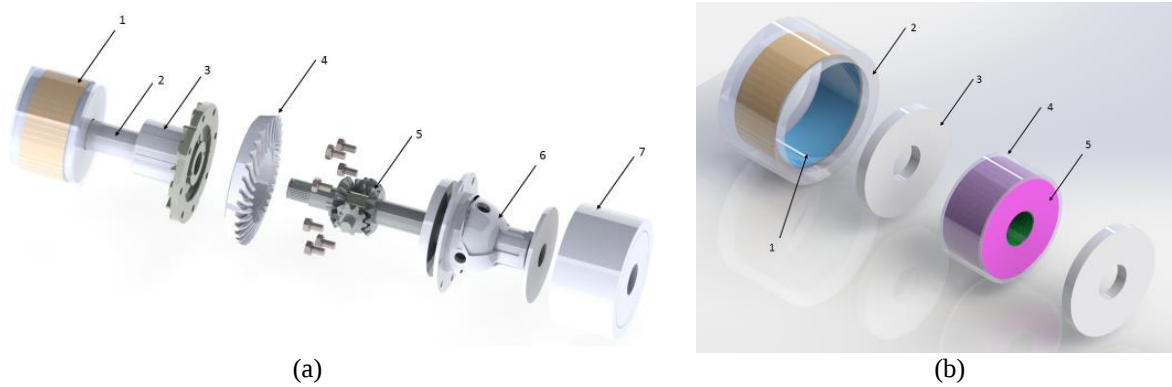


Figura 4: Vista explodida do diferencial MR e detalhes do acoplamento MR

Na Figura 4 (a) tem-se o diferencial tradicional (5), seu sistema de acionamento (4), os acoplamentos MR (7), onde se encontram as bobinas (1) e o fluido MR. O eixo (2) é substituído por um de alumínio, para minimizar a perda de fluxo do campo magnético sem perder propriedades mecânicas. No lado direito, um disco é preso ao encapsulamento de proteção do diferencial (6), para que este tenha a mesma rotação da engrenagem de acionamento (4) e no lado esquerdo, uma capa (3) é projetada para ligar os discos laterais do acoplamento ao acionamento.

A Figura 4 (b) mostra que os discos (5) são dispostos um a um, com um gap de 0,3 mm entre os mesmos. Alternadamente, eles são fixados no suporte de alumínio (4) e no eixo. O fluido MR se acomoda entre os discos, formando os gaps que geram o torque do dispositivo. Os discos laterais (3) fecham o sistema. O núcleo (2) de aço é preso na carcaça do diferencial e isolado magneticamente por um anel de alumínio (1). Os discos internos estão ligados ao eixo da roda, enquanto os discos externos estão ligados à carcaça do diferencial. Quando houver diferença de rotação entre os discos e o sistema for acionado, haverá a magnetização do fluido fazendo com que o torque seja transmitido e reduzirá a velocidade relativa entre os discos totalmente ou parcialmente.

3. MODELAGEM DINÂMICA DO SISTEMA

O acoplamento MR funciona a partir de uma bobina que gera o campo magnético que deve passar pela área transversal dos discos, que contém o fluido MR entre eles. O campo magnético é responsável por alterar a tensão limite de cisalhamento do fluido. O torque transmitido pelo acoplamento é gerado pelo atrito entre o fluido e os discos. Logo, um sistema em malha aberta tem como entrada a corrente elétrica capaz de gerar o campo magnético, e como saída o torque que o acoplamento transmite.

Com os parâmetros apresentados anteriormente, pode-se relacionar a corrente com o campo magnético na bobina. A Equação 11 é obtida a partir da Equação 6 substituída na Eq. (9) e posteriormente na Eq. (10):

$$H = \frac{N_b I}{\pi R_T \mu_0 (r_o^2 - r_i^2)} = \frac{N_b i}{C} \quad (11)$$

O valor de H representa a força do campo magnético, enquanto a corrente é I . O número de espiras da bobina é N_b . A soma das relutâncias do fluido e do aço é R_T . A permeabilidade magnética é μ_0 . O raio externo e o raio interno do disco é r_o e r_i respectivamente. Como todos os termos do denominador são constantes, considerou-se como sendo uma constante C .

A tensão limite de cisalhamento do fluido τ_y é relacionada com o campo magnético H pela curva $H \times \tau_y$ fornecida pelo fabricante do fluido.

