

Técnica de Controle *Fuzzy* Tipo-2 Intervalar: Estudo de Caso na Aplicação de Anestesia Geral

Giovanni O. de Sousa*. Cleonor C. das Neves.** Carlos Tavares da Costa Junior***. Marcus Ciro Martins Gomes****

* Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Manaus (e-mail: goliveiradesousa@gmail.com),

** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Manaus (e-mail: cleonor.neves@ifam.edu.br)

*** Carlos Tavares da Costa Junior, Universidade Federal do Pará, Belém (e-mail: cartav.ufpa@gmail.com),

**** Marcus Ciro Martins Gomes, Instituto Federal do Pará, Belém (e-mail: marcuscmg@gmail.com)

Abstract: This work investigates the application of the type-2 fuzzy control's technique in general anesthesia. Firstly, a literature review was made for the work. On this review, type-1 and interval type-2 fuzzy controllers were studied. And for the realization of the case study, an investigation of procedures in anesthesia was also made. After this study, a pharmacokinetic/pharmacodynamic mathematical model of the effect of the drugs Atracurium and Isoflurane in the human body was implemented. Type-1 and interval type-2 fuzzy controllers with two and four inputs were designed using the Fuzzy Logic Toolbox in MATLAB. Simulations of the control of anesthesia, from the mathematical model, were created using MATLAB scripts and validated with Simulink using four controllers for a performance comparison. Simulation results showed type-2 fuzzy controllers' superiority against type-1 with the same number of inputs, however it was possible to see that the bigger number of inputs were beneficial for type-2 control as well as type-1. And finally, a comparative analysis was made, thus the conclusion was that type-2 fuzzy logic is a good alternative to control multivariable and nonlinear systems.

Resumo: Este trabalho investiga a aplicação da técnica do controle *fuzzy* tipo-2 na anestesia geral. E para isso, foi realizada revisão da bibliografia para o trabalho, além do estudo do controlador *fuzzy* tipo-1 e tipo-2. A aplicação da técnica de controle *fuzzy* está baseada no estudo de caso sobre os procedimentos da anestesia geral. Após esse estudo, foi implementado um modelo matemático farmacocinético farmacodinâmico do efeito dos medicamentos atracúrio e isoflurano no corpo humano. Os controladores *fuzzy* tipo-1 e tipo-2 intervalar com duas e quatro entradas foram projetados utilizando o Fuzzy Logic Toolbox no MATLAB. Também foram criadas simulações no MATLAB em formatos de scripts validadas pelo Simulink do controle de anestesia, a partir do modelo matemático, utilizando os controladores para uma comparação de desempenho. Os resultados da simulação mostraram a superioridade dos controladores *fuzzy* tipo-2 intervalar em relação aos do tipo-1 com o mesmo número de entradas, entretanto foi possível verificar que o maior número de entradas beneficiou tanto os controles com tipo-2 e tipo-1. E por fim, foi realizada uma análise comparativa, assim a conclusão foi que o controlador *fuzzy* tipo-2 apresentou uma boa alternativa para controlar sistemas multivariáveis e não lineares relacionado a anestesia geral.

Keywords: Dynamic systems modelling; Fuzzy control; Interval type-2 fuzzy control; Pharmacokinetic/Pharmacodynamic modelling; Control of general anesthesia.

Palavras-chaves: Simulação de sistemas dinâmicos; Controle *fuzzy*; Controle *fuzzy* tipo-2; Modelagem farmacocinética farmacodinâmica; Controle da anestesia geral.

1. INTRODUÇÃO

O médico anestesiológico tem como uma de suas principais funções manter o nível de medicamento induzido no paciente para garantir o controle do procedimento (Doctor *et al.* 2016), porém, doses aumentadas podem levar a efeitos colaterais, como náuseas e vômitos pós-operatórios (Amiri *et al.* 2020). O controle de tal nível ou dose é feito manualmente utilizando sinais vitais, mas pesquisas atuais de controle automático, como em Ilyas *et al.* (2017) e Wei *et al.* (2020), demonstraram robustez e precisão em simulações. O último, em especial, utilizou um controlador *fuzzy* tipo-2 (T2.FLC, do inglês *Type-*

2 Fuzzy Logic Controller), uma versão mais interessante para lidar com as complexidades dessa aplicação.

Sharma *et al.* (2020) afirmam que o controlador *fuzzy* tipo-2 intervalar (IT2.FLC, do inglês *Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller*) é uma simplificação do T2.FLC convencional com incerteza uniforme que foi particularmente útil em inúmeras aplicações, incluindo o controle de anestesia, com efeitos de distúrbios e ruídos, enquanto Taheriyani, Ghafourian e Noori (2018) utilizaram o IT2.FLC para o controle da anestesia pela sua capacidade de ter um melhor desempenho em relação aos controladores *fuzzy* tradicionais ou tipo-1 (T1.FLC, do inglês *Type-1 Fuzzy Logic Controller*) para um alto nível de

incerteza, levando em consideração as incertezas dinâmicas do corpo humano, como as diferenças fisiológicas de cada paciente e os efeitos e interações dos remédios, assim dificultando o trabalho do controlador.

Tendo em vista a utilização do controlador IT2.FLC na aplicação da anestesia geral, este artigo tem como principal objetivo aplicar a técnica de controle *fuzzy* tipo-2 intervalar na anestesia geral, além de comparar seu desempenho com o T1.FLC por meio de simulações utilizando um modelo do corpo humano na anestesia.

2. FUNDAMENTOS DE CONTROLE FUZZY

Lofti A. Zadeh publicou um artigo (Zadeh 1965) introduzindo o conceito de conjuntos *fuzzy* como uma extensão da teoria de conjuntos *crisp*, considerando uma pertinência contínua de um objeto a um grupo. A lógica *fuzzy* veio com a proposta de modelar matematicamente a comunicação do ser humano, que diversas vezes possui expressões vagas ou imprecisas (Simões e Shaw 2007).

