



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº BR 102016024912-0

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: BR 102016024912-0

(22) Data do Depósito: 25/10/2016

(43) Data da Publicação Nacional: 29/05/2018

(51) Classificação Internacional: A61F 2/66; F16D 37/02; A61F 2/64.

(54) Título: ATUADOR MAGNETO- REOLÓGICO PARA PRÓTESES, EXOESQUELETOS E OUTRAS APLICAÇÕES ROBÓTICAS E USO

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Instituição de Ensino e Pesquisa. CGC/CPF: 17217985000104. Endereço: AV. ANTÔNIO CARLOS, 6627 - UNIDADE ADMINISTRATIVA II - 2º ANDAR- SALA 2011, Belo Horizonte, MG, BRASIL(BR), 31270-901, Brasileira; UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, Instituição de Ensino e Pesquisa. CGC/CPF: 32479123000143. Endereço: AVENIDA FERNANDO FERRARI, 514, CAMPUS UNIVERSITÁRIO, GOIABEIRAS, Vitória, ES, BRASIL(BR), 29075-910, Brasileira

(72) Inventor: RAFHAEL MILANEZI DE ANDRADE; CLAYSSON BRUNO SANTOS VIMIEIRO; MARCOS PINOTTI BARBOSA; ANTÔNIO BENTO FILHO.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 25/10/2016, observadas as condições legais

Expedida em: 10/10/2023

Assinado digitalmente por:

Alexandre Dantas Rodrigues

Diretor de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados

ÓATUADOR MAGNETO-REOLÓGICO PARA PRÓTESES, EXOESQUELETOS E OUTRAS APLICAÇÕES ROBÓTICAS E USOÔ

[01] A presente tecnologia apresenta um atuador que proporciona um torque ativo para próteses, exoesqueletos e outras aplicações robóticas, com características adequadas para reproduzir os movimentos de articulações que necessitem de torque ativo e passivo, aliada a um baixo custo energético. O conjunto motor atua apenas nos momentos necessários, ou seja, em que é preciso torque ativo, por exemplo, durante a contração concêntrica em uma perna saudável durante a marcha, enquanto que o freio magneto-reológico é utilizando quando não é necessário torque ativo, minimizando o consumo de energia. A invenção compreende um atuador ativo para próteses, exoesqueletos e outras aplicações robóticas, composto por um conjunto motor formado por motor, redutor e acoplamento magneto-reológico, acionado pela bobina e núcleo de ferro, responsáveis por gerar o torque ativo, disposto em paralelo ao freio magneto-reológico, responsável por gerar o torque passivo, que é acionado pela bobina e núcleo de ferro, que de forma coordenada, juntos reproduzem o movimento de uma articulação. O dispositivo é composto por duas estruturas principais, externa e interna, que apresentam movimento relativo entre si garantido por um conjunto de rolamentos. A estrutura externa do dispositivo se conecta ao segmento inferior da prótese/exoesqueleto/órtese/robô, enquanto a estrutura interna se conecta ao segmento superior da prótese/exoesqueleto/órtese/robô. Esta ordem pode ser alterada sem prejuízo para o funcionamento.

[02] Apesar dos avanços, ainda existem limitações para o uso de próteses e exoesqueletos. Em relação aos exoesqueletos, as principais dificuldades enfrentadas estão relacionadas ao peso e o elevado consumo de energia. Tais equipamentos precisam estar ligados diretamente à rede elétrica ou

carregar pesadas baterias para suprir o consumo de energia dos motores, atuadores e demais dispositivos. Os atuadores de joelhos de exoesqueletos, por exemplo, normalmente são rígidos, dificultando a adaptação a terrenos irregulares e não desempenhando o movimento adequado do joelho durante a marcha normal. O desenvolvimento de atuadores de baixo peso e consumo de energia é algo de grande importância para aumentar a viabilidade do uso dos exoesqueletos. Os dispositivos magnetos-reológicos (MR), que normalmente apresentam baixo consumo de energia e baixa relação peso-torque resistivo, podem ser de grande utilidade, aumentando a eficiência energética de tais equipamentos. (BOGUE, ROBERT (2009), "Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments", *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 36 Iss 5 pp. 421 ã 427; CHEN, J. Z., AND LIAO, W. H., Design, testing and control of a magnetorheological actuator for assistive knee braces, *Smart Mater. Struct.* ,19, 035029, (10pp), 2010; CESTARI, M., SANZ-MERODIO, D., AREVALO, J.C., GARCIA, E., 2015. An Adjustable Compliant Joint for Lower-Limb Exoskeletons. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 20, 889ñ898).

[03] Uma das aplicações mais interessantes de fluidos MR é em atuadores semiativos para controle em tempo real de próteses. Em tais sistemas, um pequeno amortecedor magneto-reológico é utilizado para controlar o movimento de um membro artificial com base em entradas de um grupo de sensores, com baixo consumo de energia. O benefício de uma articulação artificial com essa tecnologia é uma marcha mais natural que se adapta automaticamente à mudança de velocidade e ao terreno. Por outro lado, de acordo com Herr e Wilkenfeld (2003), apesar dos atuadores semiativos de próteses transfemorais apresentarem vantagens sobre os passivos, não são capazes de produzir energia mecânica e, por isso, não podem replicar o trabalho positivo feito por joelhos humanos em

determinadas atividades, como sentar e levantar, subir escadas ou rampas e outros. Por não serem capazes de reproduzir a marcha normal, Geng et al. (2012) reportam que as próteses passivas e semiativas determinam um gasto de até 60% a mais de energia metabólica. Com essas próteses, o indivíduo compensa a falta de torque ativo do atuador da prótese com movimentos adicionais, por isso os ângulos no quadril e no joelho são maiores na perna amputada do que na perna saudável (HERR, H., WILKENFELD, A., User-adaptive control of a magnetorheological prosthetic knee, *Ind Rob.*, 30(1):42-55, 2003; GENG, Y., YANG, P., XU, X., CHEN, L., 2012. Design and simulation of Active Transfemoral Prosthesis, in: *Control and Decision Conference (CCDC)*, 2012 24th Chinese, pp. 3724-3728.)

