

## **LPA2v APLICADA AO TRATAMENTO DE SINAIS DE SENSORES MEMS E CONTROLE DE SISTEMAS ROBÓTICOS**

### **Arnaldo de Carvalho Junior**

Mestre em Engenharia, professor e membro do grupo de pesquisa AUTOMSYSTEM, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Cubatão (IFSP Cubatão), SP, Brasil.

### **Amauri Dias de Carvalho**

Mestre em Engenharia, professor e membro do grupo de pesquisa AUTOMSYSTEM, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Cubatão (IFSP Cubatão), SP, Brasil.

### **Marcelo Saraiva Coelho**

Mestre em Engenharia, professor e membro do grupo de pesquisa AUTOMSYSTEM, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Cubatão (IFSP Cubatão), SP, Brasil.

### **Marcos Marinovik Doro**

Doutor em Engenharia, professor e líder do grupo de pesquisa AUTOMSYSTEM, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Cubatão (IFSP Cubatão), SP, Brasil.

### **Ulisses Galvão Romão**

Especialista, professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Cubatão (IFSP Cubatão), SP, Brasil.

**RESUMO:** Os Sistemas robóticos industriais utilizam controle em malha fechada, consistindo essencialmente de sensor, comparador, controlador e atuador. Os sinais dos sensores utilizados nestes sistemas podem ser contaminados por erros e incertezas. O controlador pode fazer uso de diversas estratégias de controle, desde um sistema proporcional-integral-derivativo (PID), técnicas de controle robusto, ótimo, não linear, lógica difusa (*Fuzzy Logic*) até redes neurais. A lógica paraconsistente (LP), pode ser considerada uma alternativa à lógica difusa, empregando algoritmos relativamente simples, de baixo consumo de recursos computacionais e que permite a construção de blocos elementares, ou células, para compor redes neurais artificiais paraconsistentes (RNAP). O escopo deste

projeto é o desenvolvimento de um sistema de controle baseado em RNAP para ser implementado em sistemas robóticos utilizando microcontrolador e sensores inerciais compactos de tecnologia microeletromecânica (MEMS).

**Palavras-chave:** Sistemas de Controle. Sistemas Robóticos. MEMS. Lógica Paraconsistente Anotada, Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes.

**ABSTRACT:** Industrial robotic systems use closed loop control, consisting essentially of sensor, comparator, controller and actuator. Sensor signals used by these systems can be contaminated by errors and uncertainties. The controller can make use of several control strategies, such as a proportional-integral-derivative (PID) system, techniques of robust, optimum, non-linear control, fuzzy logic to neural networks. Paraconsistent logic (PL) can be considered as an alternative to fuzzy logic, using relatively simple algorithms with low computational resources consumption and allowing the construction of elementary blocks, or cells, to compose paraconsistent artificial neural networks (PANN). The scope of this project is the development of an PANN-based control system to be implemented in robotic systems using microcontroller circuit and compact inertial sensors of microelectromechanical systems (MEMS) technology.

**Keywords:** Control Systems. Robotic Systems. MEMS. Paraconsistent Annotated Logic. Paraconsistent Artificial Neural Networks.

## INTRODUÇÃO

Sistemas de controle são utilizados desde o início da revolução industrial, quando James Watt ainda no século XVIII construiu um controlador centrífugo de velocidade de máquina à vapor; com o objetivo de medir, comandar, controlar e ajustar a si próprio ou a um sistema específico. Sistemas de controle são essenciais no comando numérico de máquinas-ferramentas utilizadas na manufatura, controle de processos industriais entre outras aplicações [1].

A evolução tecnológica das últimas décadas permitiu o surgimento de sistemas robóticos capazes de realizar trabalho de maneira autônoma ou pré-programada, mediante um sistema de controle, geralmente em malha fechada [2].

Em sistemas de controle em malha fechada, as informações sobre a saída do processo são utilizadas para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo em um dado instante. Uma técnica muito utilizada para sistemas de controle em malha fechada faz uso de controlador proporcional, integral, derivativo (PID) [3], onde a comparação entre o sinal de entrada e saída, ou sinal de erro, possa ser minimizada pela ação proporcional, zerada pela ação integral e que a ação derivativa permita uma velocidade antecipativa.

A maioria dos sistemas robóticos com movimento utilizam sensores inerciais do tipo giroscópio e acelerômetro, com algoritmo de inteligência artificial [4]. Uma tecnologia micro-eleto-mecânica integrada em um chip de baixo custo, contendo acelerômetro e giroscópio de 3 eixos cada um, pode ser utilizada [4].

