

Estabilização de Sistemas de Armas Embarcados: uma revisão bibliográfica

Diogo L Fernandes*, Maurício Gruzman, Alberto M Simões

Instituto Militar de Engenharia
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

* simoes@ime.eb.br

RESUMO: A precisão de sistemas de armas embarcados é de extrema importância no efetivo emprego desses sistemas, estando diretamente relacionado à taxa de baixas inimigas que o sistema é capaz de proporcionar. Assim, ao longo do tempo, foram aplicadas diversas técnicas de controle clássico e moderno visando estabilizar esses sistemas. Dentre as diversas técnicas, pode-se ressaltar os controladores clássicos PID, os reguladores lineares quadráticos, os controladores baseados em sistemas de inferência nebulosos e os controladores baseados na síntese. O objetivo desse trabalho é fazer uma revisão bibliográfica sobre artigos publicados sobre o tema estabilização de torres, analisando as técnicas de controle empregadas e a modelagem dinâmica utilizada.

ABSTRACT: The accuracy of embedded weapons systems is of extreme importance in the effective use of these systems, being directly related to the rate of enemy losses that the system is able to provide. Thus, over time various classical and modern control techniques were applied to stabilize these systems. Among the various techniques, the classical PID controllers, linear quadratic regulators, controllers based on fuzzy inference systems and controllers based on the synthesis are highlighted. The objective of this work is to make a bibliographical review of published articles on the subject of gun-turrets stabilization, analyzing the control techniques and the dynamic modeling used.

PALAVRAS-CHAVE: Controle. Estabilização. Torres. Carros de Combate.

KEYWORDS: Control, Stabilization, Gun-Turret, Combat Vehicles.

1. INTRODUÇÃO

A utilização dos carros de combate nos campos de batalha causou uma revolução na doutrina e estratégia dos exércitos que dominavam essa tecnologia devido à flexibilidade de emprego que esses veículos proporcionaram. A versatilidade nas configurações dos carros de combate, seja com lagartas ou com rodas, a variedade de sistemas de armas que podem ser embarcados no mesmo ampliam o seu poder de fogo dos mesmos, fazendo com que o carro de combate possa ser utilizado no combate a tropas, veículos e instalações inimigas, executando disparos diretos ou possua um sistema de armas compatível com grandes elevações propiciando defesa anti-aérea para o próprio carro de combate e para as instalações ao seu redor.

Um carro de combate deve apresentar elevado poder de fogo com grande manobrabilidade, possuindo também blindagem para proteção da sua tripulação e seu sistema de armas. O poder de fogo é definido por Papliński [1] como a capacidade de causar danos ou incapacitar vários tipos de alvos inimigos no menor tempo possível e com o menor consumo de munição possível. Para atender a esse requisito, o veículo deve conseguir observar e reconhecer alvos a distância, transportar grande quantidade de munição, disparar com precisão mesmo com o veículo em movimento e possuir elevada probabilidade de impactar corretamente os alvos.

Tanto a precisão dos disparos como a probabilidade de acertar os alvos estão relacionados à qualidade do sistema de controle de armas, além de outros fatores como a qualidade da munição e do armamento adotado. Assim, o sistema de controle de armas instalado no carro de combate é fundamental no eficiente emprego estratégico do mesmo, sendo um dos fatores a ser levado em conta na seleção de um portfólio de sistemas de armas a serem empregadas em um determinado teatro de operações, conforme Kangaspunta [2].

O sistema de controle de armas deve ser projetado de forma

a ser capaz de manter a precisão do sistema, levando em consideração que os carros de combate trafegam por terrenos com presença de vários obstáculos como degraus verticais e rampas com inclinações variadas, em diversos tipos de terreno. Esses fatores induzem no veículo e no sistema de armas embarcado perturbações que afetam diretamente a precisão do sistema de armas, devendo ser amenizadas pelo sistema de controle, fazendo com que o armamento permaneça estável, apresentando variações mínimas em relação ao comando dado pelo atirador.

Assim, para a síntese de um controle mais efetivo, é necessário o conhecimento mais preciso possível da dinâmica desses veículos, seja sobre rodas ou lagartas, ao transitar por esses terrenos e transpor esses obstáculos. A análise da dinâmica de um veículo e do sistema de armamento exige uma abordagem multidisciplinar envolvendo vários fenômenos não lineares. Os atritos nos acoplamentos e um equacionamento dinâmico para esses sistemas levando em considerações grandes oscilações são exemplos de não linearidades presentes.

Modelos não lineares para as forças de atrito são descritas em Haessig [3], sendo utilizadas no modelo para mecanismo de elevação de um sistema de armas, descrito por Purdy [4]. Já modelos dinâmicos não lineares para veículos são descritos por Patole [5] e Wang [6], onde são considerados comportamentos não lineares para os modelos da suspensão do veículo e grandes inclinações para o veículo.

Além do projeto do sistema de controle do sistema de armas, há vários fatores que afetam a precisão de um sistema de armas que são abordados na literatura. Por exemplo, Gupta [7] fez um levantamento dos 30 primeiros modos de vibração naturais de um carro de combate baseado em uma análise por elementos finitos. Essa metodologia também foi empregada no estudo dos esforços em uma torre, levando em consideração os esforços induzidos pelo veículo e pelos disparos na mesma, descrito por Zhang [8]. Ambos os artigos citados tomaram por base modelos em CAD dos sistemas analisados.

Balamurugam [9] fez uma análise utilizando dinâmica

multi-corpos baseada em modelos CAD. Seu objetivo foi analisar os esforços na suspensão e na lagarta de um veículo ao transpor uma rampa de 35° e um degrau de 80 cm. Papliński [1] analisou a influência da variação dos momentos de inércia e da massa do carro de combate na precisão dos diversos componentes do sistema de armas embarcado. Nesse trabalho, concluiu-se através de uma análise experimental, que variações de 8% nas inércias do sistema aumentam em 16% no erro máximo do sistema.

Um fator também importante é o desenvolvimento de sensores mais precisos e com resposta mais rápida para alimentar o sistema de controle de armas embarcado. Nesse sentido, Korobiichuk [10] descreveu uma configuração de sensores piezelétricos além de um esquema de processamento dos sinais desses sensores para a obtenção de uma resposta mais rápida e precisa para sistemas de armas automáticas.

Aprofundando a análise da relação entre o armamento e o veículo, observa-se que, após o primeiro disparo, os esforços gerados pelo mecanismo de funcionamento do armamento influenciam a dinâmica do veículo. Além disso, a deformação do cano devido ao disparo também influencia na precisão do sistema. Assim, visando simplificar a análise, a maioria dos trabalhos publicados analisa a precisão para o primeiro tiro, podendo, assim, desconsiderar esses fatores, sendo essa a gama de artigos analisados neste trabalho.

Neste trabalho será feita a análise de publicações que abordam especificamente projeto de controladores para emprego em sistema de controle de armas, abordando as estratégias de controle e os modelos dinâmicos utilizados. Os trabalhos encontrados nesta revisão bibliográfica podem ser divididos em três categorias, que será a divisão seguida na estrutura deste artigo:

- Projeto baseado em dados de vibração experimentais do veículo, alimentando um modelo dinâmico de torre, ou seja, com movimento da base da torre prescrito;
- Projeto baseado na dinâmica do veículo acoplada à dinâmica da torre, tendo como entrada as perturbações do terreno e obstáculos; e
- Projetos implementados diretamente em bancos de teste que simulam torres e seu acoplamento com o veículo.

A grande diferença entre esses três tipos de abordagem está na forma de inserção das perturbações ao sistema de armas. Nos artigos onde é desenvolvido um modelo dinâmico do veículo acoplado ao modelo do sistema de armas, as perturbações são impostas ao sistema através das variações existentes no perfil da pista. As perturbações de base da dinâmica do veículo são transmitidas ao sistema de armas através do acoplamento dinâmico existente no equacionamento.