Aguirre (2007) explica que um conjunto *fuzzy* possui uma função de pertinência μ_A que pode assumir qualquer valor real entre 0 e 1 para o conjunto A no universo de discurso X

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1]. \quad (1)$$

Essa função de pertinência (MF, do inglês *Membership Function*) indica o quanto um valor numérico pertence a um valor linguístico. Esses são utilizados na fala humana para representar uma variável linguística, da mesma forma que uma variável como a temperatura pode ser representado por valores quente, morno ou frio. Nesse caso, a MF irá atribuir um valor real entre 0 e 1 para uma medição da temperatura em cada valor linguística, ou seja, o quanto irá pertencer a esses grupos linguísticos. Matematicamente, uma MF contínua poderá ter um formato mais complexo ou simples, sendo um exemplo a MF triangular (Azam *et al.* 2020), onde cada elemento x em X terá um valor de pertinência, utilizando os parâmetros a como começo do triângulo, b o pico e c o fim

$$\mu_A(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right). \quad (2)$$

O conjunto *fuzzy* tipo-2 \tilde{A} adiciona um outro nível de incerteza no convencional ou tipo-1, modelando a incerteza do significado das palavras (Rizol, Mesquita e Saotome 2011) e MF com uma mancha de incerteza (FOU, do inglês *Footprint Of Uncertainty*) que irá adicionar um erro a mais na definição.. Em termos matemáticos, a MF tipo-2 $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ de x não terá somente um valor associado, mas também um valor u em uma faixa de valores J_x para formar um intervalo de valores

$$\tilde{A} = \left\{ \left((x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) \right) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1] \right\}. \quad (3)$$

O controle *fuzzy*, apresentado primeiramente por Mamdani em 1974, se baseia no conhecimento e experiência de um projetista ou operador para tomar decisões do controle do sistema, sem utilizar um modelo matemático, de acordo com Gomide, Gudwin e Tanscheidt (1995). Esse tem sua estrutura básica mostrada na Figura 1.

A fuzzificação consiste em converter o valor *crisp* de um sensor e transformar em *fuzzy*, utilizando uma ou mais MFs, podendo até utilizar escalares antes de entrar na função (Simões e Shaw 2007).

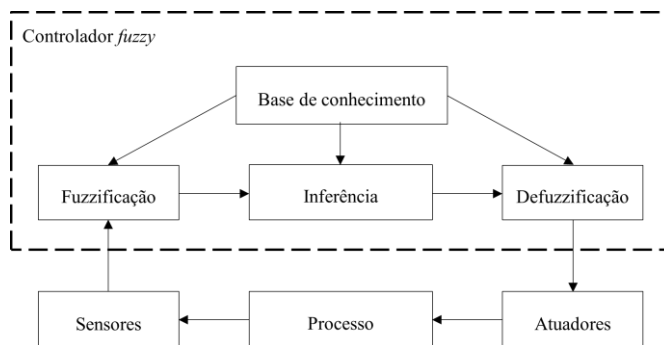


Figura 1. Estrutura básica do controlador *fuzzy*.

A base de conhecimento é dividida em duas, a base de dados contendo os valores de funções de pertinência e base de regras *fuzzy*. O modelo de regras (R_j) SE ENTÃO de acordo com Sandri e Correa (1999) é composto por valores de pertinência x_n que deverão pertencer aos valores linguísticos $A_{i,j}$ utilizando os conectivos E para poder ser inferida uma ação y_j a um conjunto de uma regra C_j

$$R_j: \text{SE } x_1 \text{ é } A_{1,j} \text{ e } \dots \text{ e } x_n \text{ é } A_{n,j} \text{ ENTÃO } y_j \text{ é } C_j. \quad (4)$$

Nascimento Jr. e Yoneyama (2000) explicam que a inferência serve para receber os valores de pertinência de valores linguísticos, compará-los com as regras e fornecer valores para as variáveis linguísticas de saída.

Por último, a defuzzificação transforma o valor *fuzzy* resultante da variável linguística da saída em um valor *crisp* para o atuador u^* , utilizando geralmente um algoritmo que calcula a saída, como o método de centro de áreas (Simões e Shaw 2007) sendo que a fórmula será o somatório, até o número total de valores linguísticos da saída (N), do valor de posição de centroide de cada área individual (u_i) multiplicado pela sua pertinência correspondente $\mu_{OUT}(u_i)$, dividido pelo somatório, até o número total de valores linguísticos da saída (N), de cada pertinência $\mu_{OUT}(u_i)$

$$u^* = \frac{\sum_{j=1}^N u_i [\mu_{OUT}(u_i)]}{\sum_{j=1}^N \mu_{OUT}(u_i)}. \quad (5)$$

A utilização de conjuntos *fuzzy* tipo-2 leva ao controle *fuzzy* tipo-2, esse tendo vantagens em relação ao tipo-1, como uma melhor utilização em sistemas com maior grau de incerteza, porém, apresentam uma maior complexidade computacional. Uma solução para esse problema é utilizar o IT2.FLC, com uma menor carga computacional, e dessa forma, a maioria das aplicações práticas utilizam esse controlador (Yao e Wang 2017).

A sua estrutura, mostrada na Figura 2, tem uma única diferença em relação ao tipo-1, o passo tipo-reduzidor, que transforma os conjuntos tipo-2 de saída em tipo-1 e é representado por um algoritmo (Chen *et al.* 2020), sendo um deles o algoritmo iterativo com condição de parada melhorado (EIASC, do

inglês *Enhanced Iterative Algorithm with Stopping Condition*).