Os sinais dos sensores da saída do sistema de controle de malha fechada podem estar contaminados por ruído ou apresentarem um determinado grau de incerteza. Técnicas mais recentes de controle e sistemas incluem controle robusto [5] e o algoritmo de Kalman [6] para análise de tendências e fornecimento de estimativas de grandezas medidas e valores associados [7], sendo utilizado em sistemas não lineares [8].

Vários sistemas de controle de automação e robóticos implementam sistemas com lógica difusa (Fuzzy Logic) [9], baseados na teoria dos conjuntos difusos proposto por Lotfi A. Zadeh, permitindo que estados indeterminados possam ser tratados pelo dispositivo controlador [10].

Uma linha de pesquisa atual em controle de sistemas robóticos trabalha com técnicas de redes neurais para lidar com as incertezas e perturbações do sistema [11] [12], além de serem mais eficientes na aproximação e tratamento de sistemas não lineares [13]. Vários estudos utilizam redes neurais implementadas a partir da lógica difusa (*neuro-fuzzy networks*) [14] [15] [16].

A lógica paraconsistente anotada (LPA) é uma alternativa à lógica difusa. A sua principal característica é aceitar contradições em seus fundamentos [17] [18] [19]. Algoritmos baseados na LPA oferecem maior velocidade de processamento, podendo ser implementados em sistemas de tempo real [20]. O algoritmo da lógica paraconsistente

anotada com anotação de dois valores (LPA2v), uma variação de LPA, pode ser utilizada para formar células neurais artificiais, que quando interligadas, formam redes neurais artificiais paraconsistentes (RNAP) [21] [22].

A proposta desta pesquisa é verificar a viabilidade de uma forma inovadora de sistema de controle formado por Rede Neural Artificial Paraconsistente (RNAP), fundamentada na LPA2v, que possa tratar o sinal dos sensores inerciais MEMS utilizados e controlar um sistema robótico de forma eficiente e com baixo consumo de recursos computacionais.

## REVISÃO DA LITERATURA

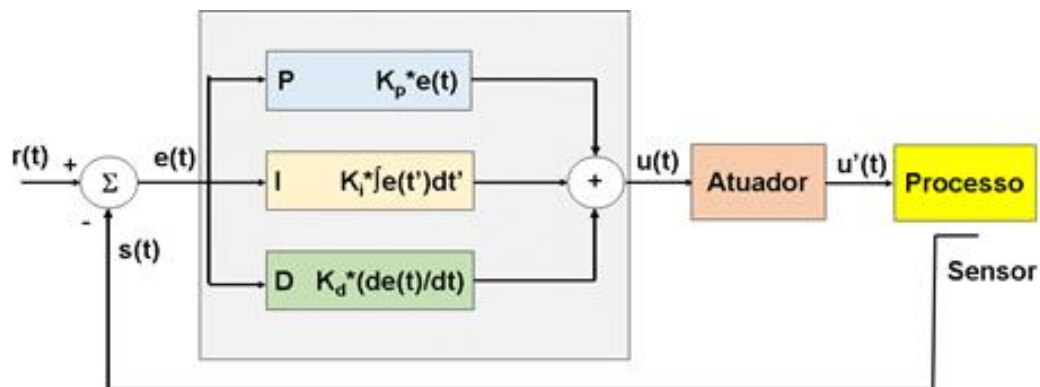
O controle em malha fechada, ou controle retroativo (feedback) necessita de informações da saída do controlador, provenientes de elementos sensores, para comparar com a referência (set-point) e corrigir a saída caso haja um desvio dos parâmetros estabelecidos.

### **A. Controladores de Sistemas Robóticos**

Controladores proporcional-integral-derivativos (PID) são amplamente utilizados na indústria de processos, entretanto, sua eficácia pode ser limitada por ser uma técnica de sistemas lineares e devido à sintonia dos parâmetros do PID [3]. O ajuste ou sintonia manual dos controladores PID, requer a otimização de três parâmetros, é uma tarefa demorada e desafiador [23]. O diagrama de blocos do controle proporcional-integral-derivativo (PID) em malha fechada está retratado na figura 1, a seguir. A equação geral do sistema é dada por (1). Onde  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  são valores positivos e denotam o ganho da atuação proporcional, integral e derivativa. O valor de referência do processo é dado por  $r(t)$ . O sinal do sensor,  $s(t)$ , fornece o valor atual do processo e a diferença (erro) por  $e(t)$ .