Já para os trabalhos baseados em um banco de testes, existe um mecanismo composto por atuadores hidráulicos e elétricos que simulam as perturbações do veículo. De forma similar, para os trabalhos que consideram a dinâmica da torre

isolada, as perturbações ao sistema de armas são introduzidas no equacionamento como uma entrada ao mesmo. Os perfis de vibração utilizados nesses casos são em geral obtidos através da instrumentação de um carro de combate ou com a utilização de perfis aleatórios de vibração.

2. PROJETOS CONSIDERANDO O ACOPLAMENTO ENTRE AS DINÂMICAS DA TORRE E DO VEÍCULO

Os projetos de controladores para estabilização de sistemas de armas utilizando dinâmicas acopladas seguem, de forma geral, o esquema descrito na Fig 1. Nesse caso, o modelo dinâmico de direção do sistema de armas e o modelo do veículo são acoplados de forma a restringir o movimento dos corpos. Essas relações garantem a coerência cinemática e dinâmica dos dois modelos.

Um exemplo de arquitetura da malha de controle de um sistema de armas, de uma forma genérica, está representado na Fig. 2, sendo composto por duas malhas de controle sobrepostas. A malha externa tem como objetivo o ajuste da posição do canhão pelo atirador, trabalhando com uma realimentação da posição angular do canhão. A estabilização propriamente dita é feita pela malha interna, que realimenta a velocidade angular do sistema, sendo o objetivo do controlador manter essa variável nula, quando o canhão estiver na posição desejada. A arquitetura apresentada supõe controladores com uma variável de entrada e uma variável de saída (SISO – Single Input Single Output).

Para o caso de controladores baseados em formulação no espaço de estados ou controladores com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO – Multiple Input Multiple Output), essa estrutura pode ser simplificada para a arquitetura exposta na Fig. 4. No caso dos sistemas MIMO, cada canal transporta mais de uma variável, sendo cada item da estrutura uma matriz de funções de transferência.

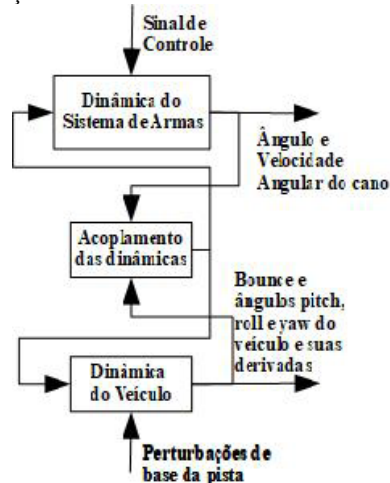


Fig. 1: Esquema de Acoplamento Dinâmico.

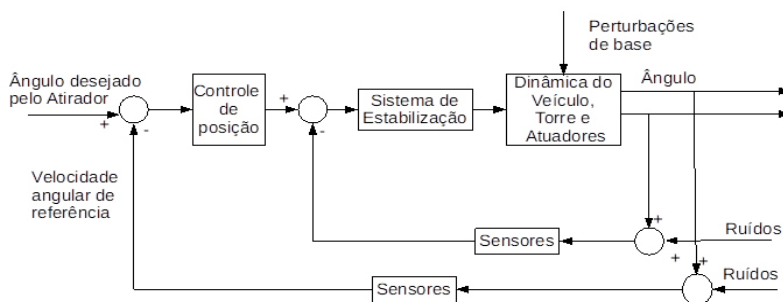


Fig. 2: Arquitetura de Controle para Controladores SISO.

Na Fig. 3 está exposto um diagrama esquemático de um sistema com as dinâmicas torre-veículo acopladas. Nessa figura estão expostas as perturbações de base atuando nas rodas e o acoplamento do sistema de elevação através do munhão e do sistema de azimute através da base giratória da torre. Também, pode-se perceber o posicionamento dos motores através do qual é feita a atuação nos sistemas de direção.

Tendo como base um modelo similar ao descrito na Fig.3, Purdy [4], em 1994, apresentou um modelo para um sistema de elevação de um canhão embarcado. A atuação no canhão era feita por um motor elétrico de corrente contínua controlado pela sua corrente de entrada e utilizava um sistema pinhão-cremalheira para acoplar o eixo do motor à culatra do canhão.

Além disso, para modelar o cano como flexível, Purdy dividiu o mesmo em duas seções unidas por uma mola e um amortecedor de torção. Os parâmetros da constante da mola e de dissipação do amortecedor foram ajustados para fazer coincidir as primeiras frequências naturais desse modelo com a de uma análise do modelo do cano como uma barra engastada por modelado por elementos finitos. Devido à distribuição de massa ao longo do cano, Purdy [4] utilizou como seções a culatra e o cano em si. Portanto, caracterizou uma abordagem por parâmetros concentrados para uma viga engastada.

Esse modelo de elevação é um sistema com 5 graus de liberdade, sendo eles a rotação do motor, o deslocamento vertical da culatra e sua rotação e o deslocamento vertical do cano e sua rotação. Porém, como o movimento vertical entre as duas seções do cano deve ser nulo, é inserida no modelo uma força que garante esses 2 graus de liberdade do sistema sejam anulados, gerando um modelo com 3 graus de liberdade.

A equação de acoplamento era dada pela relação geométrica entre o posicionamento dos centros de gravidade do veículo e das seções do cano e a posição do munhão. Também são utilizadas as derivadas dessa equação. Com essa relação fica possível calcular as forças de ação-reação que surgem no munhão e a força que mantém a coesão do cano.

O equacionamento utilizado era linear, porém o mesmo sugere que caso o armamento seja desbalanceado, ou seja, o ponto de apoio no munhão seja diferente do centro de gravidade do conjunto cano-culatra, surgirá um momento não linear atuante no munhão. Outras não linearidades que podem ser inseridas no modelo são a utilização de formulações não lineares para os atritos entre o cano e o munhão e no motor. Essas modelos para o atrito foram descritos em Haesig [3].

Foi feita uma análise comparativa entre os modelos lineares e não lineares em Purdy [11], sendo concluído que os principais fatores que influenciam no acoplamento são a variação da inclinação do carro e o atrito viscoso no munhão. Além disso, Purdy [11] concluiu que a utilização de modelos de atrito mais sofisticadas para o atrito no motor elétrico não geram variações significativas na resposta do modelo.

Para o veículo foi utilizado um modelo linear de $\frac{1}{2}$ carro, sendo modelado com 6 conjuntos mola-amortecedor, tendo associado a cada conjunto uma entrada externa ao modelo relativa às perturbações do terreno. Os únicos graus de liberdade considerados no modelo foram o deslocamento vertical do veículo e a sua rotação no entorno do seu centro de gravidade.

A malha de controle implementada nesse trabalho foi a descrita Fig. 2. Na malha de controle da posição angular, foi

implementado um controlador proporcional integral (PI) e na malha de estabilização um controlador proporcional (P) associado a um filtro passa baixa.

Foram feitas simulações com os modelos balanceados e desbalanceados, utilizando como perturbações de base aleatórias com o veículo trafegando a 5 m/s. Os resultados das simulações mostraram que modelar o atrito no motor de forma não linear não gerou grandes variações nos resultados, podendo-se utilizar modelos lineares para o atrito sem prejudicar de forma significativa os resultados.

Porém, a utilização do modelo não linear de atrito no munhão fez com que o deslocamento angular entre a culatra e o cano aumentasse em 100%, aumentando também a intensidade do sinal de controle. Mesmo assim, o desvio angular máximo entre as seções do cano permaneceu similar em ambas as simulações, mostrando que a deformação do cano não era afetada pela formulação matemática utilizada para os atritos.

Também, concluiu-se que as variações angulares obtidas pelo modelo não linear são em média 500% maiores que as geradas pelo modelo linear. Observa-se também que dentre os fatores que influenciam no acoplamento, a variação angular do veículo influencia mais que o deslocamento vertical do veículo. Além disso, ressaltou-se a versatilidade e facilidade de se utilizar esse modelo de sistema de elevação com outros modelos de dinâmica para o veículo.

Um modelo para o sistema de elevação similar ao de Purdy [4] foi desenvolvido por Couvin [12], porém neste trabalho não é aplicada nenhuma técnica de controle, sendo somente desenvolvido um modelo dinâmico mais refinado e próximo de um sistema real para armas de médio calibre. Em Dholiwar [13] foi desenvolvido um modelo similar, porém utilizando um modelo de elementos finitos para modelar o cano, também não sendo abordadas estratégias de controle.