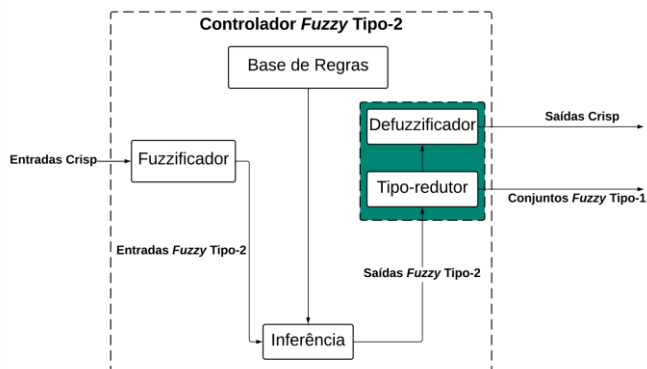


Figura 2. Estrutura básica do controlador fuzzy tipo-2.

3. ANESTESIA GERAL

A anestesia é definida como um estado reversível temporário de inconsciência no paciente, além disso, dois outros componentes são necessários para sua implementação, o bloqueio neuromuscular ou imobilidade e analgesia, quando o paciente não sente dor (Sadati, Hosseinzadeh e Dumont 2018). O procedimento anestésico terá normalmente três principais fases: indução, antes do procedimento cirúrgico com o objetivo de levar o paciente aos três componentes o mais rápido possível, manutenção, durante procurando manter o nível do medicamento e o paciente anestesiado, e recuperação, após o procedimento com o intuito de diminuir e parar a infusão para reverter o procedimento (Khodaei *et al.* 2019).

De acordo com Doctor *et al.* (2016), o médico anestesiológico mantém os três componentes da anestesia no paciente utilizando medicamentos e sinais vitais para monitoramento, como o eletroencefalograma (EEG) para medir atividade cerebral e eletromiograma (EMG) que mostra a atividade elétrica das células musculares, podendo indicar a imobilidade ou relaxamento muscular (RM) do paciente. A medição de pressão sanguínea (PS) é o sinal mais confiável para medir a profundidade de anestesia (DoA, do inglês *Depth of Anesthesia*), ou seja, a inconsciência.

Para obter matematicamente a relação entre a introdução do medicamento no paciente e seu efeito é utilizada a modelagem farmacocinética farmacodinâmica (PK/PD, do inglês *Pharmacokinetics/Pharmacodynamics*), discutida na próxima seção.

3.1 Modelagem Farmacocinética Farmacodinâmica

O modelo PK/PD é tradicionalmente explicado utilizando o modelo de compartimentos demonstrado na Figura 3 descrito em Copot (2020). Primeiramente a infusão do medicamento $u(t)$ no tempo t entra no primeiro compartimento, o plasma sanguíneo, e gradativamente flui para o outro compartimento, como tecidos adiposos ou musculares, pelas constantes k_{12} e k_{21} ou para fora do corpo com as constantes k_{10} e k_{20} baseado, assim levando ao conceito de farmacocinética, a relação dinâmica entre a concentração introduzida do remédio e sua

concentração no plasma sanguíneo. Porém, o efeito real do remédio é calculado pela farmacodinâmica, a relação dinâmica entre a concentração da concentração no plasma sanguíneo e o efeito real do remédio, criando um compartimento do efeito com as constantes de entrada k_{1E} e saída k_{E0} .

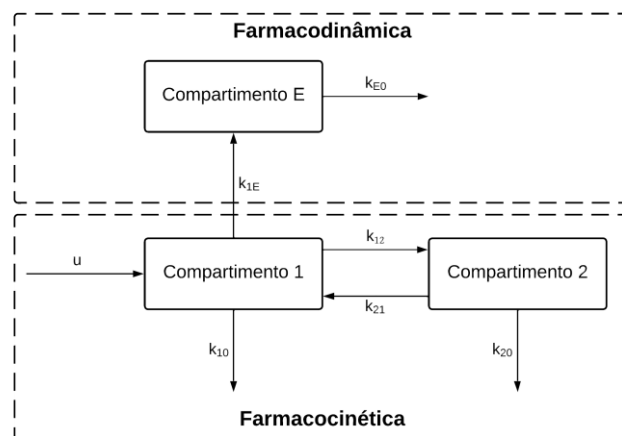


Figura 3. Modelo PK/PD no modelo de compartimentos.

A junção dos dois modelos resulta no modelo PK/PD do remédio, porém, é necessário lembrar que existe uma porção não linear no modelo no compartimento de efeito. Tal parte é explicada pela *Equação de Hill*, utilizada para calcular o efeito do remédio E com a concentração do compartimento efeito x_E , o efeito para a concentração de 50% $x_E(50)$, o valor do efeito mínimo E_0 , efeito máximo E_{max} e uma constante da curva sigmoide α

$$E = E_0 + (E_{max} - E_0) \frac{x_E^\alpha}{x_E^\alpha + x_E(50)^\alpha}. \quad (6)$$

Dessa forma, a Figura 4 demonstra melhor os passos do modelo PK/PD em diagrama de blocos.

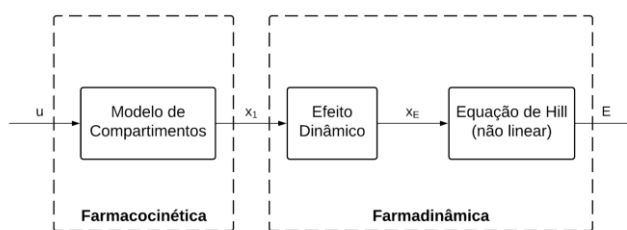


Figura 4. Modelo PK/PD em diagrama de blocos.