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(t') dt' + K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

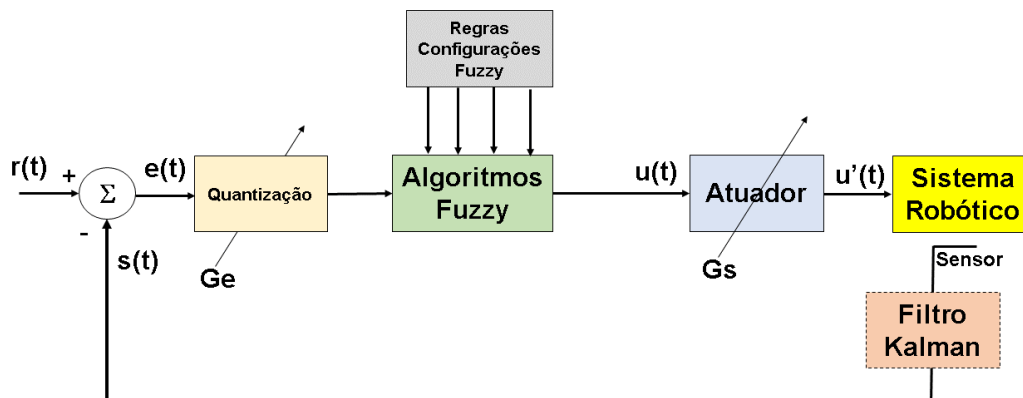
Figura 1 - Controle PID em malha fechada (autoria própria).



O sinal do sensor pode estar contaminado por ruído e imprecisões. O algoritmo de Kalman é muito utilizado para gerar resultados que tendam a se aproximar dos valores reais das grandezas medidas e valores associados [24], podendo ser empregado para produzir uma estimativa ótima de estado, minimizando o erro médio quadrático [25]. O filtro de Kalman permite ajustar a taxa de amostragem nos sensores de modo a minimizar o erro estimado [26], podendo assim ser utilizado no tratamento dos sinais de sensores em sistemas robóticos [27]. Devido à sua complexidade, com a maior capacidade computacional dos microprocessadores e microcontroladores, é que mais recentemente o algoritmo de Kalman passou a ser largamente utilizado [28].

A Lógica difusa pode ser utilizada para o controle de um sistema de automação e em especial sistemas robóticos, empregando algoritmos que evitam a necessidade de descrição matemática detalhada do elemento a ser controlado, apresentando ainda um algoritmo inerentemente robusto [29]. A figura 2 apresenta um diagrama de blocos conceitual de um sistema robótico controlado por lógica difusa e filtragem (opcional) do sinal do sensor por algoritmo de Kalman, já que a lógica difusa pode também ser utilizada no tratamento do sinal [30]. Os valores de  $G_e$  e  $G_s$  da figura referem-se a fatores de escala, ou ganho, da entrada e saída.

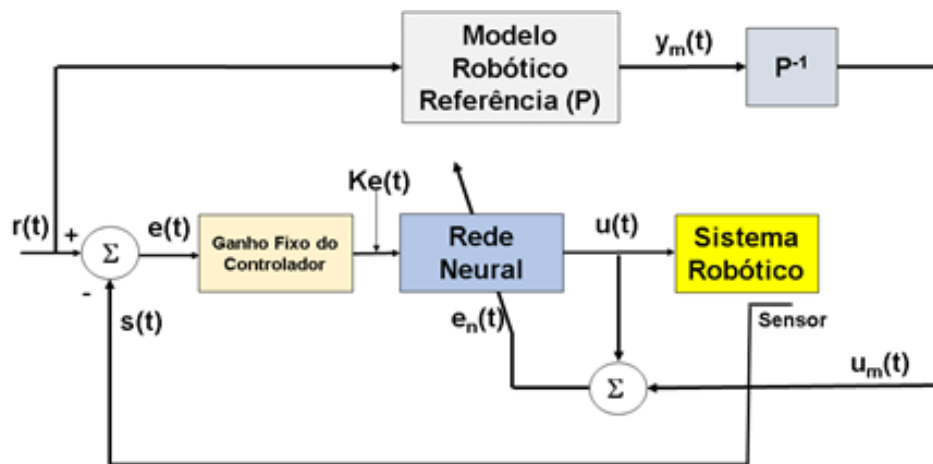
Figura 2 - Controle de Sistema Robótico por Lógica Difusa e Minimização da Incerteza do Sensor por Filtro Kalman opcional. Fonte: adaptação de WALKILEH, GILL, 1988, fig.1 [29].



Uma estratégia de controle robusto bem conhecida para a eliminação de incertezas e manuseio de distúrbios é o controle de modo deslizante (*Sliding Mode Control – SMC*), sendo muito utilizada em sistemas de estruturas variáveis [23].