Para o modelo no Simulink foi utilizado o bloco 2-D Lookup Table, no qual podem ser adicionados os valores da curva experimental diretamente, afim de ter um resultado mais preciso, abrindo mão do método de ajustes de curva.

Deve-se calcular a constante de tempo elétrica, ou constante de tempo indutiva, que causa um atraso na construção do campo magnético na bobina. Para isso, é necessário o cálculo do valor de indutância L utilizando a Eq. (12):

$$L = \frac{0,8 \cdot N^2 \cdot a^2}{6 \cdot a + 9 \cdot c + 10 \cdot h_e} \quad (12)$$

Sendo, L a indutância em microhenrys (μH), N o número de espiras, a o raio médio da bobina, em polegadas, c o comprimento do enrolamento em polegadas, e h_e a espessura do enrolamento em polegadas,

A constante de tempo indutiva já é conhecida, e é mostrada na Eq. (13):

$$c_e = L/R \quad (13)$$

Sendo, R , o valor da resistência do fio elétrico, que no caso é $0,34 \, \Omega/m$. Com o valor da constante, basta adicioná-la a uma função de transferência de primeira ordem.

Para encontrar o torque transmitido pelo acoplamento basta relacionar a Eq. (5) com o valor de τ_y encontrado. Logo, tem-se como entrada a tensão de cisalhamento τ_y e como saída o torque de transmissão T .

Como os valores de N_g , r_o , r_i são constantes e a segunda parte da Eq. (5) foi desprezada, por ser desprezível em relação à primeira (Kavlicoglu, 2006), considerou-se o Torque T como uma constante ct multiplicado pela tensão de limite de escoamento do fluido. A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos do acoplamento, após as considerações descritas.

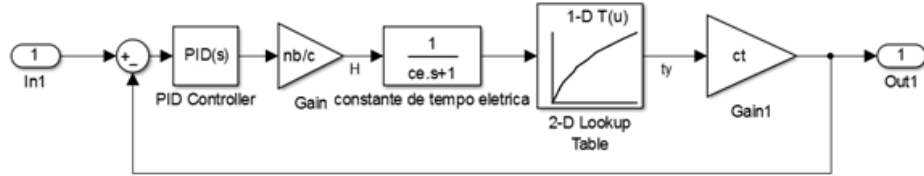


Figura 5: Diagrama de blocos do Acoplamento MR.

O modelo dinâmico de torque do diferencial é baseado no modelo proposto por Lanzotti *et al.* (2003) que relaciona os torques de saída nas rodas T_1 e T_2 com o torque vindo do motor. Esse é o torque na carcaça do diferencial T_p . Esse torque já está multiplicado pelas reduções da transmissão e do diferencial. Logo:

$$T_p = T_1 + T_2 \quad (14)$$

O diferencial recebe o torque do motor e divide em duas partes iguais, logo os torques T_1 e T_2 são iguais, como mostrado nas Eq. (15) e Eq. (16).

$$T_1 = \frac{T_p}{2} \quad (15)$$

$$T_2 = \frac{T_p}{2} \quad (16)$$

O torque transmitido nas rodas é considerado a soma do torque transmitido naturalmente pelo diferencial com o torque transmitido pelo acoplamento. Porém deve ser lembrado que o torque transmitido pelos acoplamentos em seu eixo faz o efeito contrário no eixo oposto, pois ele atua como um freio no eixo oposto, transmitindo o torque para o seu próprio eixo, como mostrado nas Eq. (17) e Eq. (18):

$$T_1 = \frac{T_p}{2} + \frac{T_{mr1}}{2} - \frac{T_{mr2}}{2} \quad (17)$$

$$T_2 = \frac{T_p}{2} + \frac{T_{mr2}}{2} - \frac{T_{mr1}}{2} \quad (18)$$

A velocidade das rodas também é considerada a média das velocidades de cada eixo, como mostrada na Eq. (19).

$$\omega_p = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (19)$$

Sendo ω_1 a velocidade do eixo 1, ω_2 a velocidade do eixo 2 e ω_p a velocidade da carcaça do diferencial.

4. CONTROLE DO DIFERENCIAL MR

O controle do torque dos acoplamentos é feito por variações da corrente de entrada das bobinas. O torque do acoplamento é somado com o torque que o diferencial é capaz de transmitir e assim é obtido o torque nas rodas.