[04] As próteses semiativas tem desvantagens e, por isso, as próteses ativas deveriam ter um maior desenvolvimento, mas não é isso que ocorre pois o número de próteses ativas ainda é pequeno. Além disso, os atuadores de membros inferiores de exoesqueletos ainda precisam ser aprimorados para reproduzir a marcha de forma adequada a um baixo consumo de energia. Diante desse cenário, muitos pesquisadores têm dedicado esforços para desenvolver novas formas de próteses ativas e atuadores de exoesqueletos, nos últimos anos diferentes dispositivos e configurações foram propostos. Martinez-Villalpando e Herr, (2009), Garcia et al., (2011) e Filho et al., (2014) propõem a utilização de atuadores serial linear elástico entre o fêmur e a tíbia. Essa configuração apresenta características como tolerância a impactos, baixa impedância de saída mecânica e armazenamento passivo de energia mecânica. Entretanto são dispositivos pesados com alto consumo de energia, dificultando sua utilização em próteses ou exoesqueletos. Chen e Liao (2010) e Guo e Liao (2012) desenvolvem atuadores magneto-reológicos rotativos que podem funcionar como motor, na situação em que houver necessidade de realizar trabalho, como embreagem, quando for necessário controlar o torque de

saída, e como freio ou amortecedor, quando for necessário dissipar energia, contudo os protótipos apresentam algumas limitações. Em Chen e Liao (2010) o conjunto motor, redutor e atuador é grande e pesado demais para ser usado em uma prótese ou exoesqueleto. Em Guo e Liao (2012), apesar das dimensões adequadas, o torque de saída é insuficiente para essas aplicações. O dispositivo atinge 0,27 N.m a 1300 rpm (36,8 W), todavia, segundo Kawamoto e Sankai (2002) e Kapti e Yucenur (2006) o torque mínimo para uma caminhada normal é de 30,0 N.m, em muitos casos a potência de saída necessária é na ordem de 100 W (MARTINEZ-VILLALPANDO, E. C., HERR, H., Agonist-antagonist active knee prosthesis: A preliminary study in level-ground walking. J Rehabil Res Dev. 2009;46(3):361-73; GARCIA, E., AREVALO, J. C., MUNOZ, G., On the biomimetic design of agile-robot legs. Sensors, Basel, Switzerland, 11, 11305, 2011; FILHO, A. B., ANDRADE, R. M. E MATOS, M. C., Digital Prototyping of a Series Elastic Actuator for Exoskeletons, CONEM 2014, 2014; CHEN, J. Z., AND LIAO, W. H., Design, testing and control of a magnetorheological actuator for assistive knee braces, Smart Mater. Struct., 19, 035029, (10pp), 2010; GUO, H. T., AND LIAO, W. H., A novel multifunctional rotary actuator with magnetorheological fluid, Smart Mater. Struct., 21, 065012, (9pp), 2012; KAWAMOTO, H. AND SANKAI, Y., Comfortable power assist control method for walking aid by HAL-3, Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, 4, TP1B2, 2002; KAPTI, A.O., YUCENUR, M.S., Design and control of an active artificial knee joint. Mechanism and Machine Theory 41, 1477-1485, 2006.).

[05] O documento US8193670B2, intitulado *“Magnetorheological Actuators”* refere-se a um atuador magneto-reológico capaz de funcionar como motor, embreagem ou freio. O dispositivo é um motor, cujo rotor é um acoplamento magneto-reológico. O motor compreende um estator feito de um material magnético de alta permeabilidade, uma bobina externa

enrolada em torno do estator. O acoplamento magneto-reológico é o rotor do motor, responsável por transferir a potência para o eixo de saída, que é feito de um material de alta permeabilidade magnética e uma cavidade configurada para receber o fluido magneto-reológico. Para que o sistema seja capaz de atuar como freio, é necessário que o giro do motor seja restringido, por alimentação elétrica, provocando gasto de energia mais elevado. Portanto, além da configuração ativa se diferenciar desta tecnologia, por não utilizar um motor independente do acoplamento magneto-reológico, e não apresentar redutor entre o motor e o acoplamento, essa invenção não possui sistema de frenagem independente, como é proposto nesta tecnologia.

[06] O documento PL20120398878, intitulado *óActive prosthetic shinô* refere-se a uma prótese ativa de dois eixos acionados: o eixo de articulação do joelho, acionado por um motor elétrico para acionamento do joelho, e o eixo de articulação do tornozelo, impulsionado por um motor elétrico para a movimentação do tornozelo. As rotações dos motores são reduzidas por engrenagens. A articulação do joelho é equipada com uma embreagem com um mecanismo de atuação que transfere o movimento de rotação do motor do joelho para a parte inferior da prótese. Além disso, a articulação do joelho é equipada com um freio hidráulico acionado por uma bomba hidráulica. Portanto, não só a configuração mecânica ativa da prótese em questão se diferencia da presente tecnologia, mas também o torque passivo é distinto, vez que na tecnologia objeto do presente pedido é utilizado o freio magneto-reológico.

[07] O documento CN102247229, intitulado *ôActive and passive joint prosthesisô* refere-se a um mecanismo de prótese de articulação ativa e passiva, que compreende um mecanismo ativo de condução, um mecanismo de freio passivo, um eixo de articulação do joelho, um acoplamento de sobrecarga. O mecanismo de condução ativa consiste de

um servomotor de corrente contínua, um redutor e uma engrenagem. O mecanismo restritivo passivo consiste de um servomotor de corrente contínua e um eixo de engrenagem cônico. O eixo de articulação do joelho é montado sobre um bloco em forma de U consistindo de uma placa do lado esquerdo, uma placa lateral direita e uma placa de topo. Pode-se observar, então, que o mecanismo passivo utiliza um motor, enquanto o da presente tecnologia utiliza-se de um freio magneto-reológico que proporciona uma redução no gasto energético e uma grande compatibilidade de funcionamento com um joelho humano saudável.

[08] Diante do exposto, nota-se que, apesar dos avanços e pesquisas em tecnologia assistiva e das pesquisas na área, ainda é necessário desenvolver atuadores específicos para muitas das aplicações. Por exemplo, as pesquisas realizadas para o desenvolvimento de próteses transfemorais se limitam a dimensionar as próteses para que tenham peso similar a uma perna saudável. Contudo, o momento de inércia da perna desempenha papel importante na marcha humana, principalmente na fase de balanço da perna. Na presente tecnologia, quando o atuador for utilizado como uma prótese de joelho, o desenvolvimento do atuador considera que a prótese final deve ter o peso e o momento de inércia de uma perna saudável, que são fundamentais para reproduzir a marcha humana de forma adequada.

[09] A invenção compreende um atuador ativo para próteses, exoesqueletos e outras aplicações robóticas, composto por um conjunto motor formado por motor, redutor e acoplamento magneto-reológico, acionado pela bobina e núcleo de ferro, responsáveis por gerar o torque ativo, disposto em paralelo ao freio magneto-reológico, responsável por gerar o torque passivo, que é acionado pela bobina e núcleo de ferro, que de forma coordenada, juntos reproduzem o movimento de uma articulação. O dispositivo é composto por duas estruturas principais, externa e interna,

que apresentam movimento relativo entre si garantido por um conjunto de rolamentos. A estrutura externa do dispositivo se conecta ao segmento inferior da prótese/exoesqueleto/órtese/robô, enquanto a estrutura interna se conecta ao segmento superior da prótese/exoesqueleto/órtese/robô. Esta ordem pode ser alterada sem prejuízo para o funcionamento.

[010] A presente tecnologia apresenta um atuador que proporciona um torque ativo para próteses, exoesqueletos e outras aplicações robóticas, com características adequadas para reproduzir os movimentos de articulações que necessitem de torque ativo e passivo, aliada a um baixo custo energético. O conjunto motor atua apenas nos momentos necessários, ou seja, em que é preciso torque ativo, por exemplo, durante a contração concêntrica em uma perna saudável durante a marcha, enquanto que o freio magneto-reológico é utilizado quando não é necessário torque ativo, minimizando o consumo de energia.

BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

[011] A Figura 1 representa o modelo esquemático do atuador magneto-reológico que compreende: motor (1), redutor (2), saída do redutor (5), acoplamento magneto-reológico (4), bobina (12), núcleo de ferro (13), freio magneto-reológico (3), bobina (10), núcleo de ferro (11), estruturas externa (7), estrutura interna (6), saída do redutor (5), segmento inferior (8) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô, segmento superior (9) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô.

[012] A Figura 2 representa a vista explodida do atuador magneto-reológico que compreende: motor (1), redutor (2), saída do redutor (5), acoplamento magneto-reológico (4), bobina (12), núcleo de ferro (13), freio magneto-reológico (3), bobina (10), núcleo de ferro (11), estruturas externa (7), estrutura interna (6), saída do redutor (5), segmento inferior (8) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô, segmento superior (9) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô.

[013] A Figura 3 representa linhas de campo magnético do: (a) Acoplamento magneto-reológico, (b) Freio magneto-reológico.

[014] A Figura 4 representa a densidade de campo magnético do: (a) Acoplamento magneto-reológico, (b) Freio magneto-reológico.

[015] A Figura 5 representa as tensões atuantes no atuador: (a) nos encapsulamentos do atuador no pior caso de carga, (b) na saída do redutor no pior caso de torque.

[016] A Figura 6 representa os deslocamentos atuantes no atuador: (a) nos encapsulamentos do atuador no pior caso de carga, (b) na saída do redutor no pior caso de torque.

[017] A Figura 7 representa o modelo dinâmico do atuador que compreende: motor (1), redutor (2), acoplamento magneto-reológico (4), freio magneto-reológico (3), estruturas externa (7), saída do redutor (5), segmento inferior (8) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô, segmento superior (9) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô.

[018] A Figura 8 representa o diagrama de blocos do atuador magneto-reológico, que compreende: motor (1), redutor (2), acoplamento magneto-reológico (4), freio magneto-reológico (3).

[019] A Figura 9 representa a comparação entre o torque do joelho na marcha normal (linha magenta), torque produzido no atuador magneto-reológico (linha azul) e torque produzido se somente o motor e redutor (linha magenta) fossem utilizados.

[020] A Figura 10 representa a comparação entre o consumo de energia do atuador magneto-reológico (linha azul) e da energia se somente o motor e redutor (linha magenta) fossem utilizados.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA TECNOLOGIA

[021] A presente tecnologia se refere a um atuador ativo para próteses, exoesqueletos e outras aplicações robóticas, que compreende um conjunto motor formado por motor (1), redutor (2), saída do redutor (5) e

acoplamento magneto-reológico (4), acionado pela bobina (12) e núcleo de ferro (13), responsáveis por gerar o torque ativo, disposto em paralelo ao freio magneto-reológico (3), responsável por gerar o torque passivo, que é acionado pela bobina (10) e núcleo de ferro (11), que de forma coordenada, juntos reproduzem o movimento de uma articulação. O dispositivo também compreende duas estruturas principais, externa (7) e interna (6), que apresentam movimento relativo entre si garantido por um conjunto de rolamentos. A estrutura externa (7) do dispositivo se conecta ao segmento inferior (8) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô, enquanto a estrutura interna (6) se conecta ao segmento superior (9) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô. Esta ordem pode ser alterada sem prejuízo para o funcionamento, ou seja, a parte externa (7) pode ser conectada ao segmento superior (9) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô, e a parte interna (6) pode ser conectada ao segmento inferior (8) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô.

[022] A dissipação da energia resultante do processo da caminhada é realizada pelo freio (3), que funciona pelo controle do atrito viscoso do fluido MR, que é uma solução coloidal formada por partículas magnetizáveis misturadas com um óleo inerte, geralmente à base mineral ou à base de silicone. O freio MR (3) é composto por múltiplos discos, como pode ser verificado nas Figuras 1 e 2, parte deles estão conectados à estrutura externa (7) (discos externos), que por sua vez está conectada ao seguimento inferior. Intercalados com os discos externos, estão os discos internos, que se conectam a estrutura interna (6), que por sua vez está conectada ao seguimento superior, ou seja, os discos internos e externos possuem movimento relativo. O fluido ocupa o espaço entre os discos externos e internos. À medida que o fluido MR sofre ação de um campo magnético externo, criado da bobina (10) e direcionado pelo núcleo de ferro (11), suas partículas começam a formar estruturas colunares paralelas às

linhas de fluxo magnético, que alteram as propriedades reológicas do fluido, como tensão limite de escoamento entre outras. Assim o fluido pode se comportar como um sólido ou semissólido dependendo da ação do campo magnético. Com a aplicação do campo sob o fluido, há maior restrição de movimento entre o fluido e os discos, promovendo maior resistência ao movimento relativo entre os discos e, por consequência, entre as estruturas interna (6) e externa (7).

[023] O torque ativo é produzido pelo motor (1), amplificado pelo redutor (2) e transferido pelo acoplamento MR (4) para a estrutura externa (7). Os estatores do motor e do redutor são fixos na estrutura interna (6) e a saída do redutor (5) está conectada ao núcleo de ferro (13), que se conecta à parte dos discos do acoplamento (4) (discos internos), os demais discos estão ligados à estrutura externa (7) do atuador (discos externos). O acoplamento MR (4) tem o mesmo princípio de funcionamento do freio MR, ou seja, quando o campo magnético é ativado, a tensão limite de cisalhamento do fluido aumenta, impedindo o movimento relativo entre os discos. Dessa forma, o torque produzido pelo motor (1) e amplificado pelo redutor (2) é transferido para a estrutura externa (7) do atuador quando o campo magnético do acoplamento é ativado. Contudo o conjunto motor pode funcionar sem o acoplamento magneto-reológico (4), com a saída do redutor (5) conectada diretamente à estrutura externa (7).

[024] A configuração proposta permite que o atuador MR tenha menor consumo de energia quando comparado com os demais atuadores ativos. O conjunto motor, responsável pelo maior consumo de energia, é acionado apenas no momento em que o torque ativo é necessário. Quando exigido torque passivo, apenas o freio MR (3) é utilizado. Nos casos em que não é necessário torque ativo ou passivo, por exemplo, no final da fase de voo da perna, motor, acoplamento e freio não são ativados e o atuador gira livremente, permitindo maior economia de energia. A configuração foi

concebida para apresentar menor consumo de energia, mas também para permitir realizar atividades em que o torque ativo é necessário, por exemplo, quando utilizado em próteses transfemorais, subir escadas, rampas, levantar e sentar, o que não é realizado de forma adequada com próteses passivas ou semiativas.

[025] Nos casos em que o torque passivo exigido seja maior, como no caso de descer escadas, o acoplamento MR pode funcionar como freio, ao se bloquear o giro do motor. Nesse caso o torque passivo total resistido pelo atuador é a soma dos torques máximos no acoplamento e no freio.

[026] O atuador pode atuar apenas como atuador semiativo em que somente o freio magneto-reológico (3) é utilizado. O sistema de controle pode ser projetado para que, no caso da bateria estar com baixa carga, opere na função semiativa, em que somente o freio magneto-reológico (3) é utilizado, permitindo um baixo consumo de energia, até que o usuário possa carregar a bateria.