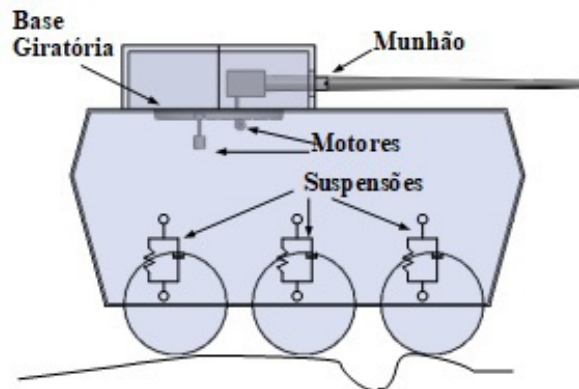


Fig. 3: Diagrama esquemático de sistema com as dinâmicas torre-veículo acopladas.

Jakati [14], em 2017, utilizou o modelo desenvolvido por Purdy[4], também com um modelo linear de $\frac{1}{2}$ carro, porém com somente 2 conjuntos de mola-amortecedor, gerando um sistema com 7 graus de liberdade. Jakati [14] utilizou três técnicas de controle para a estabilização do ângulo de elevação: um controlador PID clássico, um controlador LQR (Linear Quadratic Regulator) e um controlador não linear baseado na técnica de backstepping. Nesse trabalho foi dado um maior foco nas técnicas de controle, sendo obtidos resultados melhores que os de Purdy[4], ao se aplicarem as técnicas de controle de LQR e Backstepping.

Os sinais de controle utilizados atuavam como forças externas nas suspensões e na culatra do canhão. Os controladores se baseavam nas deformações das suspensões e na

diferença entre a velocidade angular da culatra do canhão e uma velocidade de referência prescrita, sendo no caso nula, sendo a lei de controle para o PID descrita na Eq. (1). Nessa equação $e(t)$ representa o sinal de erro que alimenta o controlador, sendo, no caso, as variáveis acima descritas.

$$K(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de}{dt}(t) + K_I \int e(t) dt \quad (1)$$

Na síntese de um controlador LQR se deseja minimizar uma função de custo quadrática J definida pela Eq. (2), supondo uma realimentação de estados com todos os estados disponíveis. Então, definidas as matrizes Q e R , a solução desse problema é dada pela Eq. (3), onde a matriz P é a solução da Eq. (4), que é uma Equação Algébrica de Ricatti, onde as matrizes A e B são a representação do modelo no espaço de estados.

$$J = \int (x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u) dt \quad (2)$$

$$K = R^{-1} B^T P(t) \quad (3)$$

$$A^T P(t) + P(t) A - P(t) B R^{-1} B^T P(t) + Q = 0 \quad (4)$$

As matrizes Q e R foram obtidas através da utilização do método de otimização por recozimento simulado, que é um método de otimização estocástica desenvolvido por Kirkpatrick [15], tendo sido considerada nula a matriz N . Foram sintetizados dois controladores, um para as suspensões e outro para o sistema de elevação.

A técnica de Backstepping, conforme definida por Kokotovich [16], foi desenvolvida para estabilização de sistemas não lineares. Para a síntese da lei de controle, foi definida uma nova variável de estado que representava o deslocamento da culatra, sendo essa variável o objetivo da regulação. Também foi definida uma segunda variável como a diferença entre a derivada de z_1 e z_2 . O objetivo era obter uma lei de controle u tal que a derivada de z_2 fosse nula. Então, substituindo o equacionamento no espaço de estados na equação de z_2 e igualando a zero, a lei de controle é explicitada em função das variáveis de estado. Para o emprego dessa técnica também foi considerada uma realimentação de estados com todos os estados disponíveis.

Para validar a escolha dessas variáveis e verificar se foi obtido um erro com equilíbrio globalmente exponencialmente estável, aplicou-se o critério de Lyapunov à função V descrita na Eq. (5). Onde se conclui que o erro era globalmente exponencialmente estável através da análise da derivada de V com o Teorema de Lyapunov. O controle por Backstepping foi desenvolvido somente para o sistema de elevação, sendo utilizado em conjunto com os controladores LQR desenvolvidos para a suspensão.

$$V = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (5)$$

As simulações realizadas por Jakati [14] simularam um veículo transitando pela pista de teste de estabilização do Campo de Provas de Abeerden, onde existem uma série de obstáculos, sendo essa pista uma referência internacional para esse tipo de teste. A distribuição e o formato dos obstá-

culos dessa pista estão expostos na TOP-1-1-011 [17]. Esses obstáculos foram introduzidos como as entradas externas ao modelo, representando as perturbações no modelo, representando um veículo transitando por essa pista a 30km/h. Além disso, antes que o veículo iniciasse a transpor os obstáculos, foi aplicado, durante 2s, um torque de 1000Nm, fazendo com que o cano atingisse uma elevação de 0.075rad.

Na análise dos resultados, concluiu-se que as 3 técnicas de controle são eficientes na estabilização do sistema, porém o controlador por LQR e por Backstepping, reduziram a amplitude máxima do erro do ângulo de elevação da boca. Para o sistema passivo esse erro foi de 0,125rad e de 0,05rad para o sistema com os controladores PID. Já para as simulações com controle LQR e por Backstepping o erro caiu para 0,01rad. Ao se comparar os esforços de controle entre esses dois métodos, o Backstepping apresenta um menor esforço de controle, mostrando-se assim como uma forma de controle mais viável.

Em 2018, Xia[18] desenvolveu um controlador ativo para rejeição de perturbações com modelo dinâmico para o veículo igual ao utilizado por Purdy [4], sendo o modelo do sistema de elevação descrito na Fig. 5. Nesse modelo o armamento está conectado ao carro por um munhão e pela sua culatra através de um amortecedor hidráulico.

O objetivo da estratégia de controle empregada foi de minimizar o efeito das perturbações da pista no veículo atuando nas 6 suspensões de modo que o cano do armamento permaneça apontado para a posição desejada. Para isso foi implementado um esquema de desacoplamento dinâmico que transforma o sistema original MIMO em 6 sistemas desacoplados SISO. Com o sistema desacoplado foram geradas leis de controle para cada um desses sistemas baseados em observadores de estado estendidos lineares e não lineares, supondo que todas as variáveis do problema estivessem disponíveis para medição.

As simulações foram feitas com o veículo transitando por uma pista a 36km/h com perfil aleatório gerado com base na integração de um ruído branco. O resultado foi comparado com o de um controlador nebuloso do tipo Tagashi-Sugeno aplicado ao mesmo modelo. A análise dos resultados mostrou que a técnica de rejeição ativa de perturbações apresentou melhores resultados que o controlador fuzzy, gerando menores desvios angulares e exigindo menor esforço de controle.

Esse mesmo autor também publicou outros dois trabalhos, aplicando essa mesma técnica a sistemas de torres. Em Xia [19] foi desenvolvido um melhor embasamento matemático para o modelo de observadores de estado estendidos aplicado a sistema não lineares. Já em Xia [20] foi desenvolvido um modelo para uma torre baseado na teoria de manipuladores robóticos, sendo explicada e aplicada a técnica de controle por modos rápidos terminais não singulares deslizantes (*Fast nonsingular terminal sliding mode control – FNTSMC*) acoplado à utilização de observadores de estado estendidos. Neste último trabalho foram feitas simulações com incertezas paramétricas e perturbações de base no modelo da torre, sendo o resultado satisfatório, apresentando overshoot mínimo no acompanhamento de referências de entrada.