As Redes neurais são vantajosas na aproximação de funções não-lineares e têm sido amplamente aplicadas na resolução de problemas de controle não-linear [13]. Redes Neurais podem ser desenvolvidas para o controle de enlace fechado de sistemas não lineares, conforme diagrama de blocos apresentado na figura 3 [31]. Neste diagrama, um modelo de referência do sistema robótico é utilizado para ajustar a rede neural. No diagrama,  $K_e(t)$  é o sinal de erro com o ganho fixo. O erro entre a saída da rede neural e o modelo robótico de referência é dado por  $e_n(t)$ , usado para realimentar e ajustar a rede neural artificial. A saída do sistema robótico modelado é dada por  $y_m(t)$ . Sistemas híbridos, combinando técnicas como SMC e lógica difusa, Rede neural com lógica difusa [32], tem sido proposto [23].

Figura 3 - Controle de Sistema Robótico em malha fechada por rede neural. Fonte: adaptação de TRUSCĂ, LAZEA, 2002, fig. 2 [31].



### B. Lógica Paraconsistente

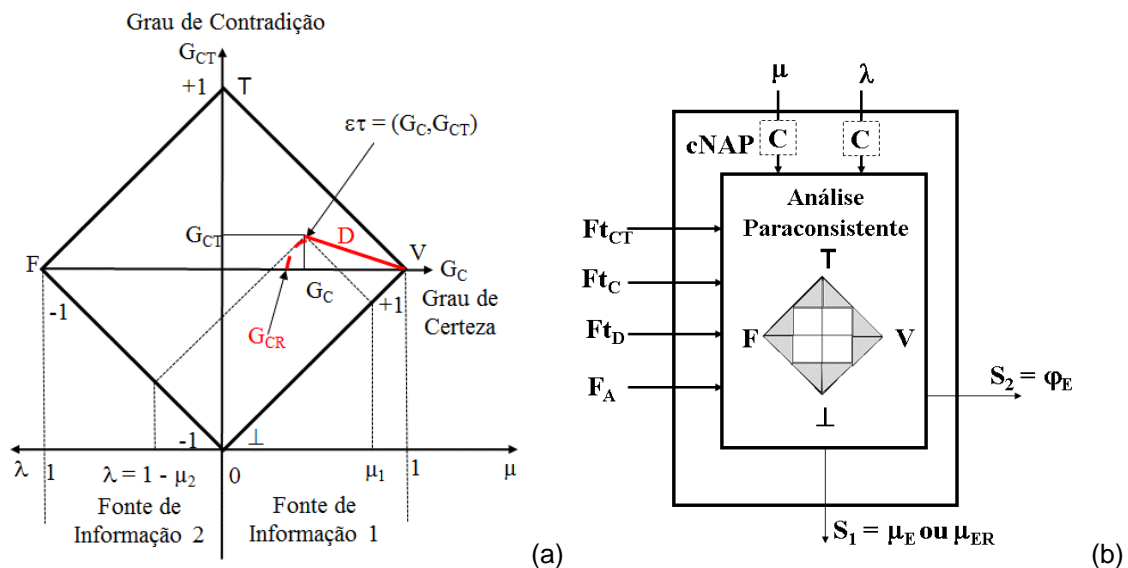
A LP é uma lógica não clássica que tolera a contradição em seus fundamentos, podendo ser aplicada em situações onde ambos, uma sentença e sua negação, podem ser verdadeiras [17]. Assim, em adição aos estados lógicos verdadeiro (V) e falso (F), uma proposição pode ainda ter outros estados, como o inconsistente (T) e o indeterminado ( $\perp$ ).

A LPA é uma extensão da LP onde as fórmulas proposicionais e valores de anotações são representados em um reticulado finito. Quando múltiplas inferências apresentam inconsistências, a LPA pode ser adequada, utilizando o conhecimento de evidências para auxiliar na resolução dos conflitos [22]. Na LPA2v, a representação de evidências em um reticulado no plano real é formada por pares  $(\mu, \lambda)$ , permitindo assim atingir maior poder de representação, conforme figura 4a.

Um Nó de Análise Paraconsistente (NAP) [17], é formado por um conjunto de algoritmos extraídos do reticulado da LPA2v, permitindo uma formalização e descrição algorítmica para tomadas de decisão. Estes valores são representados em forma de graus de evidência favorável ( $\mu$ ), e desfavorável ( $\lambda$ ) à proposição que está sendo analisada, sendo extraídos de medições em grandezas físicas, contidos em um intervalo  $[0, 1]$  e pertencentes ao conjunto dos números reais  $\mathfrak{R}$ . Aplicações híbridas de estratégias de controle combinando NAPs baseados em LPA2v e controles clássicos como o PID tem apresentado resultados promissores [43]. O NAP é o núcleo de uma CNAP [22]. A figura 4b apresenta o símbolo de uma CNAP padrão. Da figura 4a, os graus de certeza (GC) e contradição (GCT) apresentam valores entre  $[-1, 1]$ . O grau de certeza real (GCR), extraída a contradição é

uma projeção no eixo do GC, conforme indicado em vermelho na mesma figura. O grau de evidência resultante ( $\mu_e$ ) e evidência resultante real ( $\mu_{er}$ ), são a normalização entre [0,1] de GC e GCR. As entradas Fator de Tolerância à Contradição (FtCT), Certeza (FtC), Decisão (FtD) e Aprendizagem (FA) são ajustes externos possíveis da CNAP. O intervalo de certeza ( $\varphi_e$ ) é uma saída possível da CNAP.