[027] O atuador pode ser configurado, também, para utilizar o conjunto motor como freio junto com o freio magneto-reológico (3) para aumentar o torque passivo resistido pelo atuador.

[028] O motor (1), redutor (2), acoplamento magneto-reológico (4) e o freio magneto-reológico (3) do atuador podem ser dimensionados para diversos tipos de acionamento, contemplando diferentes intensidades de torque ativo e torque passivo, podendo ser alimentado a partir de uma bateria ou da rede elétrica.

[029] O atuador magneto-reológico descrito pode ser aplicado em articulações de próteses, exoesqueletos e órteses de membros inferiores e superiores, robôs e quaisquer outras aplicações que necessitam de articulações ativas e semiativas.

[030] A invenção proposta pode ser mais bem compreendida através do exemplo abaixo, não limitante da tecnologia.

Exemplo 1 ã Simulação do atuador

[031] O atuador MR foi dimensionado e projetado, neste exemplo, como um joelho de prótese. Foram utilizados programas computadorizados para simular e comparar o seu desempenho com um joelho humano saudável e também avaliar o gasto energético.

[032] Conforme é possível verificar na Figura 3, foi simulado o campo magnético no acoplamento MR e as linhas de campo magnético se comportam da maneira esperada, percorrendo o caminho desejado e atravessando a região do fluido magneto-reológico de maneira perpendicular à direção do cisalhamento, o que é fundamental para garantir a máxima resistência ao cisalhamento na área do fluido.

[033] Na Figura 4, o valor máximo do campo magnético é de 1,85T e 1,78T no núcleo de ferro do acoplamento e do freio magneto-reológico, respectivamente. Por ser inferior à saturação do material utilizado (2,1T), garante que as hipóteses usadas para o cálculo da bobina estão corretas. Por fim, avalia-se o valor do campo magnético na área equivalente ao fluido MR. O valor encontrado na região é por volta de 0,58T e 0,55T no acoplamento e no freio, respectivamente. Valores similares ao estimado pelos cálculos. A densidade de fluxo magnético é homogênea entre os discos e o fluido MR, validando o projeto do freio e do acoplamento magneto-reológico.

[034] Após a elaboração do modelo 3D é realizada simulação para análise de tensões e deformações nas partes mais críticas do dispositivo. O caso mais crítico é atingido ao descer escadas, a força de reação pode atingir 1.000N. Neste caso as maiores solicitações aparecem na cobertura externa do atuador e no encapsulamento do motor e redutor, que suportam as maiores cargas. É analisado também o caso de maior torque ativo (55 N.m) que é suportado pela saída do redutor. É considerado que o atuador MR é

utilizado por um indivíduo de 67,2 kg de massa. Os resultados são apresentados nas Figuras 5 e 6.

[035] Como é possível verificar através da análise pelas tensões equivalentes de Von Mises, Figuras 5 e 6, as tensões presentes na estrutura estão abaixo do limite de escoamento do material. Os maiores valores estão concentrados nas proximidades do local de aplicação das cargas, no caso dos encapsulamentos do atuador, e na fixação com parafusos, no caso da saída do redutor. Os deslocamentos são da ordem de centésimos de milímetro. O maior deslocamento está na conexão superior sendo seu valor próximo de 0,065 mm que não representa um problema na utilização do atuador.

[036] A Figura 7 mostra a representação esquemática do modelo dinâmico do atuador magneto-reológico. O modelo dinâmico consiste em um conjunto motor formado por motor (1), freio (3) e acoplamento MR (4), responsável por gerar o torque ativo e o freio magneto-reológico, responsável por gerar o torque passivo. O conjunto motor (motor, redutor e acoplamento) trabalha em paralelo com o freio MR. As inércias do encapsulamento (7) e da carga (14) são adicionadas ao modelo dos dois componentes do atuador. A estrutura externa do dispositivo se conecta ao segmento inferior (8) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô, enquanto a estrutura interna (6) se conecta ao segmento superior (9) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô.

[037] A Figura 8 mostra o diagrama de blocos do conjunto motor (motor (1), redutor (2) e acoplamento MR (4)) e do freio MR (3) já com os controladores posicionados com suas respectivas retroações.

[038] A entrada do sistema é o torque medido em um joelho saudável durante um passo da marcha humana. O controlador por estados finitos proposto neste exemplo possui uma abordagem simplificada do problema. Os estados são definidos como sendo apenas o conjunto motor e o freio e a

condição de transição entre freio e o conjunto motor é o tempo de um ciclo da marcha. O tempo é a condição de transição escolhida para essa análise inicial, uma vez que aproxima bem o que de fato acontece na marcha humana.

[039] O controlador por estados finitos funciona como uma chave lógica do sistema, que alterna o funcionamento do atuador multifuncional de conjunto motor para freio. O sinal de entrada chega ao controlador de estados finitos passando primeiro pelo freio. A condição de transição para o conjunto motor é o tempo de ativação maior que 0,15 segundos e menor que 0,4 segundos. Os estados freio e conjunto motor são estados exclusivos, ou seja, quando acontece um não acontece o outro. Quando o tempo de acionamento do sistema chega a 0,4 segundos, a condição de transição de motor para freio é alcançada e o estado ativo passa a ser o freio.

[040] O diagrama de blocos do acoplamento magneto-reológico foi elaborado para que este reproduzisse o torque de saída do motor, permitindo que todo o torque produzido fosse transmitido para o encapsulamento externo, que está ligado à parte inferior da perna.

[041] O diagrama de blocos do motor CC possui duas saturações. As saturações têm a função de indicar limitações existentes no modelo físico. A primeira saturação do modelo está embutida no controlador do motor. A função dessa saturação é limitar a saída para valores de no máximo 24 V. Uma vez que o motor do exemplo tem sua alimentação com essa tensão e valores superiores poderiam ocasionar em aquecimento ou gasto de energia excessivo. É utilizado um bloco próprio de saturação na segunda saturação que limita o valor da corrente do motor a valores que não ultrapassem a corrente de partida fornecida em catálogo. O freio e o acoplamento MR possuem saturações presentes nas saídas de corrente da bobina, limitando seu valor a corrente máxima suportada pelo fio da bobina.

[042] O controlador utilizado no modelo dinâmico do motor, acoplamento e freio deste exemplo é o controlador PI que une a ação de controle proporcional com a ação de controle integral.

[043] A Figura 9 mostra a resposta do sistema tendo como entrada a curva do torque necessário para uma pessoa completar um ciclo da marcha. É feita a comparação entre o torque do joelho na marcha normal (linha magenta), torque produzido no atuador MR (linha azul) e torque produzido se somente o motor e redutor fossem utilizados (linha magenta), como acontece na prótese Power Knee, do fabricante Össur, e em joelhos de alguns exoesqueletos. A diferença na resposta é quase imperceptível, mostrando que o freio magneto-reológico pode ser usado para substituir o motor onde não é necessário torque ativo. O fluido MR possui tempo de resposta de poucos milissegundos, o que facilita a sintonia de um controlador que precisa ter um tempo de resposta mais baixo.