Para o controle da anestesia geral, este trabalho utiliza o modelo com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO, do inglês *Multiple Inputs Multiple Outputs*) descrito em Taheriyari, Ghafourian e Noori (2018) e Khalifa *et al.* (2019), baseado nos remédios bloqueador neuromuscular Atracúrio $U_1(s)$ e anestésico Isoflurano $U_2(s)$ para afetar, respectivamente, o RM em $G_{11}(s)$ e a PS em $G_{22}(s)$ para a inconsciência, porém, o Isoflurano também afeta a imobilização em $G_{12}(s)$. A analgesia não está no modelo pois não existe ainda um método confiável de medir a dor.

$$G_{11}(s) = \frac{(1 + 10,64s)e^{-s}}{(1 + 4,81s)(1 + 34,42s)(1 + 3,08s)} \quad (7)$$

$$G_{22}(s) = \frac{-15e^{-0,42s}}{1 + 2s} \quad (8)$$

$$G_{12}(s) = \frac{0,27e^{-s}}{(1 + 2,83s)(1 + 1,25s)} \quad (9)$$

Uma melhor visualização do modelo em diagrama de blocos está na Figura 5. O efeito da equação de Hill só irá afetar o RM, enquanto a PS será praticamente linear em baixas variações do remédio, seguindo a equação a seguir com E_0 igual a 0 e E_{max} igual a 1

$$RM = \frac{x_E^{2,98}}{x_E^{2,98} + (0,404)^{2,98}} \quad (10)$$

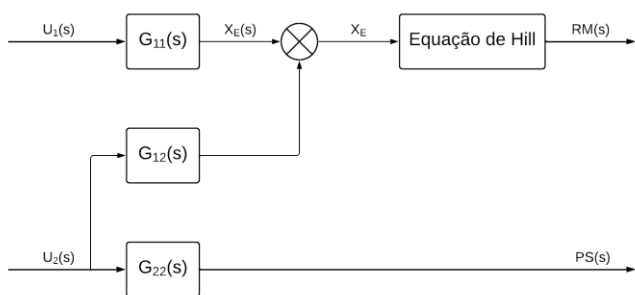


Figura 5. Modelo PK/PD da anestesia geral.

Esse modelo foi realizado no MATLAB (*MATrix LABORatory*) utilizando os parâmetros em (7), (8), (9), e (10) junto com as simulações e projetos dos controladores, descritos nas próximas seções.

4. PROJETO DOS CONTROLADORES FUZZY

Foram projetados controladores *fuzzy*, sendo esses, o controlador *fuzzy* tipo-1 com duas entradas e duas saídas (T1.22.FLC, do inglês *Type-1 Fuzzy Logic Controller with 2 inputs and 2 outputs*), o com quatro entradas e duas saídas (T1.42.FLC), o tipo-2 intervalar com duas entradas e duas saídas (IT2.22.FLC), e, por último, o tipo-2 intervalar com quatro entradas e duas saídas (IT2.42.FLC). Foi utilizado *Fuzzy Logic Toolbox* no MATLAB para definir os parâmetros e criar os controladores por meio de programas.

As entradas utilizadas foram Erro de Relaxamento Muscular (RM.e) e Erro de Pressão Sanguínea (PS.e) para os controladores com duas entradas, e as outras duas foram Integral do Erro de Relaxamento Muscular (i.RM.e) e Integral do Erro de Pressão (i.PS.e) para completar as quatro entradas. Entretanto, somente duas saídas foram controladas em todos os projetos, Infusão de Atracúrio (Atr.inf) e Concentração de Isoflurano (Iso.conc), de acordo com o modelo PK/PD.

Uma técnica de decomposição de controladores *Fuzzy*, com maiores detalhes em Doctor *et al.* (2016), foi utilizada para reduzir o número de entradas e saídas do controlador principal em vários controladores auxiliares com duas entradas e uma

saída, será melhor explicado com um diagrama de decomposição no projeto de cada controlador.

Cada controlador auxiliar irá contribuir somente para uma saída, logo, deverá haver ao menos dois para cada controlador principal. Foram utilizados dois tipos de bases de regras, uma para os controladores com duas entradas e outra para os controladores com quatro entradas, sendo que é utilizadas uma base para a primeira saída (Atr.inf) e outra para a segunda (Iso.conc).

As bases de regras utilizadas estão em Shieh *et al.* (2009), sendo que, para os controladores com duas entradas, elas mostram todas as combinações possíveis da entrada 1 (RM.e) assumir os valores linguísticos utilizados, na primeira linha, com todos os valores da entrada dois (PS.e), na primeira coluna.

De maneira similar aos anteriores, as bases de regras referentes aos controladores com quatro entradas irão mostrar todas as regras utilizadas, porém, deverão ter mais combinações de entradas por causa da decomposição em controladores auxiliares. Para quatro entradas, serão seis combinações diferentes de duas, calculado pela fórmula da combinação simples

$$C_2^4 = \frac{4!}{2!(4-2)!} = \frac{4!}{2!2!} = 6. \quad (11)$$

Portanto, serão seis controladores auxiliares para cada saída, ou seja, seis bases de regras.

4.1 Controladores Fuzzy Tipo-1

As funções de pertinências (MFs, do inglês *Membership Functions*) são diferentes para os controladores *fuzzy* tipo-1 e tipo-2, mas utilizam como base da mesma forma triangular, baseado nas formas em Shieh *et al.* (2009). As MFs utilizadas na fuzzificação dos controladores tipo-1 estão mostradas na Figura 6 são utilizadas para todas as entradas com todos os valores linguísticos, enquanto as funções de pertinência de todas as saídas na Figura 7 só irão conter valores com parte positiva com os parâmetros de cada MF descritos na Tabela 1, em que a representa o começo do triângulo, b o pico e c o fim, como em (2). Vale pontuar que os valores linguísticos utilizados na tabela 1 são NB (do inglês, *Negative Big*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), ZE (*Zero*), PS (*Positive Big*), PM (*Positive Medium*) e PB (*Positive Big*).

O diagrama funcional na Figura 12 pertence ao controlador IT2.42.FLC. A principal entre os controladores tipo-1 e tipo-2 é a ausência do bloco de redução de ordem para os controladores *fuzzy* tipo-1, enquanto para controladores com duas entradas, como o T1.22.FLC, somente os erros são considerados entradas.