Figura 4 - Reticulado finito de Hasse da LPA2v (a) e símbolo da CNAPP (b). Fonte: adaptação [22].



### C. Sensores de Inercia MEMS

Os Sistemas microeletromecânicos (MEMS) são sistemas “inteligentes” em miniatura, consistindo em microdispositivos mecânicos integrados a componentes elétricos e/ou circuitos eletrônicos, sobre um substrato de silício de dimensões micrométricas [33].

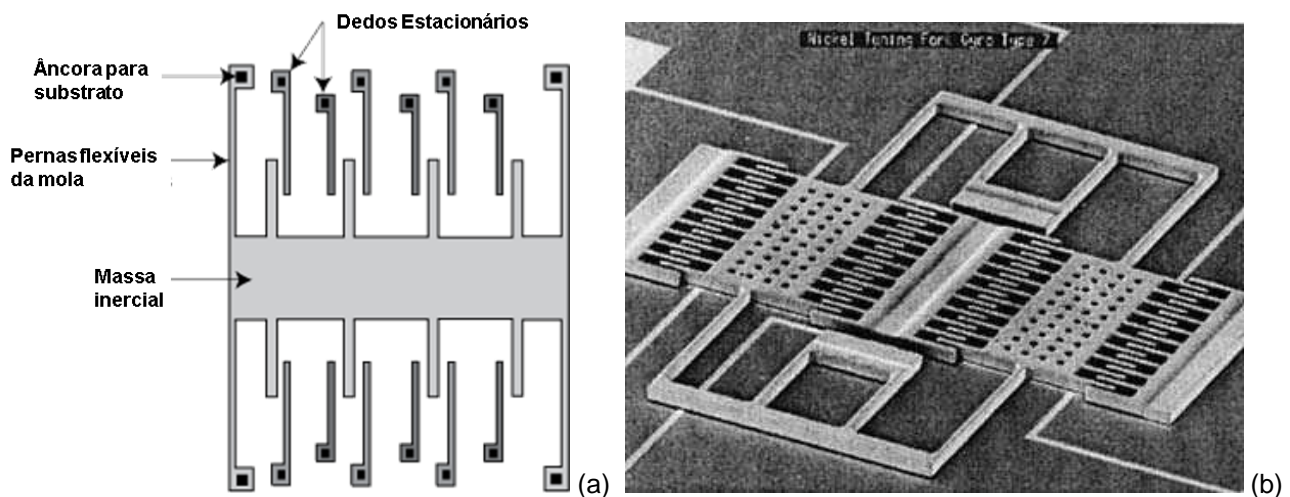
Acelerômetros e Giroscópios são os principais dispositivos usados em sensores inerciais aplicados a sistemas robóticos. Existem diversos tipos de acelerômetro, tais como os baseados em efeito piezo elétrico, piezo resistivo e capacitivo.

O acelerômetro capacitivo MEMS usa massas de prova separadas para cada eixo. A aceleração ao longo de um determinado eixo induz o deslocamento na massa de prova correspondente [34]. A figura 5a ilustra um acelerômetro capacitivo MEMS de superfície para um eixo, onde uma aceleração causa um deslocamento correspondente da massa inercial, sendo detectada pela mudança de capacitância entre os dedos do pente [35].



O IEEE define um giroscópio de estrutura vibratória (*vibrating structure gyroscope*), como um giroscópio vibratório Coriolis (*Coriolis vibratory gyroscope* - CVG) [36] é um giroscópio que usa uma estrutura vibratória para determinar a taxa de rotação. No giroscópio MEMS Um par de massas que são levadas a oscilar com igual amplitude, mas em direções opostas. A rotação faz com que as massas de prova vibrem fora do plano pelo Efeito Coriolis. O movimento é percebido por efeito capacitivo. A figura 5b apresenta o primeiro protótipo funcional de giroscópio por diapasão de acionamento de pente projetado pelo Charles Stark Draper Lab [37].

Figura 5 - Esboço de um acelerômetro capacitivo MEMS de 1 eixo (a) [35]. Protótipo de Giroscópio do Draper Lab (b) [37].



## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a etapa de simulação, testes e projeto de sistema de controle por rede neural artificial paraconsistente são utilizados os softwares MATLAB, SOLIDWORKS, SERIALCHART e GAZEBO. Ensaios de filtro com CNAP e sensor de temperatura integrado LM35 são realizados para validação da lógica como filtro de sinais de sensores.