[044] A potência (P_b) consumida pelo acoplamento e freio magneto-reológico leva em consideração a alimentação de corrente na bobina, conforme a Equação 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.:**

$$P_b = I^2 R_b \quad (\text{Equação 1})$$

[045] A potência consumida pelo freio MR P_b é a multiplicação entre o quadrado da corrente de entrada na bobina I e a resistência elétrica do fio da bobina do freio MR R_b . O valor da corrente varia com o tempo. O valor da resistência é constante. A resistência elétrica do fio de cobre utilizado na bobina do exemplo é tabelada. O fio escolhido é o AWG 25, que possui 0,108 Ω/m de resistência.

[046] A potência elétrica consumida pelo conjunto motor é calculada utilizando princípios da lei de Ohm acrescido da potência consumida pela bobina do acoplamento, conforme a Equação 2:

$$P_t = I^2 R_t + I^2 R_b \quad (\text{Equação 2})$$

[047] A potência elétrica consumida pelo conjunto motor P_m é o produto entre a corrente de armadura do motor CC I_a e sua tensão de armadura V_a , a potência consumida pelo acoplamento é a multiplicação entre o quadrado da corrente de entrada na bobina I_e e a resistência elétrica do fio da bobina do acoplamento R_{ee} . Tanto a corrente quanto a tensão na armadura variam com o tempo e dependem da entrada do sistema.

[048] A análise da energia consumida pelo atuador MR em um ciclo da marcha humana é realizada a partir da curva de potência elétrica consumida. A Equação 3 mostra a relação entre energia e potência consumida.

$$E = \int_0^T P_m dt \quad (\text{Equação 3})$$

[049] A energia consumida E é a integral no tempo da potência consumida P_m . A Figura 9 apresenta a comparação entre o consumo de energia do atuador MR durante um ciclo da marcha e o consumo de energia se somente o motor com redutor fossem utilizados para reproduzir o movimento do joelho.

[050] Caso o movimento do joelho fosse executado apenas pelo conjunto motor e redutor o consumo de energia durante um ciclo da marcha seria de 2,1J, 62% maior do que o consumo do atuador MR durante um ciclo da marcha (1,3 J), como verificado na Figura 10.

[051] O motor deste atuador, responsável pelo maior consumo de energia, é exigido apenas no momento em que o torque ativo é necessário, o que não acontece com as outras próteses ativas. Nos casos em que não é necessário torque ativo ou passivo, por exemplo, no final da fase de voo da perna, motor, acoplamento e freio não são ativados e o atuador gira livremente, permitindo maior economia de energia, enquanto que nos outros atuadores para joelho é necessário usar motores ou atuadores hidráulicos ou pneumáticos para executar o movimento de forma correta.

[052] O resultado indica que a configuração proposta para o atuador MR é mais eficiente do que a configuração da prótese Power Knee, Össur, e de alguns joelhos de exoesqueletos. Essa economia de energia tem resultados práticos muito relevantes, já que a bateria utilizada na prótese pode ser mais leve em relação a outras já existentes, o que impacta também no peso do conjunto que, como descrito anteriormente, é um fator primário a ser considerado no projeto. Ou a prótese pode ser utilizada por mais tempo, aumentando a autonomia do usuário.

[053] A Figura 9 comprova a semelhança de funcionamento de um joelho normal e do atuador da presente invenção, fazendo com que as linhas do gráfico ficassem praticamente iguais quando graficadas juntas, comprovando que o atuador projetado apresenta um comportamento e funcionalidade bastante semelhantes a de um joelho humano saudável.

[054] Além das vantagens apresentadas, o atuador magneto-reológico descrito no exemplo é capaz de suprir torque ativo suficiente para atividades que próteses passivas e semiativas não são capazes, como subir escadas e rampas e levantar de uma cadeira. O atuador descrito no exemplo também é capaz de suprir torque resistivo suficiente para atividades como descer escadas e rampas e sentar em uma cadeira, bastando, para isso, que o acoplamento magneto-reológico atue como freio, quando o rotor do motor é impedido de girar. Nessa condição o torque total resistido pelo sistema é a soma dos torques do freio e do acoplamento magneto-reológico, bem superior ao torque resistivo que seria conseguido usando apenas o motor com redutor.

REIVINDICAÇÕES

- 1. Atuador magneto-reológico caracterizado por** compreender um conjunto motor para gerar o torque ativo formado por motor (1), redutor (2), saída do redutor (5) e um primeiro acoplamento magneto-reológico (4) conectado diretamente ao redutor (2) acionado pela bobina (12) e o núcleo de ferro (13), e um segundo acoplamento de freio magneto-reológico (3) para gerar o torque passivo, disposto em paralelo, acionado pela bobina (10) e o núcleo de ferro (11), onde os elementos, de forma coordenada, juntos, reproduzem o movimento de uma articulação.
- 2. Atuador magneto-reológico, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por** compreender duas estruturas principais, externa (7) e interna (6), que apresentam movimento relativo entre si por um conjunto de rolamentos, sendo que a parte externa (7) se conecta ao segmento inferior (8) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô, enquanto a interna (6) se conecta ao segmento superior (9) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô.
- 3. Atuador magneto-reológico, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por** compreender duas estruturas principais, externa (7) e interna (6), que apresentam movimento relativo entre si por um conjunto de rolamentos, sendo que a parte externa (7) ser conectada ao segmento superior (9) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô, e a parte interna (6) ser conectada ao segmento inferior (8) da prótese/exoesqueleto/órtese/robô.
- 4. Atuador magneto-reológico, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, caracterizado pelo** conjunto motor poder funcionar sem o acoplamento magneto-reológico (4), com a saída do redutor (5) conectada diretamente à estrutura externa (7).
- 5. Atuador magneto-reológico, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo** conjunto motor poder ser acionado apenas no momento em que o torque ativo for necessário, e,

quando exigido torque passivo, apenas o freio magneto-reológico (3) poderá ser utilizado.

6. Atuador magneto-reológico, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, caracterizado por poder utilizar o conjunto motor como freio junto com o freio magneto-reológico (3) para aumentar o torque passivo resistido pelo atuador.

7. Atuador magneto-reológico, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado pelo atuador poder operar na função semiativa, utilizando somente o freio magneto-reológico (3).

8. USO do atuador magneto-reológico definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 7, caracterizado por ser em articulações de próteses, exoesqueletos e órteses de membros inferiores e superiores, robôs e quaisquer outras aplicações que necessitam de articulações ativas e semiativas.