Seguindo a abordagem de modelagem utilizando a teoria de manipuladores robóticos, Gomes [21], em 2006, aplicou essa técnica para modelar o sistema de direção tanto em elevação como em azimute da Viatura Blindada de Combate (VBC) Leopard M1A1. A lei de controle não linear gerada baseou-se em um processo de linearização por realimentação

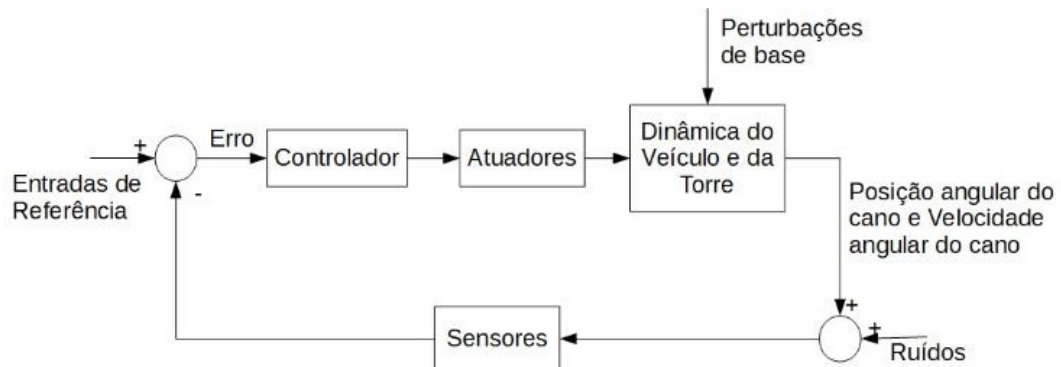


Fig. 2: Arquitetura de Controle para Controladores SISO.

e controle ótimo.

Foi considerado um modelo com 7 graus de liberdade para o sistema, permitindo os movimentos *bounce*, *roll*, *pitch* e *yaw* para o veículo e para a torre são considerados o ângulo de elevação, azimute e o seu deslocamento vertical. A atuação no sistema era feita através da aplicação de torques tanto no sistema de elevação como no de azimute.

O objetivo do controlador era a rejeição de perturbações geradas pelo movimento do veículo por terrenos com oscilações e obstáculos na pontaria do sistema de armas. Os parâmetros de inércia utilizados no modelo foram levantados através da construção de um modelo em CAD do veículo e os parâmetros da suspensão foram levantados através de experimentos realizados com o próprio carro de combate.

A arquitetura de controle é similar à exposta na Fig. 4, porém, ao invés de se ter como referência uma posição angular específica eram utilizadas trajetórias de referência, o que é mais comum quando se utiliza a modelagem por manipuladores robóticos. Essas trajetórias eram construídas a partir da solução da cinemática inversa, levando em consideração o movimento de veículo e a posição do alvo.

Os resultados expostos por Gomes [21] simulavam um veículo percorrendo uma pista com curvas, seguindo um perfil senoidal sem obstáculos verticais e com velocidade constante de 20km/h. O objetivo do controlador era obter um erro máximo em elevação de 3mrad, para um alvo a 1500m de distância e a 1,1375m de altura em relação ao solo. Para isso o autor utilizou dois controladores: um proporcional e derivativo (PD) e um ótimo.

Na análise das respostas geradas pelas simulações, concluiu-se que o controlador não linear apresentou um acompanhamento melhor da trajetória desejada do que o PD, demonstrando que a utilização de técnicas de controle não lineares é viável e apresentou bons resultados para esse tipo de modelagem para carros de combate.

Gümüşay [22], em 2006, desenvolveu um controlador PID com os parâmetros ajustados continuamente por uma rede neural acoplada ao sistema que se adapta aos efeitos das não linearidades presentes no modelo, às perturbações de base e incertezas no modelo. O autor abordou tanto o problema de estabilização em elevação como em azimute.

Em contraste aos trabalhos anteriormente descritos neste trabalho, o modelo utilizado para o veículo foi desenvolvido com auxílio de toolboxes de simulação de sistemas mecânicos do MATLAB, não sendo gerado modelo matemático

explícito para a dinâmica do mesmo. O carro de combate em questão era a VBC Leopard M1A1. Já os modelos utilizados para o sistema de elevação e azimute se assemelham ao descrito na Fig. 6, sendo os sinais de entrada nos motores os sinais de controle responsáveis pela atuação no sistema.

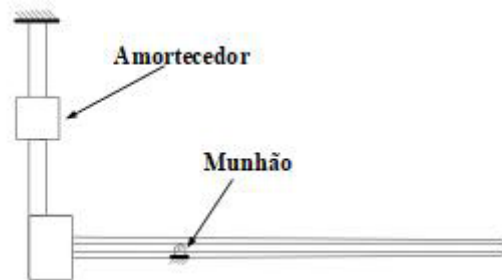


Fig. 5: Diagrama esquemático de sistema de armas utilizado por Xia[18].

Além do controlador PID proposto, Gümüşay [22] também propôs um compensador neural para o atrito, onde se desejava estimar os atritos que influenciavam a dinâmica do sistema de armas, de modo a compensar esse fator na atuação do sistema. Assim, a atuação efetiva do sistema era gerada pela soma das atuações do controlador com o compensador de atrito se tornando mais eficiente e atenuando o sinal de controle.

As perturbações de base simulavam os obstáculos da pista de teste de estabilização do Campo de Provas de Aberden, de acordo com o descrito na TOP-1-1-011 [17]. Além das simulações computacionais, também foram feitas ensaios com um modelo em escala.

Os resultados obtidos por essa combinação de controladores tanto para o sistema de elevação como para o de azimute apresentou desvios inferiores à 1mrad, podendo ser considerada uma técnica muito eficiente na estabilização desse tipo de sistema.

3. PROJETOS COM MOVIMENTO DE BASE DA TORRE PRESCRITO

Os trabalhos que utilizaram essa abordagem para o problema de estabilização do sistema de armas embarcados adotaram um modelo similar ao descrito na Fig. 6.

Nesse esquema as entradas da dinâmica da torre são os dados de vibração previamente conhecidos ou estipulados, atuantes na base giratória ou no canhão.

Sneck [22], desenvolveu um, utilizando o mesmo modelo

adotado por Purdy [4], porém, ao invés de utilizar um modelo de cano dividido em 2 segmentos, o autor optou por utilizar 3 segmentos, conforme descrito na Fig. 7. Segundo Sneck [22], o modelo com 2 segmentos não consegue representar a flexibilidade do cano, por acompanhar fielmente somente o primeiro modo de vibração do cano. Assim, utilizando a técnica de parâmetros concentrados, foram ajustadas as constantes das molas e amortecedores que unem as seções do cano de modo a coincidir os 2 primeiros modos de vibração.

O controle desenvolvido foi um feedback-feedforward baseado na rejeição de perturbações. Todo o processo de síntese de controlador foi baseado na representação no domínio da frequência do modelo. Os dados para o modelo foram baseados no canhão XM291.

Os resultados obtidos por Sneck [22] mostram que os resultados obtidos por Purdy [4] são imprecisos quanto à relação entre a perturbação e o deslocamento da boca do armamento, sendo levantada a questão de qual seria o valor ideal de seções para a obtenção de um resultado mais realista.

Karayumak [23], em 2011, desenvolveu uma malha de controle para estabilização do canhão da VBC Leopard M1A1, baseando-se em um modelo de elevação e azimute conforme descrito na Fig. 6. Esse modelo era similar ao desenvolvido por Purdy[4], porém, além de incluir o modelo para direção em azimute, utilizou um modelo de cano flexível com 5 segmentos. Esse aumento no número de seções condiz com o que foi concluído por Sneck[22], no intuito de obter um resultado mais realista no modelo do cano e a influência das perturbações de base.

Conforme o modelo de Purdy [4], a atuação no sistema era feita através da corrente de alimentação dos motores elétricos que atuam nos sistemas de elevação e azimute, respectivamente. A realimentação feita utiliza a velocidade angular de cada sistema e a posição angular do cano, estando de acordo com a arquitetura proposta por Purdy [4] e descrita na Fig. 2. O autor desenvolveu um modelo dinâmico linear para o sistema de armas.

As simulações feitas para teste do sistema de elevação tiveram como base dados de vibração dos giroscópios de uma VBC Leopard M1A1, trafegando pela pista de teste de estabilização do Campo de Provas de Aberdeen, estando a distribuição e formato dos obstáculos ao longo da pista descritos na TOP-1-1-011 [17]. Já as simulações para avaliação do desempenho do sistema de controle em azimute utilizaram uma pista plana em formato de 8.