A Figura 12 representa os estados do paciente em anestesia a serem atingidos pelo controle e os equipamentos físicos utilizados e o controlador *fuzzy*, com suas partes e processamento dentro da caixa pontilhada. Nesse caso é considerado que o controlador inclui o sistema computacional e de aquisição de dados para processar os sinais de entrada e enviar as saídas, porém, o funcionamento do controle *fuzzy*

está situado após às entradas, passando pelo bloco de inferência das regras com o método de Mamdani até o bloco de defuzzificação da saída, utilizando o método de centro de área. Os sensores irão medir o Relaxamento Muscular (RM) e a Pressão Sanguínea (PS) com o intuito de controlar essas variáveis para o paciente ficar, respectivamente, inconsciente e imobilizado, enquanto os atuadores serão uma Bomba de Seringa e um Vaporizador para induzir os medicamentos Atracúrio intravenoso e Isoflurano inalatório, respectivamente. A única diferença entre o T1.22.FLC e T1.42.FLC é a introdução no último de duas novas entradas, que serão as integrais dos erros.

Tabela 1. Parâmetros das funções de pertinência tipo-1

Valor linguístico	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	Parâmetros MATLAB
NB	-6	-6	-4	[-6,-6,-4]
NM	-6	-4	-2	[-6,-4,-2]
NS	-4	-2	0	[-4,-2,-0]
ZE	-2	0	2	[-2,0,2]
PS	0	2	4	[0,2,4]
PM	2	4	6	[2,4,6]
PB	4	6	6	[4,6,6]

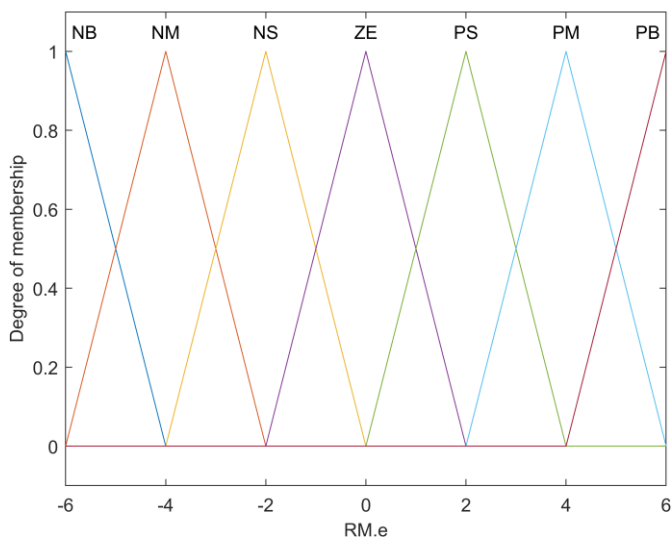


Figura 6. Funções de pertinências de todas as entradas tipo-1

Os diagramas de decomposição mostram como estão dispostos as saídas e entradas dos controladores auxiliares, cada um como uma base de regras distinta. Para o T1.22.FLC, tendo o diagrama demonstrado na Figura 8, um auxiliar para cada saída foi utilizado com regras distintas, enquanto o T1.42.FLC, com o seu diagrama de decomposição idêntico ao IT2.42.FLC mostrado na Figura 11, precisou de seis controladores para cada saída, cada um com uma combinação de entradas diferentes calculado em (11) e regras distintas. Foi utilizado um método para unir as saídas dos controladores auxiliares do T1.42.FLC, tirando o valor máximo *crisp* para ser utilizado.

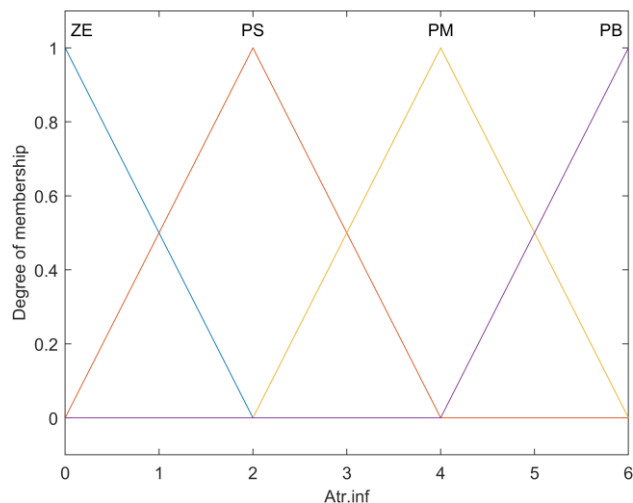


Figura 7. Funções de pertinências de todas as saídas tipo-1

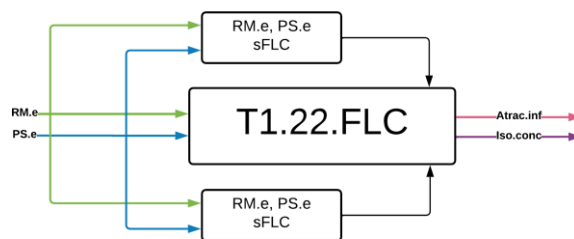


Figura 8. Diagrama de decomposição do T1.22.FLC

4.2 Controladores Fuzzy Tipo-2 Intervalares

Foram utilizadas MFs triangulares tipo-2 intervalares seguindo os parâmetros da Tabela 1 como as funções centrais e utilizando uma FOU para estendê-las em cada entrada e saída, mostrada nas Figuras 9 e 10 como respectivamente, um exemplo de uma entrada e um exemplo de uma saída.