DESENHOS

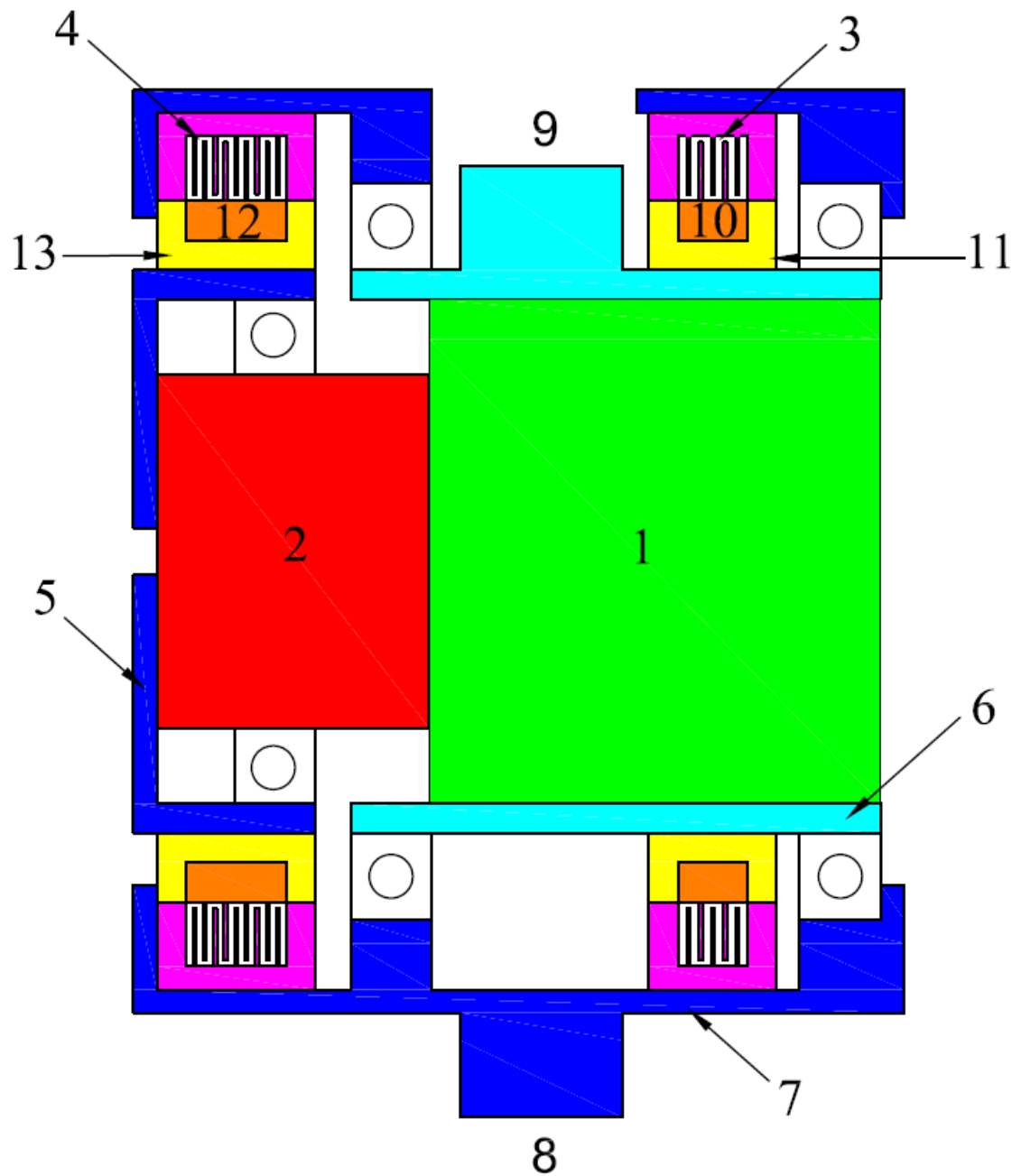


Figura 1

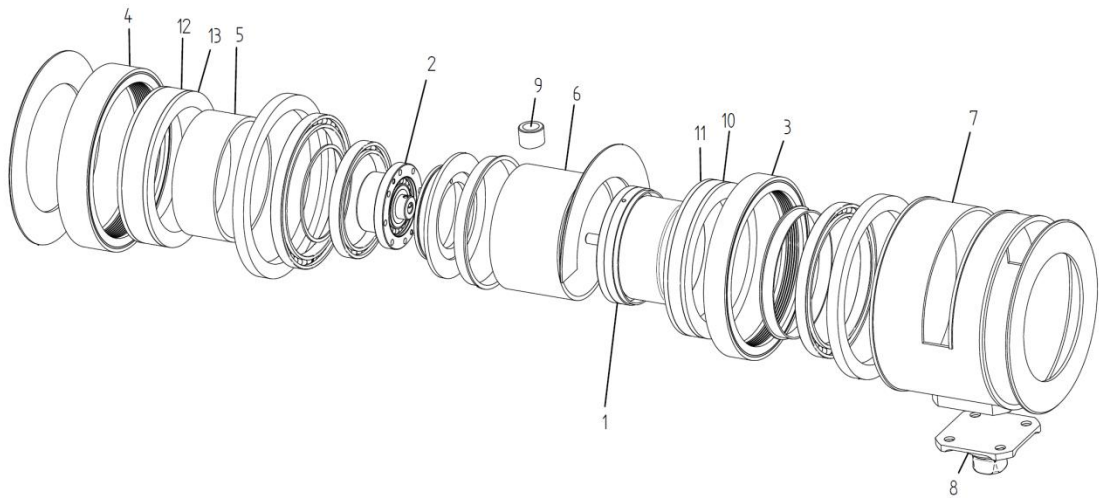
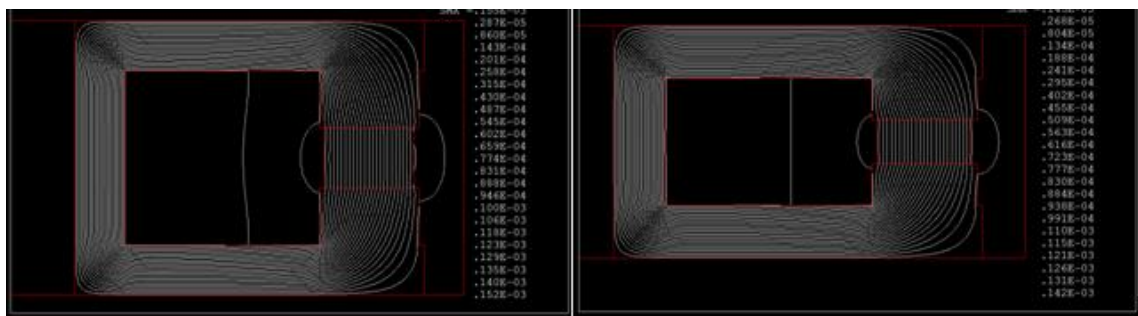


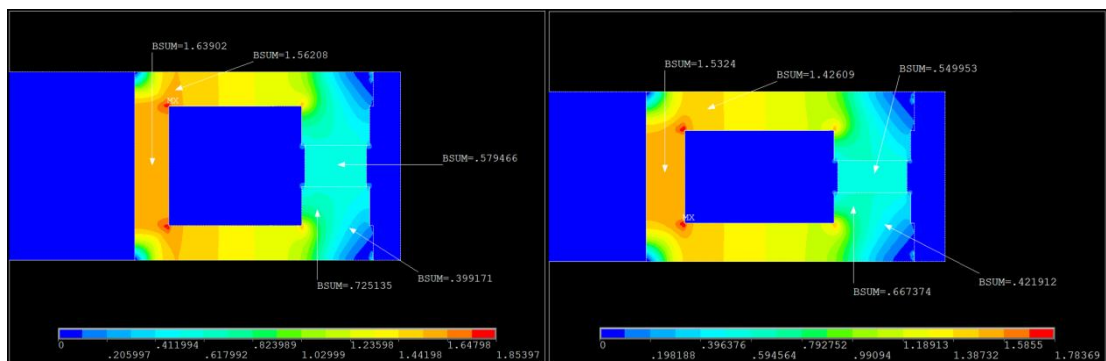
Figura 2



(a)