O controlador implementado para o sistema de elevação e de azimute foram controladores feedback-feedforward com controladores Proporcional Integral duplo, tendo os seus parâmetros otimizados com a utilização de uma toolbox do SIMULINK. Os resultados obtidos levaram a um erro de no máximo 0,492mrad em elevação e 0,072mrad em azimute, sendo assim, um resultado melhor que o encontrado por Purdy[4], Jakati [14] e Sneck [22].

Marcopeli [24], em 2001, projetou um sistema de controle robusto por síntese para a estabilização do canhão M256E1. Para obter esse controlador, foi utilizado um modelo dinâmico do sistema de elevação dessa torre conforme a Fig. 6. Porém, ao invés de utilizar um motor elétrico, foi utilizado um atuador hidráulico para mover o cano. Como variável de controle foi utilizada a abertura da válvula reguladora de fluxo do atuador. Nesse modelo o cano foi modelado como uma estrutura flexível.

A síntese é uma técnica de controle linear robusto através da qual são geradas leis de controle que conseguem rejeitar

variações paramétricas do modelo, assim como não-linearidades e dinâmicas negligenciadas. Para a aplicação dessa técnica, é necessário escrever o modelo na forma descrita na Fig. 8, onde as incertezas e não linearidades são desacopladas do modelo e reinseridas como uma realimentação. Nesse trabalho foram consideradas incertezas atuando na perturbação ao modelo e uma incerteza aditiva de saída atuando no sinal de realimentação. O atrito no munhão também poderia ter sido modelado como incerteza, porém Marcopeli [24] afirmou que a variação causada por essa alteração nos resultados não é significativa.

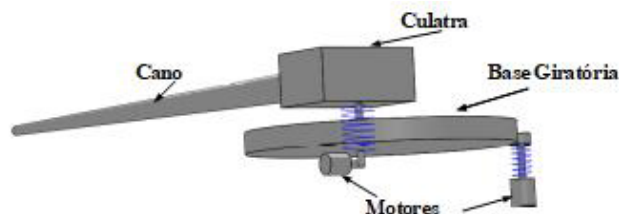


Fig. 6: Diagrama esquemático de sistema de armas

O sinal de realimentação utilizado era composto pelo ângulo do munhão, pela velocidade angular do cano medida por um giroscópio instalado na culatra e pela pressão no atuador. Esses 3 sinais foram utilizados para alimentar o controlador, juntamente com a aceleração vertical do munhão e a velocidade angular do cano, que eram os sinais usados no feedforward. Para aumentar o realismo das simulações, foram adicionados ruídos aos sinais de realimentação.

O canal de desempenho ($\omega \rightarrow z$), que relaciona as entradas externas ao sistema com as variáveis que se deseja controlar, tinha como entradas as perturbações externas ao sistema de armas aplicadas no munhão. Esses dados, que foram obtidos de forma experimental, caracterizam as perturbações de base que simulam o movimento do veículo. A saída do canal de desempenho era a posição angular da boca do canhão, calculada a partir do modelo de cano flexível utilizado.

O problema de análise de estabilidade robusta consiste em, dado um controlador que estabilize a planta, ter uma matriz de transferência no canal de incerteza com módulo menor γ , dado que o módulo das incertezas (Δ) seja menor ou igual a γ . Essa análise é resultado da aplicação do Teorema dos Pequenos Ganhos, descrito na Eq. 7, sendo a norma de uma matriz calculada de acordo com a Eq. 6.

$$\|H(j\omega)\|_{\infty} = \max_{w \neq 0} \frac{\|H(j\omega)w\|}{\|w\|} = \bar{\sigma}(H(j\omega)) \quad (6)$$

$$\text{Estabilidade robusta} \leftrightarrow \|H(j\omega)\|_{\infty} \|\Delta\|_{\infty} < 1 \quad (7)$$

Onde a norma para vetores é a norma euclidiana e representa o maior valor singular da matriz.

Definido o problema de estabilidade robusta, pode-se definir o problema de desempenho robusto, de forma conservadora, como um problema de estabilidade robusta ao se acoplar a saída e entrada do canal de desempenho uma incerteza fictícia. Assim, usando a Eq. 7 com o Teorema dos Pequenos Ganhos e com definido de acordo com Eq. 8, pode-se solucionar o problema de desempenho robusto.

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_{sistema} & 0 \\ 0 & \Delta_{ficticio} \end{bmatrix}, \text{ com} \quad (8)$$

$$\|\Delta_{ficticio}\|_{\infty} < 1$$

O objetivo almejado nesse trabalho foi obter tanto a estabilidade como o desempenho robusto. Foi utilizada uma formulação com um problema de sensibilidade mista. Nessa abordagem são adicionadas ponderações de forma a limitar os ganhos das diversas matrizes de transferência para cada frequência e se tenta atender a todas as restrições impostas. Esse procedimento se assemelha ao utilizado na síntese por Loop Shaping, descrita em Skogestad [25].

Marcopeli [24] explicou o procedimento adotado para a seleção das ponderações, sendo utilizados filtros passa-baixa, passa-alta ou constantes, sendo os valores e funções gerados eficientes para as características dinâmicas do sistema modelado. Além disso, o mesmo apresentou um procedimento iterativo para se obter as ponderações de robustez.

Com o modelo dinâmico implementado no espaço de estados no MATLAB, foi sintetizado um controlador com o auxílio da Mu Analysis and Synthesis Toolbox. Uma restrição desse algoritmo é que a dimensão do controlador gerado é igual à ordem do sistema, ou seja, o número de estados do controlador é igual ou maior que o número de estados da planta de síntese. Portanto, normalmente são utilizadas técnicas de redução de ordem para se obter controladores com ordem reduzida em relação à planta de síntese.

A planta de síntese gerada possuía 47 estados, gerando, assim, um controlador com 47 estados com a síntese sendo reduzidos para 22 estados. Esse controlador reduzido foi implementado em um VBC Leopard M1A2 e foi testado uma pista de obstáculos no campo de provas de Aberdeen com o carro a 64 km/h. Da mesma forma, foi implementado um controlador clássico e repetiu-se o teste.

Os resultados obtidos foram de uma redução de 8,1% no erro da posição da boca da arma, com um aumento de 94% no erro da elevação medido no munhão. Isso pode ser explicado pelo fato de o controle robusto implementado possuir como variável de desempenho a posição da boca e não no munhão. Assim, concluiu-se que o uso de controladores ótimos baseados em modelo na estabilização de sistemas de armas é viável, assim como observou Gomes[21].

Em 2009, Galal [26] desenvolveu um controlador nebuloso baseado em um sistema de inferência Mandani, para o controle de uma torre genérica, modelada como uma mesa giratória com o cano do armamento acoplado a essa mesa por meio de uma junta de rotação que permite o movimento de elevação do cano.

A atuação no sistema era feita através de dois motores de corrente alternada, sendo um atuando na mesa giratória, controlando o azimute, e outro no cano, controlando a elevação.

Todo o equacionamento dinâmico foi obtido através da formulação de Lagrange, sendo descritos os funcionais de energia cinética e potencial do sistema.

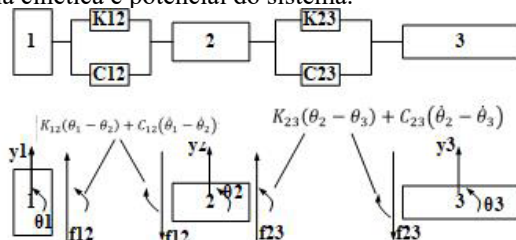


Fig. 7: Esquema e diagrama de corpo livre para cano flexível

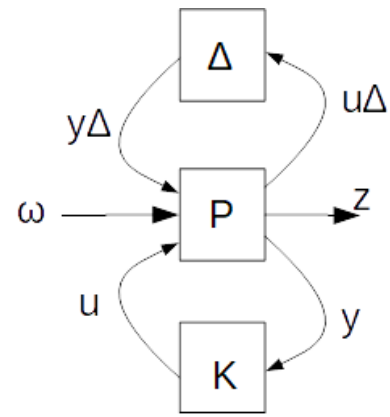


Fig. 8: Forma padrão de controle para síntese de controladores robustos

O esquema de controle utilizado tinha como variáveis de saída do modelo os ângulos de elevação e azimute, sendo estes realimentados para comparação com um valor de referência e o erro utilizado como entrada para os controladores. Para uma situação mais realista, o autor expõe um diagrama de controle para implementação digital do controlador. O conjunto de regras desenvolvido é composto por 49 regras, sendo usadas funções de pertinência triangulares e trapezoidais.