O controlador utilizado no modelo é o controlador PID, cujos parâmetros são sintonizados a partir de rotinas pré-programadas no Matlab. O objetivo é ter uma resposta rápida, estável, e com sobressinal aceitável.

Os valores encontrados das constantes foram 0,019 para o controlador proporcional (K_p), 0,181 para o controlador integral (K_i) e finalmente, 0,0001 para o controlador derivativo (K_d). Na Figura 6 é mostrada a resposta à excitação em degrau unitário do acoplamento:

Para controlar o sistema, utiliza-se uma aplicação da teoria de máquinas de estados. Uma máquina de estados finitos é um modelo matemático usado para representar programas de computadores ou circuitos lógicos. O conceito é concebido como uma máquina abstrata que deve estar em um de seus finitos estados pré-definidos.

O software Simulink possui o pacote StateFlow, onde é possível criar o diagrama. A condição de transição do sistema é quando o a velocidade do eixo 2 for maior que a do eixo 1. Assim, o acoplamento 1 é ativado e será capaz de transmitir a metade do torque que está chegando no diferencial. Quando a velocidade do eixo 1 for maior ou igual a do eixo 2 o acoplamento 1 é desativado, retornando ao estado inicial.

A saída do controlador de estados finitos é T_{mr1} , ou seja, o torque que o acoplamento deverá ser capaz de transmitir. A saída do controlador de estados finitos, T_{mr1} , é a entrada do controlador PID do acoplamento. A entrada do controlador de estados finitos é o torque T_p do motor, e as velocidades ω_1 e ω_2 .

A resposta do sistema foi comparada com as respostas de um diferencial aberto e de um diferencial de deslizamento limitado, quando uma das rodas possui uma redução de sua força normal contra o piso durante a aceleração do veículo. Os resultados mostram que no modelo com diferencial aberto as rodas possuem grandes diferenças nas suas velocidades angulares, enquanto o de deslizamento limitado diminui essa diferença, obrigando as rodas a girarem quase que sincronizadamente (documentação Mathworks). O diagrama de blocos do exemplo pode ser conferido na figura 7:

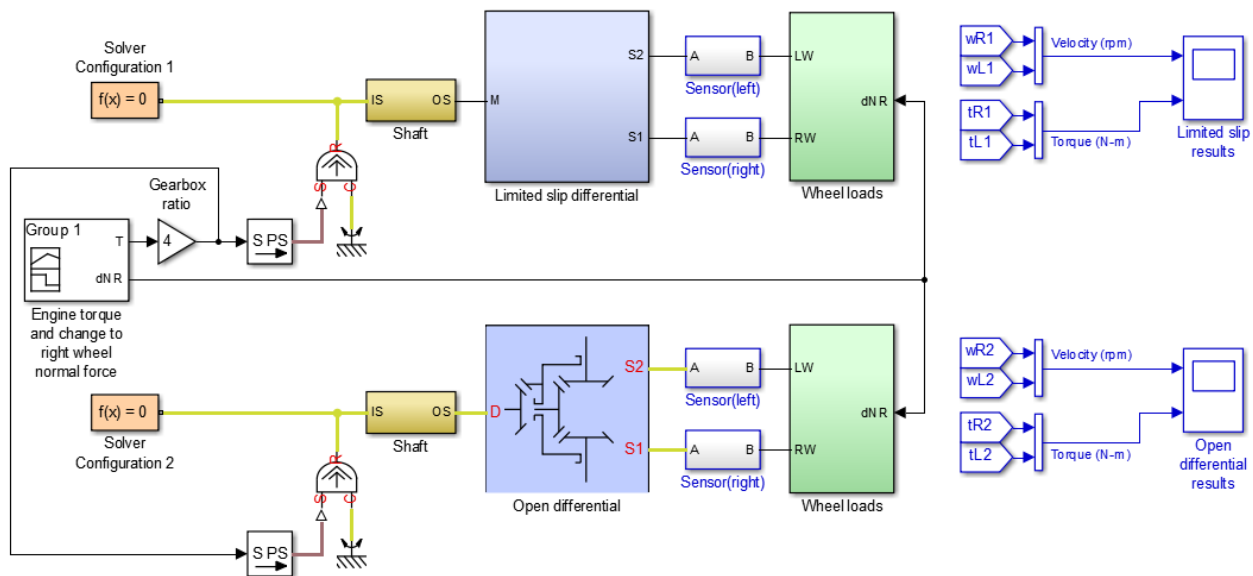


Figura 7: Exemplo do Simulink comparando um diferencial de deslizamento limitado (acima) com um diferencial aberto (abaixo).