Os sistemas robóticos já desenvolvidos pelo Laboratório de Controle Aplicado (LCA), do Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle da Escola Politécnica da USP, podem ser utilizados para os ensaios práticos. As figuras 6a e 6b apresentam sistemas robóticos desenvolvidos no LCA [38]. Os sistemas robóticos utilizados empregam

módulos Teensy USB com microcontrolador ARM MK20DX256 de 32 bits ARM Cortex-M4 72 MHz, conforme a figura 7.

Figura 6 - Robô equilibrado em bola (a) e Robô auto equilibrado (b) do LCA-POLI USP [38].

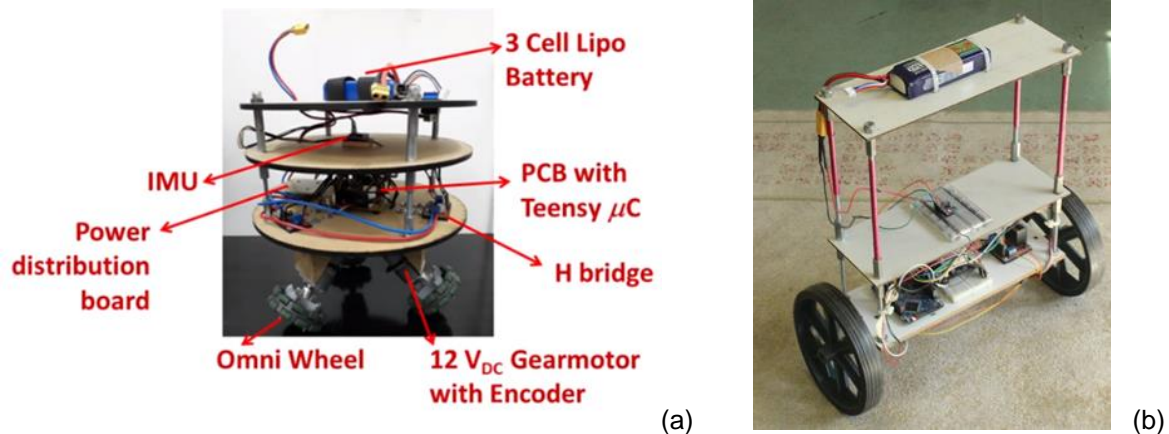
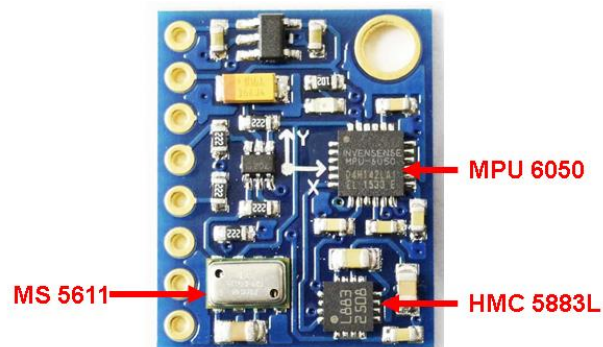


Figura 7 - Módulo Teensy 3.2 USB.



A unidade de medida inercial (*inertial measurement unit* – IMU) utilizada é um módulo GY-86, conforme a figura 10. O IMU é composto por 3 Chips Principais, a saber: MPU6050 (Invensense), composto por Giroscópio 3 eixos, Acelerômetro 3 eixos e Processador Digital de Movimento (DMP), HMC5883L (Honeywell), composto por Sensor de Campo Magnético (Compasso) com Tecnologia Anisotrópica Magnetoresistiva (Anisotropic Magnetoresistive - AMR) de baixo ruído e MS5611 (Measurement Specialties) composto por Sensor de Pressão Barométrica piezo-resistivo, sensibilidade de 450 a 1100 mbar e conversor A/D de 24 bits.