Os resultados das simulações realizadas no acompanhamento de entradas de referência mostraram que o controlador nebuloso é efetivo, apresentando um pequeno overshoot e alcançando o regime permanente sem erro de estado estacionário.

4. PROJETOS BASEADOS EM BANCOS DE TESTE

Essa categoria de trabalhos aborda sistemas similares ao descrito na Fig. 9. Em geral, esse sistema é composto por uma torre posicionada em cima de uma mesa móvel, sendo a torre controlada através de motores que estão acoplados aos sistemas de elevação e de azimute. Esses acoplamentos em geral são modelados de forma elástica através de molas. Esses bancos de teste são capazes de reproduzir movimentos e base prescritos e vibrações aleatórias, além de também serem capazes de simular os efeitos do recuo devido a disparos.

Nesse contexto, Rao[27], em 1990, sintetizou controladores aplicado a um banco de teste, porém baseado em modelos de ordem reduzida da dinâmica do mesmo. O modelo matemático do banco utilizado possuía uma função de transferência de ordem 12, porém, como se desejava usar técnicas de controle baseadas em reguladores como o regulador quadrático linear (LQR), surgiu o inconveniente de que a ordem do controlador obtido era igual à ordem do modelo. Assim, o controlador possuiria ordem 12, o que dificulta nem a sua implementação na realidade.

A solução utilizada foi a redução de ordem do modelo do banco pelos métodos de truncamento balanceado, pela aproximação de Routh e pela aproximação modal de Litz, sendo gerados sistemas de ordem 7. Os autovalores do modelo de ordem reduzida coincidem com os do original.

Com o equacionamento de ordem reduzida, foram sintetizados reguladores quadráticos lineares com resposta em frequência moldada, onde se adicionam pesos aos termos do indicador de desempenho tal que a resposta em frequência do sistema em malha fechada do sistema em questão possuía

o formato desejado. Essa formulação permite trabalhar com especificações como com largura de banda e taxas de decaimento. Esses pesos contribuem para as características de robustez ao sistema, dado que moldam as curvas da resposta em frequência, sendo similar a técnica de Loop-Shaping, muito utilizada em sistemas MIMO.

Rao [27] fez simulações utilizando o controlador sintetizado com o modelo de ordem cheia e com sintetizado com o modelo de ordem reduzida, sendo os resultados próximos, comprovando que a utilização do controlador de ordem reduzida é viável na prática. Além disso, foram feitas simulações dos dois controladores onde o modelo do banco de testes apresentava incertezas, sendo avaliada a robustez dos controladores. Os resultados obtidos com os dois controladores foram, novamente, próximos, ratificando a viabilidade da aplicação dos modelos de ordem reduzida na prática.

Em 1992, Coleman [28], Li [29], Chai [30] e Mattice [31] desenvolveram trabalhos em cima do mesmo banco de testes, onde sintetizaram controladores para estabilização de um banco de provas para sistemas de armas. As técnicas de controle empregadas por Coleman [28] e Mattice foram o regulador quadrático linear gaussiano (LQG – Linear Quadratic Gaussian) com Loop Transfer Recovery (LTR), o regulador generalizado singular linear gaussiano (GSLQ – Generalized Singular Linear Quadratic) e a síntese. Já Li [29] utilizou controladores nebulosos, enquanto Chai [30] adotou um controlador robusto discreto.

Os objetivos de desempenho desejados para os sistemas de controle, atuando no motor que comanda a torre, projetados, foram uma resposta rápida e precisa no acompanhamento de entradas de referência, robustez. As incertezas e dinâmicas não modeladas consideradas foram os modos não considerados de flexibilidade do cano, variações paramétricas e não linearidades como atritos e saturação de atuadores.

Coleman [28] fez uma breve descrição sobre a teoria que embasa as técnicas de controle utilizadas, porém, Mattice [31] deu ênfase à formulação no domínio da frequência dos problemas de síntese dos controladores robusto. Foi descrita a arquitetura padrão para síntese de controladores robustos na presença de incertezas e na solução do problema de síntese dos controladores, onde em geral se deve resolver uma equação ou inequação algébrica de Ricatti.

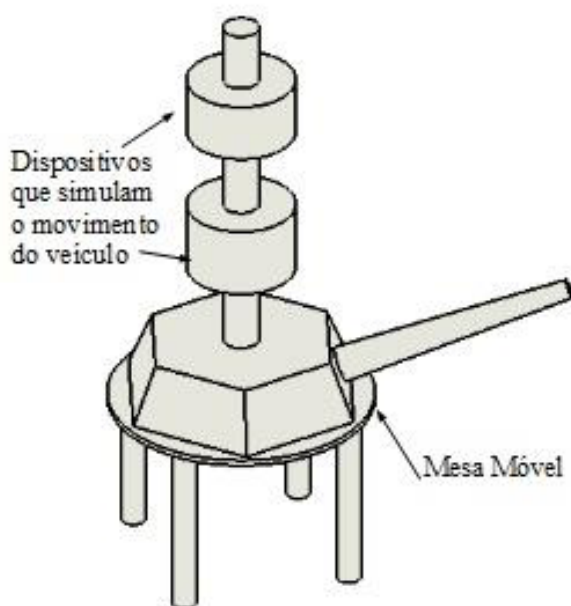


Fig. 9: Esquema de um Banco de Testes.

Então, com o problema na forma padrão descrita na Fig. 8, pode-se obter a função de transferência do canal de desempenho. Essa matriz de transferência é, em geral, denominada T_{zw} . Dependendo do objetivo de controle desejado, seja ele rejeição de perturbações ou acompanhamento de referências, pode-se formular um problema de minimização da norma de T_{zw} , sendo o tipo de norma adotado o que define o problema a ser abordado.

A síntese de um regulador linear gaussiano ótimo recai em um problema de síntese ótima baseado na norma H^2 , definido pela Eq. 9, onde se deseja obter a matriz de transferência K , que minimize a norma H^2 de T_{zw} e que estabilize o sistema em malha fechada.

$$K = \min_{K \text{ estabilizante}} \|T_{zw}\|_2 \quad (9)$$

O controlador obtido como solução desse problema é uma combinação do regulador por realimentação de estados ótimo e de um filtro ótimo. Para se obter esse controlador, deve-se resolver uma equação algébrica de Ricatti, cujo processo para solução encontra-se descrito no artigo. Para a aplicação do regulador linear singular generalizado, são feitas restrições na matriz de transferência da planta generalizada P , da forma padrão, para posteriormente se resolver o mesmo problema de otimização descrito pela Eq. 9.

Já para a síntese H^∞ , o problema a ser resolvido era o mesmo, porém a norma é a H_∞ , levando a Eq. 10.

$$K = \min_{K \text{ estabilizante}} \|T_{zw}\|_\infty \quad (10)$$

Esse problema leva à solução de duas equações algébricas de Ricatti, que devem ser resolvidas simultaneamente, estando o processo de solução dessas equações descritos no artigo. Também é possível formular a solução desse problema através do uso das inequações algébricas de Ricatti, sendo o problema resolvido com auxílio da teoria das inequações lineares matriciais, conforme descrito em Gahinet[32].

Coleman [28] e Mattice [31] concluíram que os métodos de controle analisados conseguiram atender as especificações para a planta nominal, ou seja, desconsiderando o bloco de incertezas, porém os métodos LQG/LTR e GSLQ se tornaram sensíveis a variações paramétricas e as não linearidades não modeladas, havendo degradação do desempenho. Do contrário, a síntese se apresentou excelente desempenho e robustez, mesmo com comandos de entrada com grande amplitude.