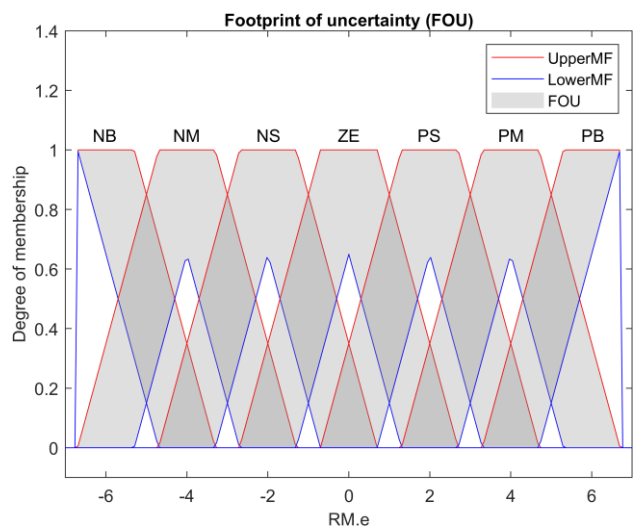


Figura 9. Exemplo de MFs de uma entrada tipo-2 intervalar

O método de calcular as FOUs das entradas utilizado está descrito em Doctor *et al.* (2016), que utilizou um método heurístico a partir de dados clínicos de pacientes em anestesia

no artigo para as entradas, porém, para as saídas, o processo de chegar até um FOU foi tentativa e erro.

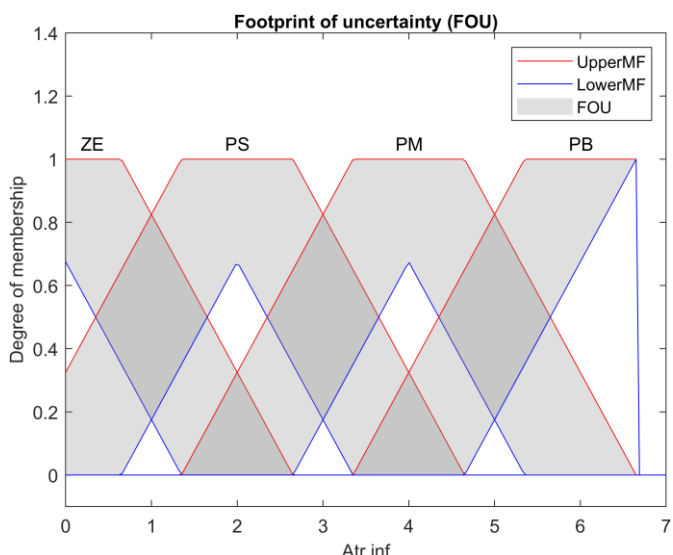


Figura 10. Exemplo de MFs de uma saída tipo-2 intervalar

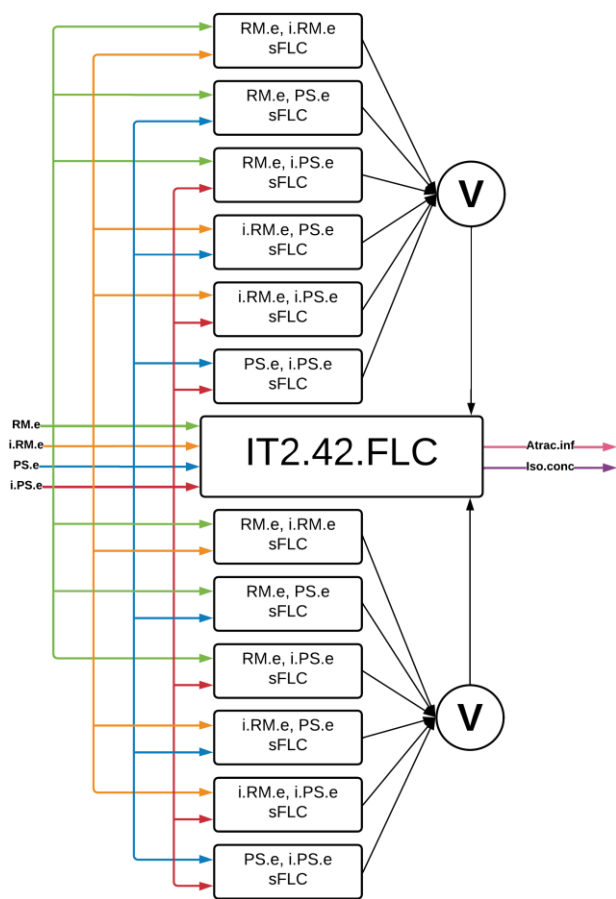


Figura 11. Diagrama de decomposição do IT2.42.FLC

Os valores e parâmetros utilizados no MATLAB, definindo o uma MF superior trapezoidal e inferior com o FOU específico, estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros das MFs tipo-2 intervalar

Entradas	FOU	Parâmetros MF superior MATLAB
RM.e	$\pm 0,7$	$[(a - 0,7), (b - 0,7), (b + 0,7), (c + 0,7)]$
i.RM.e	$\pm 0,7$	$[(a - 0,7), (b - 0,7), (b + 0,7), (c + 0,7)]$
PS.e	± 1	$[(a - 1), (b - 1), (b + 1), (c + 1)]$
i.PS.e	± 1	$[(a - 1), (b - 1), (b + 1), (c + 1)]$
Saídas	FOU	Parâmetros MF superior MATLAB
Atr.inf	$\pm 0,65$	$[(a - 0,65), (b - 0,65), (b + 0,65), (c + 0,65)]$
Iso.conc	$\pm 0,1$	$[(a - 0,1), (b - 0,1), (b + 0,1), (c + 0,1)]$

Os diagramas funcionais e de decomposição dos controladores seguem as mesmas estruturas descritas na seção 4.1. A Figura 12 mostra o diagrama funcional do IT2.42.FLC, enquanto o IT2.22.FLC somente difere no número de entradas. Os diagramas de decomposição dos controladores serão idênticos aos com o mesmo número de entradas nos tipo-1, ou seja, o IT2.22.FLC terá o diagrama igual ao mostrado na Figura 8 e o diagrama do IT2.42.FLC está demonstrado na Figura 11.