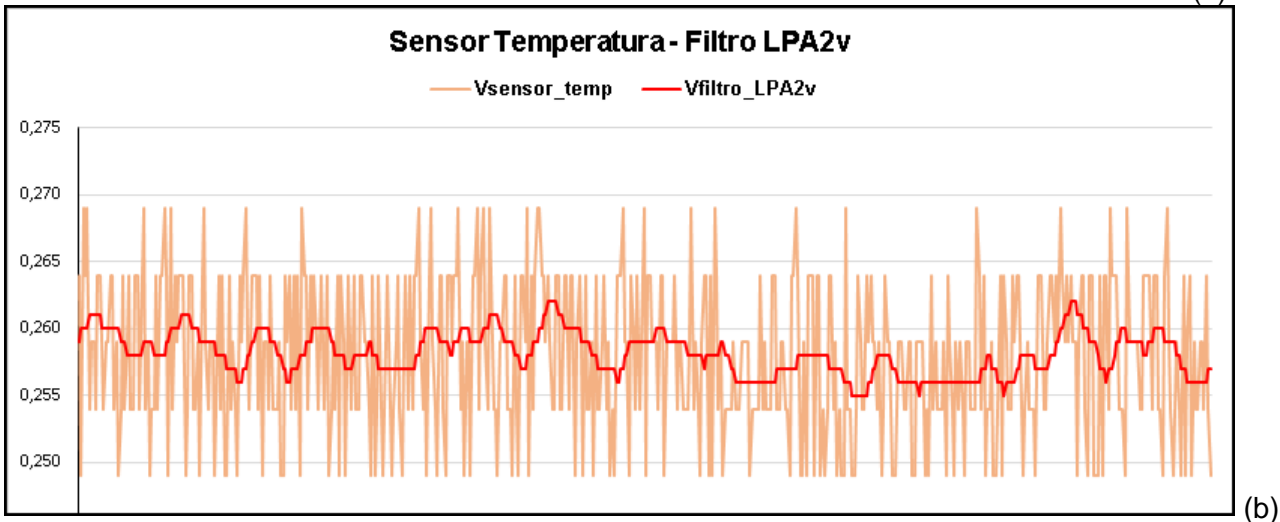
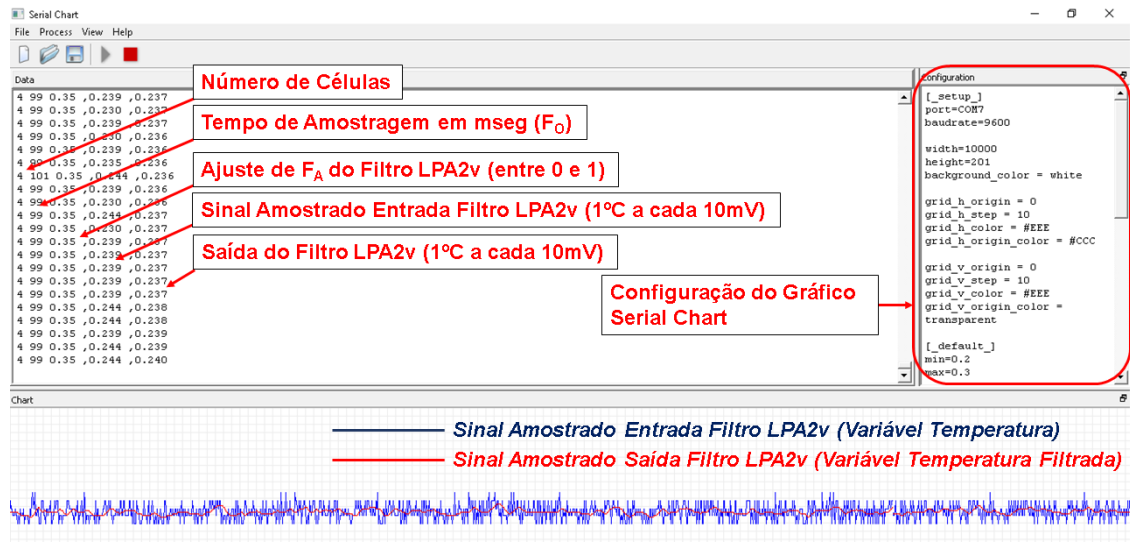
Figura 8 - Unidade de Medida Inercial (IMU), GY-86, composto por Giroscópio, Acelerômetro, Pressão Barométrica e Compasso.