Coleman [28] também desenvolveu um controlador não linear desenvolvido com base na teoria não linear de servomecanismos, sendo composto fundamentalmente por uma estabilização por realimentação e um feedforward para compensação em regime permanente. A lei de controle utilizada é baseada no modelo dinâmico do sistema e na modelagem bem comportada das não linearidades. Essa modelagem também apresentou bons resultados no que diz respeito à compensação dos efeitos das não linearidades.

Como aprimoramento das técnicas de controle aplicadas, Coleman [28] citou as técnicas de controle inteligente adaptativo, ou seja, redes neurais e o controle baseado em lógica nebulosa. Nesse contexto, Li [28] desenvolveu detalhadamente os diversos processos e componentes de um controlador nebuloso.

Neste trabalho é usado um sistema de inferência do tipo

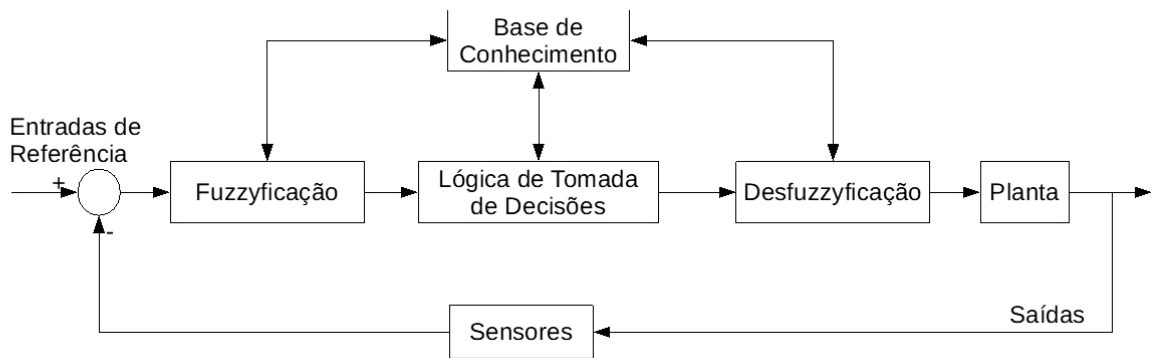


Fig. 10: Arquitetura de um sistema de inferência nebuloso.

Mandani onde as entradas e saídas do sistema são nebulosas. Estando a estrutura de um controlador nebuloso descrito na Fig. 10. O autor ressaltou que uma das maiores vantagens em se utilizar um controlador nebuloso é que não se precisa conhecer o modelo dinâmico explicitamente, podendo o mesmo estar sujeito a incertezas e comportamentos não lineares. Assim, um controlador nebuloso consegue propiciar um comportamento estável para o sistema, muito embora não necessariamente otimizado em desempenho.

O sistema em questão possuía um modelo com 18 variáveis de estado, sendo gerado um conjunto 121 regras para compor a base de conhecimento do controlador. O autor implementou um controlador nebuloso, atuando em um loop externo a malha de controle desenvolvida por Coleman [28], tanto para o controlador e para o GSLQ. Com a adição do controlador nebuloso foi obtida uma melhora na reposta transiente do sistema, sem perdas no desempenho e em robustez no regime permanente.

Chai [30], utilizando uma abordagem diferente, descreveu um método para síntese de controladores robustos baseados em um modelo discreto do sistema, gerando assim um controlador robusto digital. As suas simulações se basearam em dados experimentais do banco de testes e de um modelo não linear discreto e incerto do sistema, linearizado na origem. Os resultados foram considerados satisfatórios na eliminação dos comportamentos não lineares e na rejeição de perturbações.

Em 2014, Munadi[33], abordou o problema do desenvolvimento de um sistema de controle para o canhão ARSU 57mm do Exército e Marinha da Indonésia, que é um canhão com sistema de direção manual acionado por manivela. Para isso, foi construído um protótipo, em escala, em uma bancada de testes, onde foram instalados dois motores DC para executarem o controle do azimute e da elevação do protótipo. Todo o sistema implementado é descrito, relacionando os encoders usados, o micro controlador e as conexões entre os diversos itens utilizados na construção desse sistema automático.

Foram implementados dois controladores um clássico, usando um controle PID e um controlador nebuloso, ambos usando as toolbox já existentes no MATLAB em conjunto com o SIMULINK. No controle PID foram implementados dois controladores independentes, um para cada eixo de movimento, e para o ajuste dos parâmetros de cada um deles foi usado o Método de Ziegler-Nichols, nas simulações iniciais, e, posteriormente, foi usada a opção de ajuste paramétrico existente no bloco de PID do SIMULINK quando os controladores foram instalados no protótipo.

O controle fuzzy implementado, da mesma forma que o PID, também foi projetado para controlar cada eixo separadamente, usando o SIMULINK e a toolbox de controle nebuloso do MA-

TLAB. Cada controlador era baseado em sistema de inferência fuzzy com entradas e saídas nebulosas, onde a entrada era o erro na direção e a saída era o controle do motor DC respectivo. Para a entrada e para a saída, foram definidas 7 variáveis nebulosas cujas funções de pertinência eram triangulares ou trapezoidais. O conjunto de regras dos controladores eram iguais para os dois eixos e composto por 7 regras.

Os resultados obtidos, comparando os dois controladores implementados, mostram que o controle nebuloso implementado apresentou melhor acompanhamento de referências que o PID, além de reduzir os efeitos das não linearidades dos motores DC utilizados no experimento. Como outra vantagem do controle nebuloso, Munadi [33] citou a maior simplicidade na construção do controlador nebuloso, dado que não é necessário fazer um processo de ajuste paramétrico como é necessário no PID, apresentando o controle fuzzy como uma solução com bons resultados e relativa simplicidade.

Kuscu [34], também em 2014, descreveu e selecionou em seu trabalho os equipamentos e sensores necessários para a implementação real de um sistema de controle de armas em um carro de combate com a utilização de micro controladores baseados em Arduino. O controlador utilizado possuía um giroscópio e um acelerômetro embutidos, utilizando também potenciômetros para a leitura do movimento dos motores que atuavam no sistema, fazendo, assim, a realimentação da malha.

Já Kuswadi [35] trabalhou com uma plataforma de armas utilizada pelas forças armadas da Indonésia para embarcar em veículos, barco e aeronaves. Essa plataforma com dois eixos estabilizada é subdividida em duas partes: a torre e o armamento, sendo que existe um motor para o controle de cada uma delas.

O objetivo do sistema era controlar a plataforma de modo que ela acompanhasse o deslocamento de uma câmera que estaria apontando para o alvo, ou seja, o movimento da câmera servia como referência a ser acompanhada pela plataforma. O controlador escolhido foi um PID, alimentado pelo erro entre a posição da plataforma e a câmera, sendo o problema separado em dois: um controlador para a elevação e outro para o azimute. Da mesma forma que Kuscu [33], a realimentação do sistema era feita com os dados de variação de posição da plataforma, através da leitura dos potenciômetros acoplados aos eixos dos motores que serviam de atuadores.

Nas simulações realizadas, demonstrou-se que o acoplamento entre a câmera e a plataforma foi efetuado com sucesso e que, em termos de acurácia, o sistema apresentou um overshoot de 25%, atingindo o regime permanente em tempos na ordem de milissegundos. Porém há uma diferença no desempenho entre os controladores implementados para a elevação e o azimute, onde, para

ângulos maiores, o sistema leva consideravelmente mais tempo para atingir a referência em azimute do que em elevação.

5. CONCLUSÃO

Após a análise dos trabalhos resumidos neste artigo, percebe-se que, com a devida seleção dos parâmetros para os controladores, o problema de estabilização da torre de um carro de combate pode ser solucionado utilizando as técnicas de controle clássico, como o PID, e as técnicas de controle modernas como controle nebuloso e controladores robustos.

Porém, muito embora os controladores clássicos apresentem resultados satisfatórios, quando se avalia o desempenho dos controladores com sistemas levando em considerações as não linearidades e a incertezas paramétricas existentes no modelo, esses controladores apresentam degradação no desempenho, validando a aplicação e o desenvolvimento das técnicas de controle robusto e controle baseado em reguladores. Portanto, mesmo que esses controladores sejam de ordem elevada, em geral, e de mais complexa implementação, seu desempenho superior supera o seu custo de implementação.