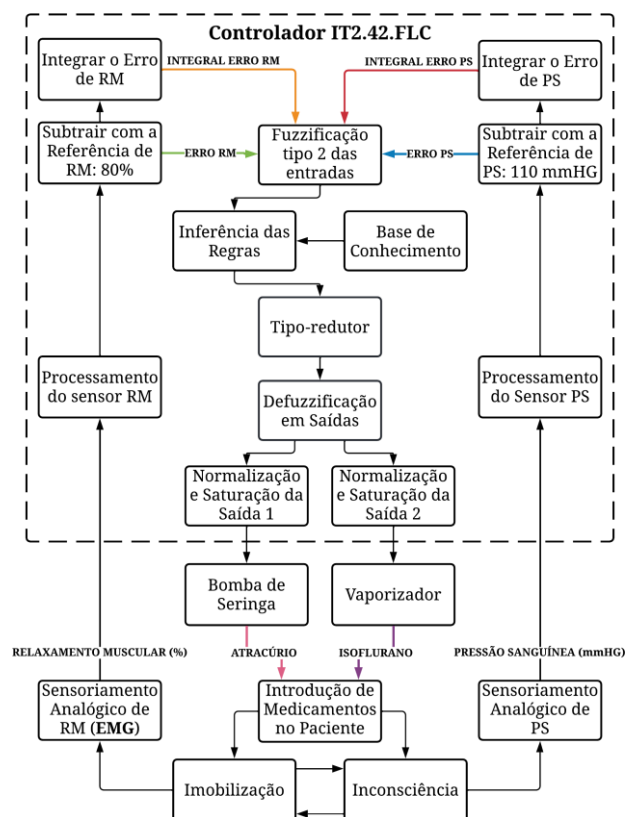


Figura 12. Diagrama funcional do IT2.42.FLC

O método utilizado para o tipo-reductor foi o EIASC, discutido na seção 2.

5. RESULTADOS

As comparações gráficas dos resultados das simulações estão mostradas nas Figuras 14 e 15, enquanto as Tabelas 4 e 5 mostram numericamente os erros estacionários de cada controlador para cada saída. Cada controlador foi simulado por 300 minutos, baseado no tempo de uma cirurgia de grande porte, a partir de programas no MATLAB com as referências a serem atingidas de 0,8 em RM e 110 mmHG em PS.

Em relação aos resultados dos controles da saída RM na Figura 13 e Tabela 3, o controlador com o menor módulo de erro estacionário foi o IT2.42.FLC em vermelho, assim sendo o melhor da comparação. Particularmente, essa saída é calculada pela equação de Hill, que torna a resposta não linear, além de apresentar um atraso de transporte (demonstrado na janela Zoom 1 localizada na figura 13) e ser afetado pelas duas entradas de acordo com seu modelo MIMO. É possível verificar um desempenho ruim para o controlador T1.22.FLC em magenta e um pouco melhor para o IT2.22.FLC em verde, enquanto o T1.42.FLC em azul chega bem próximo à referência, mas acaba com um maior erro (demonstrado graficamente na janela Zoom 2 na figura 13.)

Tabela 3. Comparação entre as simulações de RM

Parâmetro	T1.22.FLC	T1.42.FLC	IT2.22.FLC	IT2.42.FLC
Referência	0,8	0,8	0,8	0,8
Valor final	0,5751	0,8096	0,7203	0,7954
Módulo do erro	0,2249	0,0096	0,0797	0,0046
Classificação	4°	2°	3°	1°

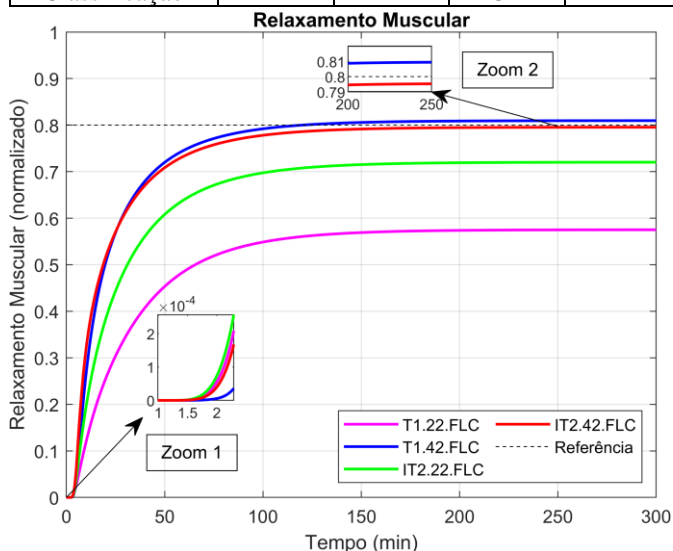


Figura 13. Comparação gráfica entre as simulações de RM

As comparações dos resultados de PS foram similares ao de RM, com a diferença de que o menor módulo de erro foi do T1.42.FLC, seguido por IT2.42.FLC, IT2.22.FLC, e T1.22.FLC. A saída não apresenta uma resposta não linear, porém, tem um atraso de transporte. No Zoom na Figura 14, é possível ver que a resposta em vermelho não é suave como as outras, isso pode ter sido causado por uma ausência de outras regras mais específicas para agir melhor nessa situação, ainda

podendo ter contribuído para um maior erro estacionário do mesmo.

Tabela 4. Comparação entre as simulações de PS

Parâmetro	T1.22.FLC	T1.42.FLC	IT2.22.FLC	IT2.42.FLC
Referência	110	110	110	110
Valor final	113,18	110,17	112,48	110,46
Módulo do erro	3,1841	0,1712	2,4803	0,4656
Classificação	4°	1°	3°	2°