Dentro do subsistema ('Limited slip differential') é possível observar o modelo do diferencial de deslizamento limitado. Adapta-se então a esse sistema os acoplamentos MR. Para isso é necessária a exclusão dos componentes não tradicionais do diferencial, restando apenas os componentes do diferencial aberto. São adicionados sensores para o acionamento lógico, os controladores PID e de estados finitos e as ligações necessárias aos eixos. Na Figura 8 é mostrado o diagrama de blocos do sistema:

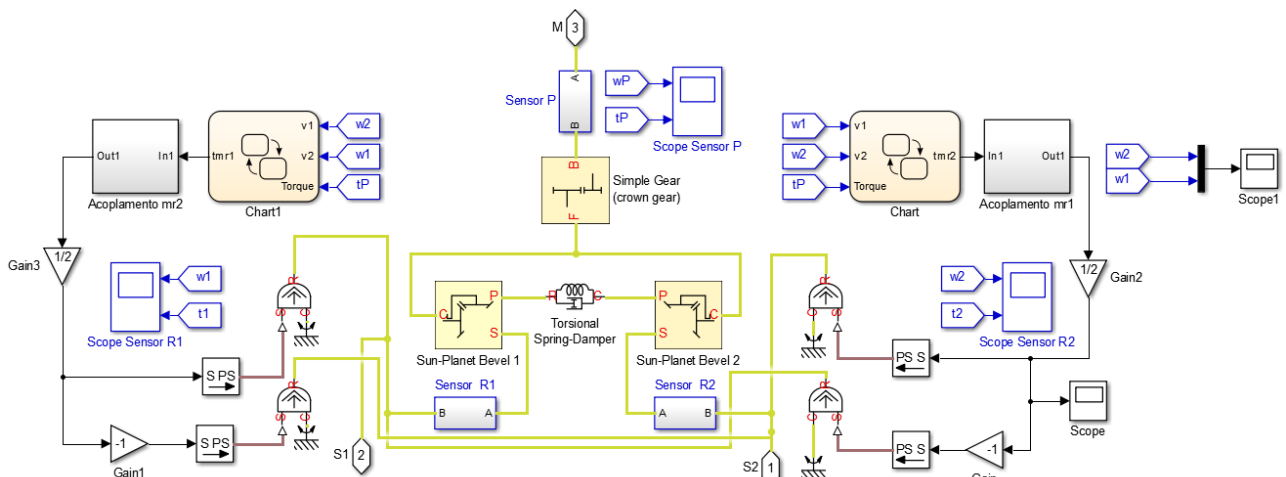


Figura 8: Diagrama de blocos do diferencial MR.

O bloco Signal Builder, que é a entrada do sistema, possui uma curva de torque do motor, e uma curva de força normal que é subtraída em uma das rodas, como é mostrada na Figura 9:

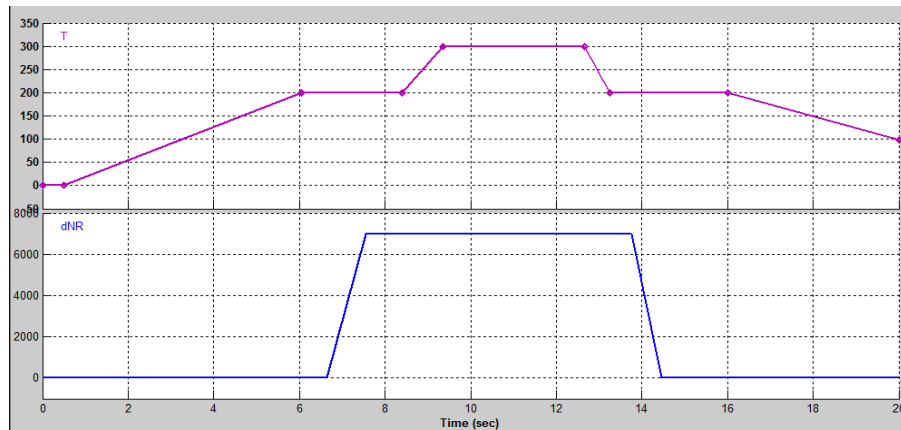


Figura 9: Curva de torque do motor. Amplitude em Nm e tempo em segundos (superior) e Curva de força normal subtraída em uma das rodas. Amplitude em N e tempo em segundos (inferior).