(b)

Figura 3



(a)

(b)

Figura 4

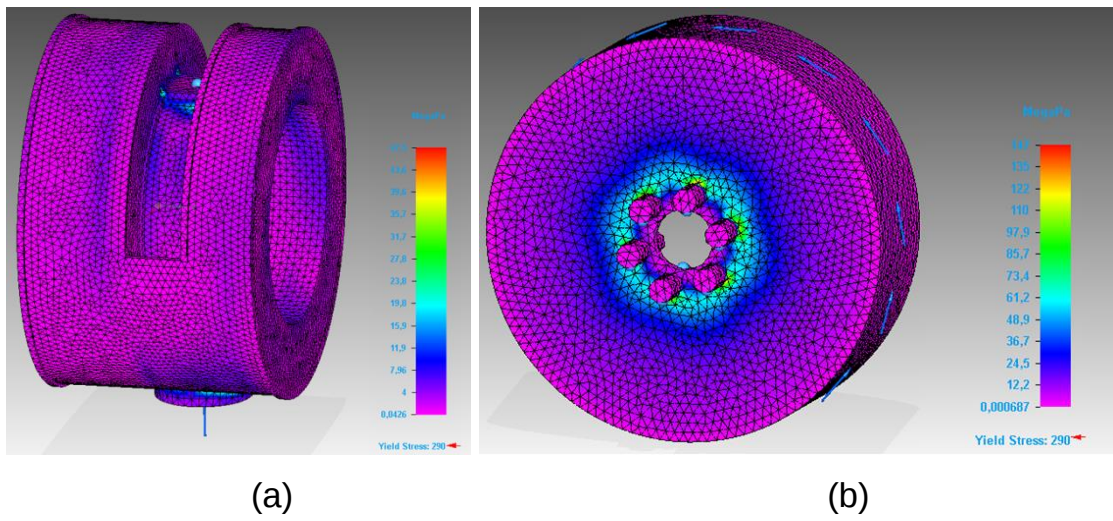


Figura 5

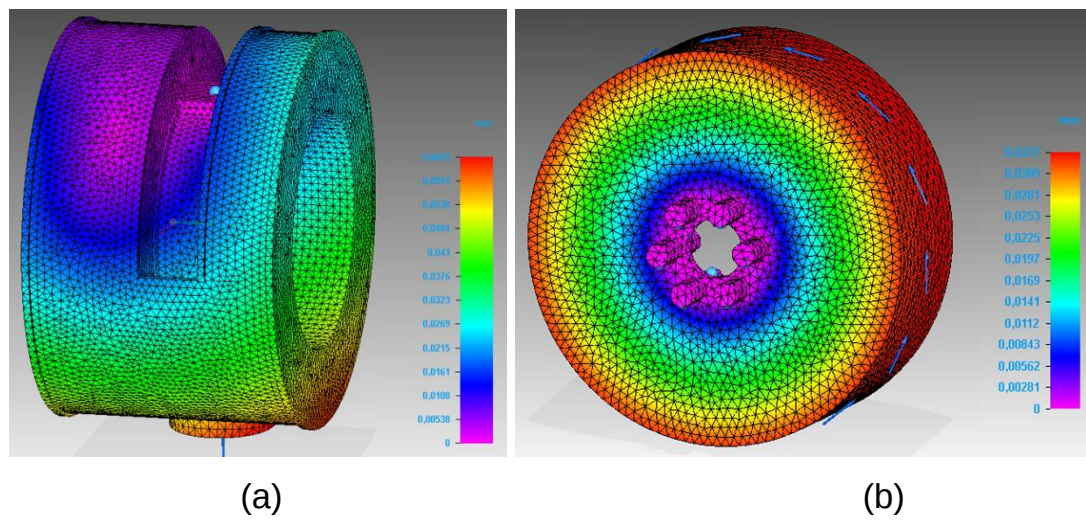


Figura 6

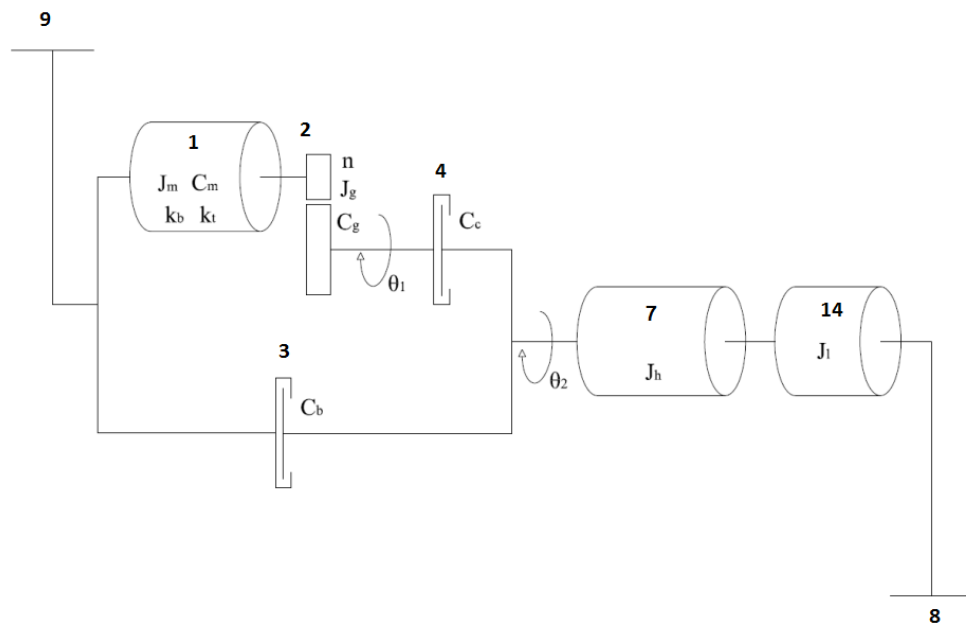