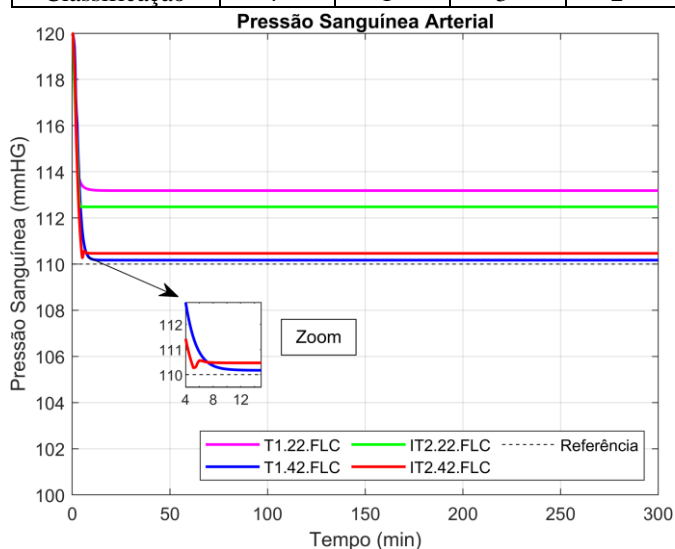


Figura 14. Comparação gráfica entre as simulações de PS

Analisando todos os resultados, os controladores *fuzzy* tipo-2 intervalares superaram os tipo-1 com o mesmo número de entradas, porém, com uma clara indicação que um maior número de entradas beneficiou a todos e deve ser considerado para um melhor desempenho.

6. CONCLUSÃO

Este artigo demonstrou a aplicação da técnica de controle *fuzzy* tipo-2 intervalar na anestesia geral e comparou com o controle tipo-1 utilizando simulações baseadas em um modelo PK/PD do corpo humano na anestesia. Os resultados das simulações mostraram claramente que a utilização do controle *fuzzy* é viável para essa aplicação, demonstrando a superioridade do controle tipo-2 em relação ao tipo-1 e o benefício de um maior número de entradas, assim, sendo uma ótima alternativa para controlar sistemas dinâmicos complexos não lineares e com múltiplas entradas e saídas.

REFERÊNCIAS

- Aguirre, L. A. (2007). *Enciclopédia de automática (vol. 3): controle e automação* (Vol. 3). Editora Blucher.
- Amiri, A. A., Karvandian, K., Ashouri, M., Rahimi, M., & Amiri, A. A. (2020). Comparação entre anestesia intravenosa e inalatória na náusea e vômito pós-operatórios em laparotomia: estudo clínico randomizado. *Revista Brasileira de Anestesiologia*, 70, 471-476.

- Azam, M. H., Hasan, M. H., Hassan, S., & Abdulkadir, S. J. (2020). Fuzzy type-1 triangular membership function approximation using fuzzy C-means. In *2020 International Conference on Computational Intelligence (ICCI)* (pp. 115-120). IEEE.
- Chen, C., Wu, D., Garibaldi, J. M., John, R. I., Twycross, J., & Mendel, J. M. (2020). A comprehensive study of the efficiency of type-reduction algorithms. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 29(6), 1556-1566.
- Copot, D. (Ed.). (2020). *Automated drug delivery in anesthesia*. Academic Press.
- Doctor, F., Syue, C. H., Liu, Y. X., Shieh, J. S., & Iqbal, R. (2016). Type-2 fuzzy sets applied to multivariable self-organizing fuzzy logic controllers for regulating anesthesia. *Applied Soft Computing*, 38, 872-889.
- Gomide, F., Gudwin, R. R., & Tanscheit, R. (1995). Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. In *Proc. 6 th IFSA Congress-Tutorials* (Vol. 59, pp. 1-38).
- Ilyas, M., Khaqan, A., Iqbal, J., & Riaz, R. A. (2017). Controle da hipnose na administração de propofol com base na estratégia de controle não linear. *Revista Brasileira de Anestesiologia*, 67, 122-130.
- Khalifa, T. R., El-Nagar, A. M., El-Brawany, M. A., El-Araby, E. A., & El-Bardini, M. (2020). A novel fuzzy Wiener-based nonlinear modelling for engineering applications. *ISA transactions*, 97, 130-142.
- Khodaei, M. J., Balaghi I., M. H., Mehrvarz, A., & Jalili, N. (2019). An adaptive multi-critic neuro-fuzzy control framework for intravenous anesthesia administration. *IFAC-PapersOnLine*, 51(34), 202-207.
- Nascimento Jr., C. L., & Yoneyama, T. (2000). *Inteligência artificial em controle e automação*. Editora Edgard Blücher Ltda.
- Rizol, P. M. S. R., Mesquita, L., & Saotome, O. (2011). Lógica fuzzy tipo-2. *Revista Sodebras*, 6, 27-46.
- Sadati, N., Hosseinzadeh, M., & Dumont, G. A. (2018). Multi-model robust control of depth of hypnosis. *Biomedical Signal Processing and Control*, 40, 443-453.
- Sandri, S., & Correa, C. (1999). Lógica nebulosa. *Escola de redes neurais: conselho nacional de redes neurais*, 5, 73-90.
- Sharma, R., Deepak, K. K., Gaur, P., & Joshi, D. (2020). An optimal interval type-2 fuzzy logic control based closed-loop drug administration to regulate the mean arterial blood pressure. *Computer methods and programs in biomedicine*, 185, 105167.
- Shieh, J. S., Abbod, M. F., Hsu, C. Y., Huang, S. J., Han, Y. Y., & Fan, S. Z. (2009). Monitoring and control of anesthesia using multivariable self-organizing fuzzy logic structure. In *Fuzzy Systems in Bioinformatics and Computational Biology* (pp. 273-295). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Simões, M. G., & Shaw, I. S. (2007). *Controle e modelagem fuzzy*. Editora Blucher.
- Taheriyani, F., Ghafourian, M. S., & Noori, A. (2018). Applying GA optimization algorithm for interval type-2 Fuzzy logic controller parameters of multivariable anesthesia system. In *Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on* (pp. 1613-1618). IEEE.
- Wei, Z. X., Doctor, F., Liu, Y. X., Fan, S. Z., & Shieh, J. S. (2020). An optimized type-2 self-organizing fuzzy logic controller applied in anesthesia for propofol dosing to regulate BIS. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28(6), 1062-1072.
- Yao, D., & Wang, C. (2017). Interval type-2 fuzzy information measures and their applications to attribute decision-making approach. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33(3), 1809-1821.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.