Percebe-se que aproximadamente aos 7 segundos uma das rodas sofre perda da força normal, e pouco depois dos 14 segundos a força normal volta a ser igual em ambas rodas.

A comparação é feita com os três sistemas nas mesmas condições. A Figura 10 mostra os resultados dos três diferenciais:

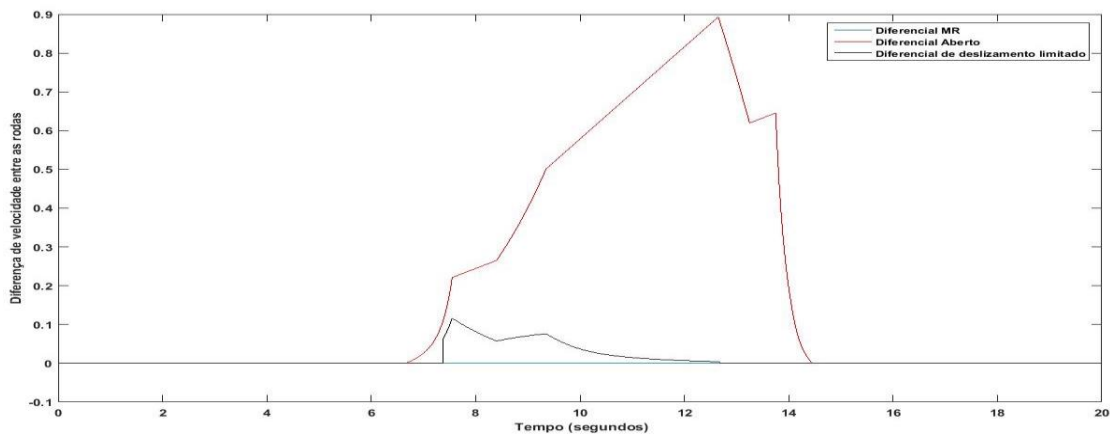


Figura 10: Diferença de velocidade nas rodas para um diferencial aberto, diferencial de deslizamento limitado e do diferencial MR. Amplitude em rpm e tempo em segundos.

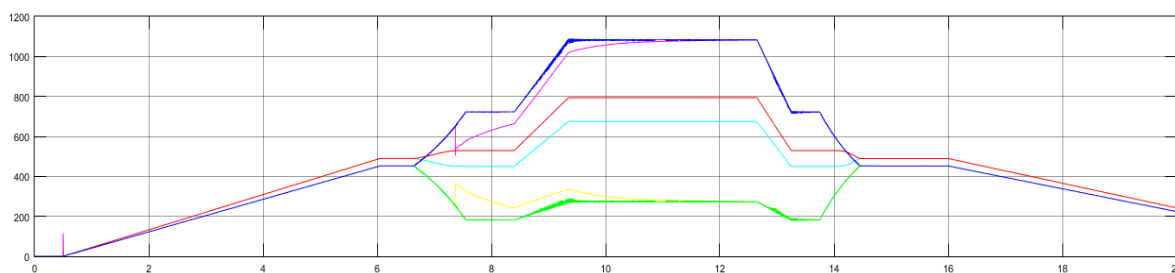


Figura 11: Comparação da distribuição de torque nos três casos. As linhas vermelha e azul claro representam o diferencial aberto, as linhas roxa e amarela o diferencial de deslizamento limitado, e as linhas azul escuro e verde o diferencial MR. O eixo vertical representa o torque em Nm, e o horizontal o tempo em segundos.

A perda da força normal ocasiona uma diferença de velocidade nos eixos, consequentemente a perda de aderência em uma das rodas e diminuição da velocidade do veículo. A diferença de velocidade entre as rodas nas três situações pode ser vista na Figura 10.

A Figura 11 mostra que o sistema promove um maior torque na roda com mais aderência, logo a diferença entre as velocidades diminui, o que garante que não existe deslizamento no sistema, consequentemente há mais estabilidade. Pode-se visualizar que para uma pequena diferença de velocidade, há necessidade de uma grande transferência de torque para o eixo com mais aderência.

O sistema é capaz de aumentar o torque na roda com aderência, consequentemente diminuindo a diferença de velocidade como no diferencial de deslizamento limitado do exemplo. O sistema está respeitando os critérios de ativação, logo quando uma roda está com velocidade maior ele liga, e assim que obtém a mesma velocidade ele desliga, e assim repete-se o ciclo. A resposta é rápida e atinge seu objetivo apenas com os acoplamentos e os controladores lógicos, dispensando bombas e motores elétricos, como previsto por Lanzotti *et al.* (2014).