Comparando as três categorias de trabalho que foram abordadas neste trabalho, percebe-se que a utilização de modelos de torre isolada requer acesso a dados de vibração do veículo em cada situação que se deseja realizar simulações. Isso exige que, além de um veículo instrumentado e com a torre em análise montada no mesmo, tenha-se as pistas de estabilização. O mesmo pode ser dito para os trabalhos que se baseiam em bancos de testes, ficando as simulações de perturbações de base restritas à capacidade do banco, além de se ter de construí-lo. Assim, a abordagem que se mostra mais versátil, embora levando a modelos matemáticos mais complexos, é a de se modelar o veículo acoplado com o modelo de torre, podendo, assim, realizar as simulações que se deseja, incluindo ou negligenciando os diversos componentes não lineares, além de poder modelar as incertezas existentes no mesmo.

Referências Bibliográficas

- [1] Papiński, K. M.; Stachowicz, E.; Influence of inertia moment of infantry fighting vehicle turret on accuracy of aiming at a target and tracking of a target; *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2011, 18, 411.
- [2] Kangasputna, J.; Liesio, J.; Salo, A.; Cost-efficiency analysis of weapon system portfolios; *European Journal of Operational Research*. 2012, 223, 264.
- [3] Haessig, D.A.J.; Friedland, B.; On the Modeling and Simulation of Friction; 1990 American Control Conference, San Diego, California, Estados Unidos da América, 1990.
- [4] Purdy, D.J.; Modeling and Simulation of a Weapon Control System for a Main Battle Tank; *Proceedings of the 8th U.S. Army Symposium on Gun Dynamics*, Newport, Rhode Island, Estados Unidos da América, 1996.
- [5] Patole, S.S.; Sawant, S.H.; Theoretical and Numerical Analysis of Half Car Vehicle Dynamic Model Subjected to Different Road Profiles with Base Delay and Nonlinear Parameters; *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*. 2015, 3, 542.
- [6] Wang, J.; Wang, H.; Zheng, L.; Chaos Control of Vehicle Nonlinear Suspension System with Multi-frequency Excitations by Nonlinear Feedback; *Applied Mechanics and Materials*. 2011, 55, 1156.
- [7] Gupta, A. D.; Evaluation of a fully assembled armored vehicle hull-turret model using computational and experimental modal analyses; *Computers and Structures*. 1999, 72, 177.
- [8] Zhang, J.; Liu, X.; Zhao, F.; Yue, Y.; Modeling and Simulation of Certain Type Turret Based on Finite Element Method; *Advances in Computer Science Research*. 2016, 58, 19.
- [9] Balamurugam, S.; Srinivasam, R.; Tracked Vehicle Performance Evaluation using Multi Body Dynamics; *Defense Science Journal*. 2017, 67, 476.
- [10] Korobiichuk, I.; Mathematical model of a precision sensor for an automatic weapons stabilizer system; *Measurement*. 2016, 89, 151.
- [11] Purdy, D.J.; Comparison of balance and out of balance main battle tank armaments; *Shock and Vibrations*. 2001, 8, 167.
- [12] Couvin, B.; Carlier, S.; Dias-Alves, J.; Global Modeling for a medium caliber turret system; *Proceedings of the 8th U.S. Army Symposium on Gun Dynamics*, Newport, Rhode Island, Estados Unidos da América, 1996.
- [13] Dholiwar, D.K.; Development of a Hybrid Distributed-Lumped Parameter Open Loop Model of Elevation Axis for a Gun System; *Proceedings of the 7th Symposium on Gun Dynamics*, Newport, Rhode Island, Estados Unidos da América, 1993.
- [14] Jakathi, A.; Banerjee, S.; Jebaraj, C.; Development of Mathematical Models, Simulating Vibration Control of Tracked Vehicle Weapon Dynamics; *Defense Science Journal*. 2017, 67, 465.
- [15] Kirkpatrick, S.; Gelatt Jr, C. D.; Vecchi, M. P.; Optimization by Simulated Annealing; *Science*. 1983, 220, 671.
- [16] Kokotovic, P.V.; The joy of feedback: nonlinear and adaptive; *Control Systems Magazine, IEEE*. 1992, 12, 7.
- [17] TOP -01-1-011A. Test Operational Procedure 01-1-011A Vehicle Test Facilities at Aberdeen Test Center and Yuma Test Center
- [18] Xia, Y.; Fu, M.; Li, C.; Pu, F.; Xu, Y.; Active Disturbance Rejection Control for Active Suspension System of Tracked Vehicles with Gun; *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018, 65, 4054.
- [19] Xia, Y.; Li, D.; Fu, M.; Li, C.; Wang, C.; Application of Active Disturbance Rejection Control in Tank Gun Control System; *Journal of the Franklin Institute*. 2014, 351, 2299.
- [20] Xia, Y.; Pu F.; Fu, M.; Ye, L.; Modeling and Compound Control for Unmanned Turret System with Coupling; *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016, 63, 5794.
- [21] Gomes, M.G.; Ferreira, A.M.; Gun-Turret Modeling and Control; *ABCAM Symposium Series in Mechatronics*. 2006, 2, 60.
- [22] Gümüşay, O.; Intelligent Stabilization Control of Turret Subsystems under Disturbances from Unstructured Terrain; *Dissertação de Mestrado*, Middle East Technical University, Turquia, 2006.
- [23] Sneek, H.J.; Main Battle Tank Flexible Gun Tube Disturbance Model: Three-Segment Model. *Relatório Técnico ARCCB-TR-02015*. 2002.
- [24] Karayumak, T.; Modeling and Stabilization Control of a Main Battle Tank. *Tese de Doutorado*, Middle East Technical University, Turquia, 2011.
- [25] Skogestad, S.; Postlethwaite, I.; *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*, 1ª ed., Wiley: New York, 1996.
- [26] Galal, M.; Mikhail, N.G.; Elnashar, G.; Fuzzy Logic Controller Design for gun-turret system; 13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, Cairo, Egito, 2009.
- [27] Rao, V.S.; Mattice, M.; Design of Robust Controllers for Turret-Gun System using Reduced Order Models. *Relatório Técnico ARFSD-CR-90005*.
- [28] Coleman, N.; Mattice, M.; Banks, S.; Lin, C.F.; Juang, J.C.; Huang, J.; High Precision Control System Design; *Proceedings of the First IEEE Conference on Control Applications*, Dayton, OH, 1992.
- [29] Li, T.H.S.; Lin, C.F.; Juang, J.C.; Coleman, N.; Mattice, M.; Banks, S.; Fuzzy Logic Control of Gun Turret System; *Proceedings of the First IEEE Conference on Control Applications*, Dayton, OH, 1992.
- [30] Chai, W.; Loh, N.K.; Lin, C.F.; Coleman, N.; Robust Digital Control of Gun Turret Systems; *Proceedings of the First IEEE Conference on Control Applications*, Dayton, OH, 1992.
- [31] Mattice, M.; Coleman, N.; Banks, S.; Juang, J.C.; Lin, C.F.; Robust Weapon Control Systems Design; *Proceedings of the First IEEE Conference on Control Applications*, Dayton, OH, 1992.
- [32] Gahinet, P.; Apkarian, P.; A linear matrix inequality approach to control; *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 1994, 4, 421.
- [33] Munadi, J.D.S.; Muhammad, F.L.; Fuzzy Logic Control Application for the Prototype of Gun-Turret System (ARSU 57mm) using MATLAB; *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*. 2014, 2, 174.
- [34] Kuscu, H.; Songul, S.; Development of Gun Turret Stabilization System With a Microcontroller and Implementation on a Model Tank. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, 2, 5.
- [35] Kuswadi, S.; Tamara, M.N.; Nugroho, D.H.W.; Gun Turret Automatic Weapon Control System Design and Realization. *Proceedings of the International Symposium on Electronics and Smart Devices*, 2016.