Figura 7

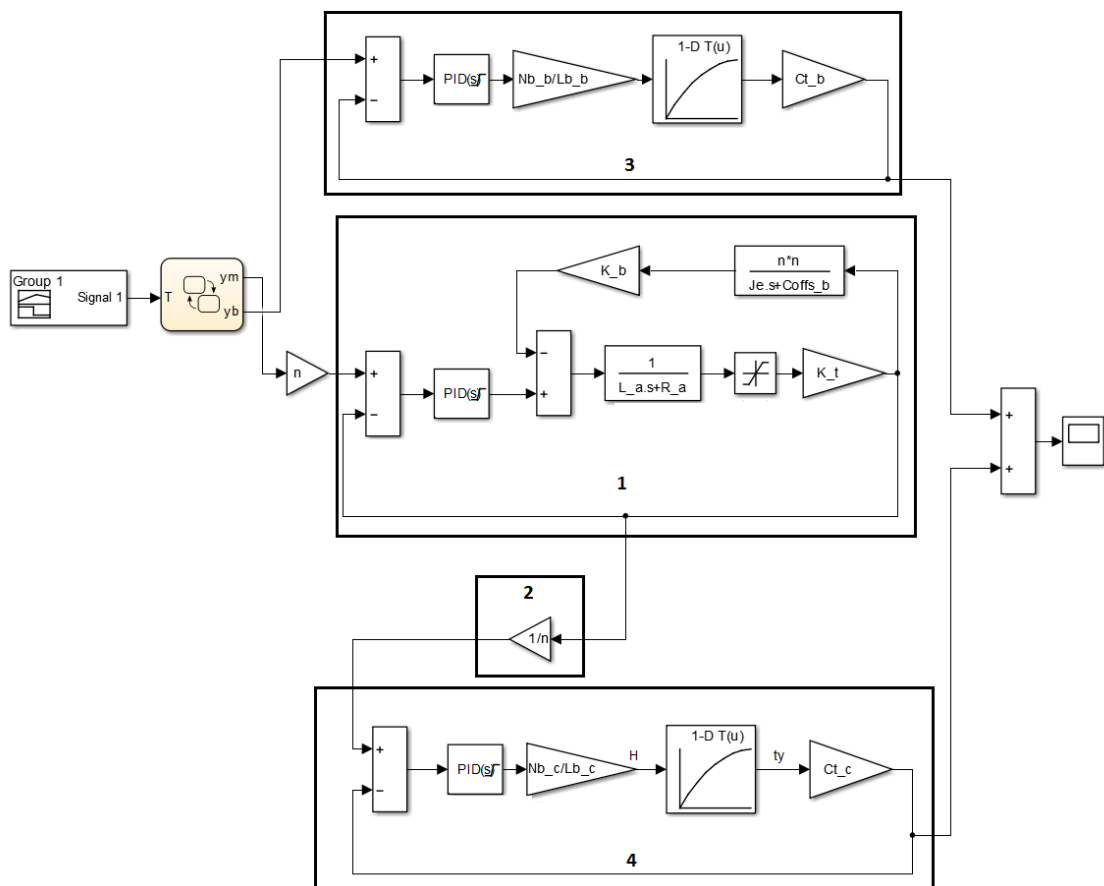


Figura 8

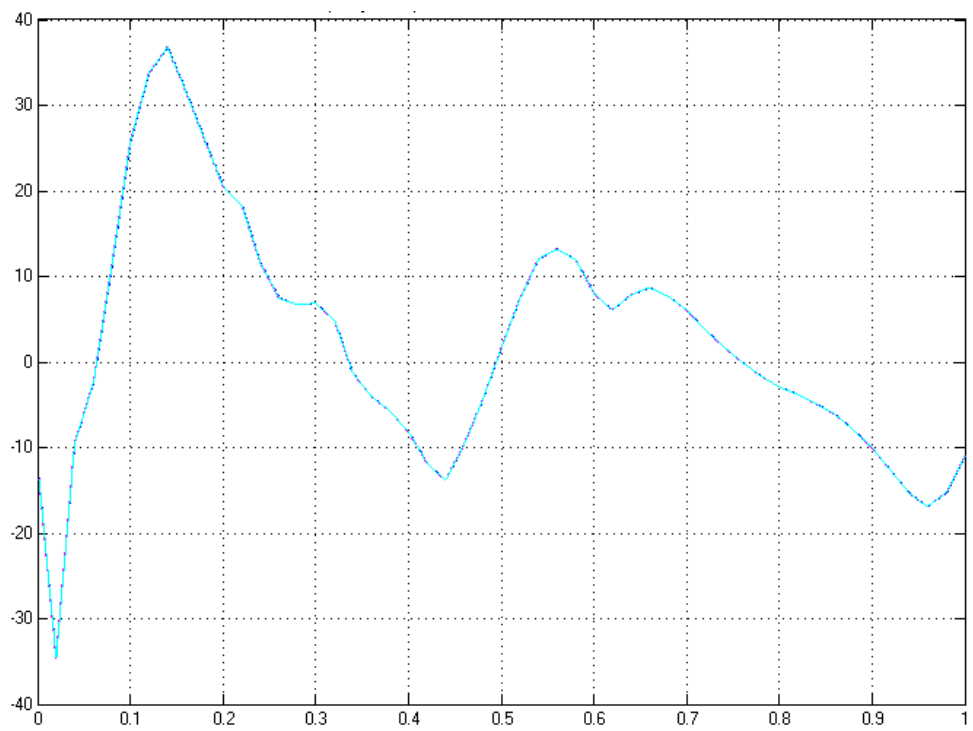


Figura 9

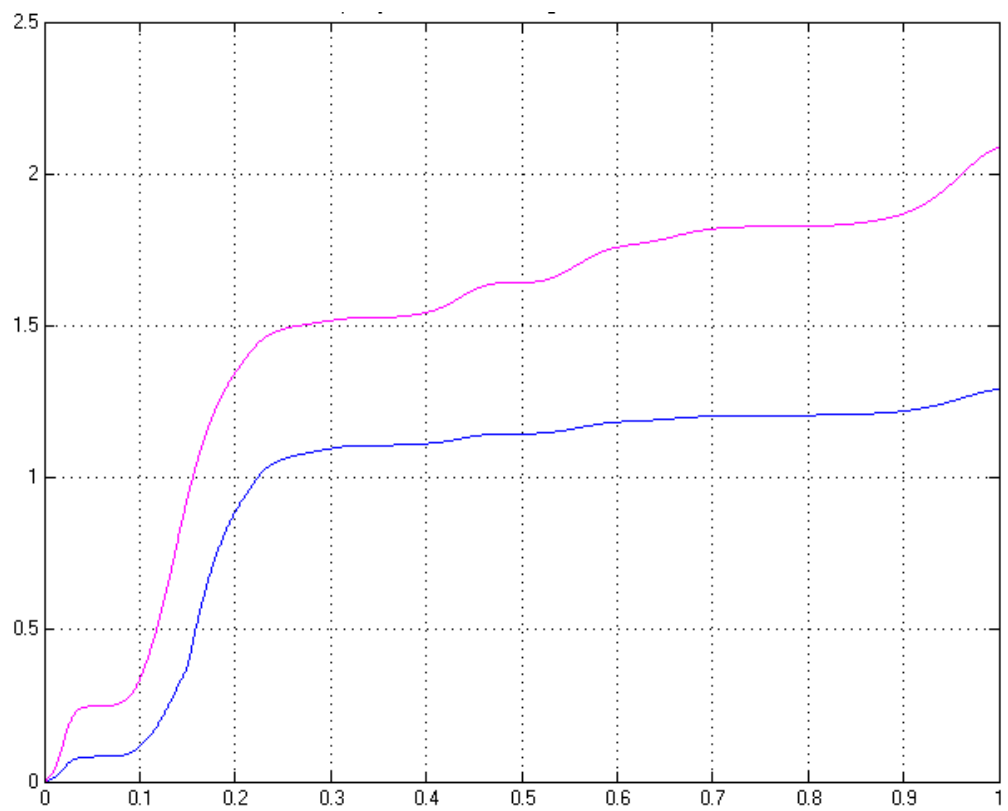


Figura 10