O diferencial MR possui uma resposta de velocidade mais conveniente que do diferencial de deslizamento limitado. No diferencial MR não é possível observar qualquer diferença de velocidade entre as duas rodas quando ativado. Isso pode ser fundamental em uma situação de baixíssima aderência como atoleiros. Já no diferencial de deslizamento limitado, é possível verificar que há pequenas velocidades relativas em alguns momentos, visto quando a linha azul sobressai a linha roxa na Figura 10.

Esse é um exemplo de aplicação do projeto, porém a grande vantagem é poder aplicar o diferencial nas diferentes situações dinâmicas de um veículo apenas com a troca de parâmetros lógicos do sistema. Veículos modernos atuais possuem comandos para mudança de modos de condução, e junto a esse sistema poderiam ser variados os parâmetros do diferencial para as mais diversas aplicações, como normal, esportiva, chuva, off-road, neve, arrancada, entre outras.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

O trabalho mostra uma prototipagem digital de um diferencial automotivo autoblocante com dois acoplamentos utilizando fluido magneto-reológico. O dimensionamento dos acoplamentos se deu a partir das equações de escoamento em discos, para um torque de aproximadamente 1065 Nm. Em conjunto com as teorias de eletromagnetismo, dimensionou-se as bobinas. Iterações foram feitas até se obter valores ideais de torque de transmissão, fluxo magnético e dimensionamento dos componentes dos acoplamentos.

A simulação conduzida pelo método dos elementos finitos confirma as propriedades calculadas anteriormente e mostra que na região do fluido se tem um campo magnético de aproximadamente 0,7 T. O valor é capaz de satisfazer os requisitos de projeto e gerar um torque de transmissão de aproximadamente 1065 Nm. Além disso não há qualquer saturação nos materiais, validando as hipóteses utilizadas no dimensionamento. Os dois acoplamentos somam uma massa de 30,8 kg.

São modelados os acoplamentos e o diferencial MR, e são aplicados os controladores PID no conjunto. Um controlador de estados finitos é implementado para ser a chave lógica do sistema. São impostas condições de transição para avaliar a resposta do controlador em uma situação de perda de força normal em uma das rodas. O sistema mostrou-se estável e sua resposta alcançou seu objetivo.

Os resultados do diferencial MR se mostram mais interessantes que os do exemplo de diferencial de deslizamento limitado, uma vez que sua resposta é mais precisa e consegue igualar a velocidade entre as rodas de maneira mais consistente.

Para trabalhos futuros, é recomendado verificar o dimensionamento de alguns componentes visando sua capacidade de resistência torcional. Deve-se buscar otimização do design para facilitar montagem, fabricação e baratear custos. É interessante a adição de condições de transição do controlador de estados finitos em outras condições de dinâmica veicular. É conveniente montar uma bancada de testes a fim de obter respostas reais do sistema para comparação com o modelo teórico, para finalmente, realizar sua montagem física e testes em campo.

6. REFERÊNCIAS

- '78 Beetle Transaxle. Disponível em <<https://grabcad.com/library/78-beetle-transaxle>>. Acessado em 16 de novembro de 2015.
- “Entendendo o Eixo Diferencial”. Catálogo SPICER.
- Bucchi, F., Forte, P., Frendo, F., Musolino, A., Rizzo, R., “A fail-safe magnetorheological clutch excited by permanente magnets for the disengagement of automotive auxiliaries”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25(16) 2102–2114, 2014.
- Eger, A. “Simulação e análise do desempenho longitudinal veicular sob condições dinâmicas trativas”. 2007. 190f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- Filippin, C. G. “Sistemas Mecânicos Automotivos”, Apostila. Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná. 2009.
- Gomes, M. S. “Análise de Vibrações em Sistemas Mecânicos com Materiais Magneto-Reológicos”, 2003. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Guo, H. T., and Liao, W. H., 2012, A novel multifunctional rotary actuator with magnetorheological fluid, *Smart Mater. Struct.*, 21, 065012, (9pp);
- Kavlicoglu B, Gordaninejad F, Evrensel C, Fuchs A and Korol G “A semi-active high-torque magneto-rheological fluid limited slip differential clutch” *J. Vib. Acoust.* 128 604–10, 2006.
- Kavlicoglu B, Kavlicoglu N, Liu Y, Evrensel C, Fuchs A, Korol G and Gordaninejad F “Response time and performance of a high-torque magneto-rheological fluid limited slip differential clutch” *Smart Mater. Struct.* 16 149–59, 2007.
- Lanzotti, Antonio; Renno, Fabrizio; Russo, Michele; Russo, Riccardo; Terzo, Mario; “A Physical Prototype of an Automotive Magnetorheological Differential”, *Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 vol III*, WCE 2013, July 3 - 5, 2013, London, U.K.
- Lanzotti, Antonio; Renno, Fabrizio; Russo, Michele; Russo, Riccardo; Terzo, Mario; “Design and development of an automotive magnetorheological semi-active differential”, *Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Napoli Federico II*, 80125 Naples, Italy, 2014.
- Mathworks, “Clutch-Controlled Limited Slip Differential”, disponível em <<http://www.mathworks.com/examples/simdrive/2529-clutch-controlled-limited-slip-differential>>. Acessado em 16 de novembro de 2015.
- Mathworks, “SimDriveline”, disponível em <<http://www.mathworks.com/products/simdrive/>>. Acessado em 16 de novembro de 2015.
- Robinson, Nicholas Alan. Tokyo. Magneto-Rheological Variable Limited Slip Differential. US 6,585,616 B1.1 Jul 2003.
- SHAMES, I. H. e COZZARELLI, F. A. “Elastic and Inelastic Stress Analysis”, Prentice-Hall, 1992.
- Usoro, Patrick Benedict; Smith, Anthony L.; Kao, Chi-Kuan; Moser, George; Wixom, Gordon Sommer, “MAGNETORHEOLOGICAL FLUID CLUTCH”, US 6,318,531 B1 20, 2001.
- Xu, Xiaomei; Zeng, Caimin; “Design of a Magneto-rheological Fluid Clutch Based on Electromagnetic Finite Element Analysis” *2nd International Conference on Computer Engineering and Technology V5-182-185*, 2010.
- Wang, D., Hou, Y., 2013, Design and experimental evaluation of a multidisc magnetorheological fluid actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 2013 24: 640
- YANG, G., SPENCER-JR., B. F., CARLSON, J. D., e SAIN, M. K., “Large-Scale MR Fluid Dampers: Modelling and Dynamic Performance Considerations”, *Engineering Structures*, vol. 24, pp. 309-323, 2002.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DIGITAL PROTOTYPING OF AN AUTOMOTIVE MAGNETO-RHEOLOGICAL DIFFERENTIAL

Gabriel da Silva Lecchi, gabriel_lecchi@hotmail.com¹
Drielle Delpino, drielle.delpino@gmail.com¹
Arnaldo Gomes Leal Junior, arnaldo.leal@aluno.ufes.br¹
Rafhael Milanezi de Andrade, rafhaelmilanezi@gmail.com¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Universidade Federal do Espírito Santo, Avenida Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, 29075-910, Brazil

Abstract. *The differential is a mechanical device that allows distributing the torque between two axle shafts of the driving wheels of an automobile. This is essential for the vehicle to make turns. However, this device may have an undesirable behaviour when one of the wheels lose adhesion to the ground, making the vehicle to stand still, since the other wheel won't be able to transmit the needed torque to move the vehicle. To avoid this behaviour, it is necessary to limit the relative rotations between the axles. In this paper, it is proposed the use of a coupling that uses magnetorheological fluid (MR) which transmits torque to the wheel that has lost grip. MR fluids are smart materials that have their properties controlled by an induced magnetic field. Such materials have been used widely in the development of devices such as shock absorbers for vehicle suspensions, valves, prostheses, because they have low power consumption and high torque or resistive strength in relation to its weight. With the use of MR fluid in the differential coupling, it is expected that the vehicle has more stability on uneven grounds. It is presented the digital prototyping of the device and the simulation of magnetic flux by the finite element method (FEM) to define its geometric parameters. Through the dynamic prototype model is possible to implement a PID controller that is activate by the difference of torque between the axles, where the condition of activation happens though the theory of finite-state machines. Preliminary results show that the differential MR developed is promising for applications proposals, which require compact size, low weight and fast response time.*

Keywords: *magneto-rheological fluid, automotive differential, magneto-rheological coupling, digital prototyping*