## RESULTADOS E DISCUSSÕES

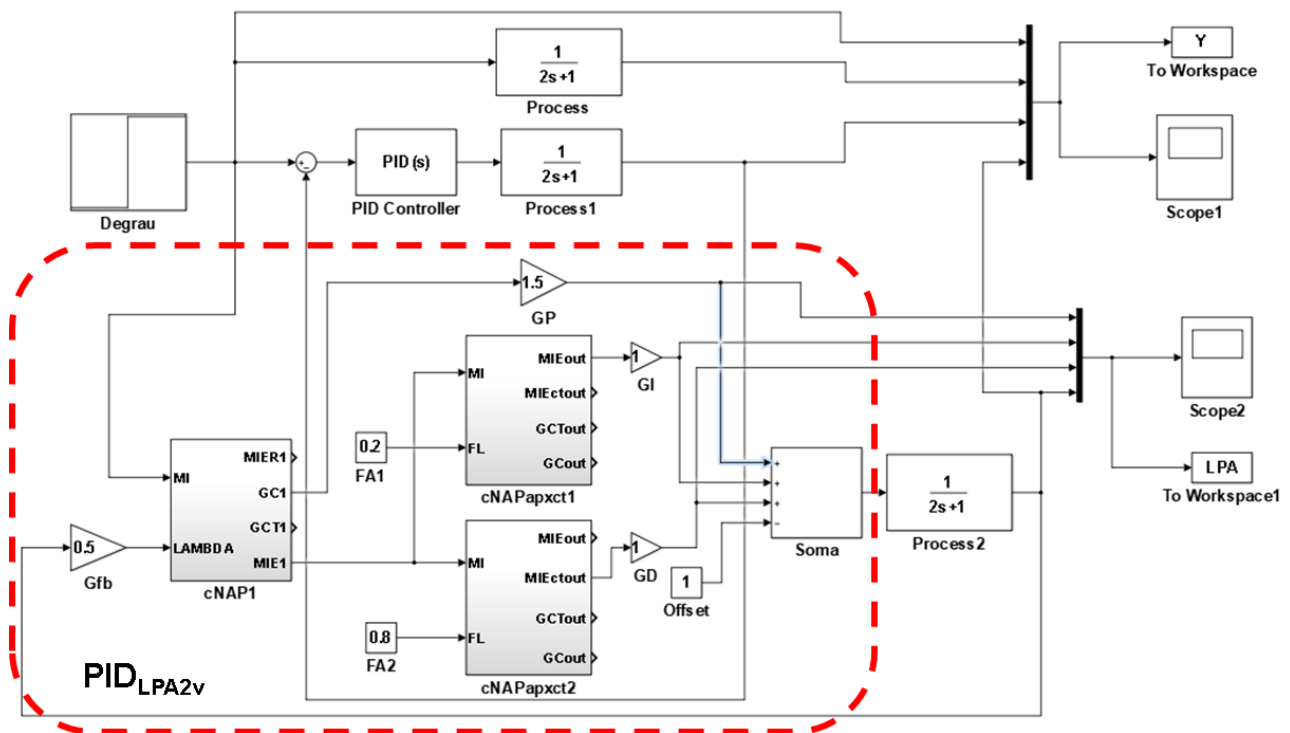
Ensaio de um filtro formado por células neurais artificiais paraconsistentes por extração do efeito da contradição em cascata, em microcontrolador, chamado de Filtro LPA2v [41],[42], filtrando as medições de um sensor MEMS LM-35 de temperatura, apresentaram resultados satisfatórios, conforme os resultados observados na figura 9<sup>a</sup>, exibidos no software SerialChart e na figura 9b, em detalhes via MS Excel, a seguir. Nesta aplicação cada célula funciona como um filtro passa baixa de primeira ordem, extraíndo a média da variação do sinal aplicado a sua entrada, conforme observado em maior detalhe na figura 9b (linha vermelha). O fator de aprendizagem ( $F_A$ ) atua no atraso de cada célula. Foram utilizadas 4 células cNAPapxct em cascata, com  $F_A$  de 0,35.

Figura 9 - Filtragem de medida de sensor com células neurais artificiais paraconsistentes (a) [41]. Detalhe da atuação do Filtro LPA2v em relação ao sinal do sensor sem filtragem (b).



A figura 10, a seguir, apresenta um sistema simulado em MATLAB, com processo de primeira ordem em malha aberta, com controle PID aplicado na entrada e com controle PID equivalente via rede de células neurais artificiais paraconsistentes ( $PID_{LPA2v}$ ).

Figura 10 - Sistema em malha aberta, com controlador PID e controle por rede de células neurais artificiais paraconsistentes ( $PID_{LPA2v}$ ).



O processo apresenta ganho  $K$  unitário e constante de tempo  $\tau$  de dois segundos. A taxa de amostragem da simulação é de 0.1 seg. O  $PID_{LPA2v}$  pode ser considerado uma continuidade PID Híbrido apresentado em [43]. De modo a simplificar os ensaios, as entradas (degrau) e saídas estão em valores entre  $[0,1]$  conforme a  $LPA2v$ . Para situações reais, é necessário que as grandezas físicas trabalhadas sejam convertidas (normalizadas) para estes valores.

A figura 11 apresenta os resultados na saída do simulador. Pode-se observar que com controle em malha aberta (linha azul), o sistema leva cerca de 15 segundos para atingir a nova posição de *setpoint*. Conforme observado na figura, o sistema PID (linha vermelha), calibrado pelo método Ziegler–Nichols (ganhos  $K_P=1,674$ ;  $K_I=1,055$ ;  $K_D=0.230$ ) apresenta uma arrancada mais rápida, um leve sobressinal (*overshooting*) e estabilização cerca de 5 segundos antes do sistema de malha aberta. O controle por rede de células neurais artificiais paraconsistentes apresenta o mesmo arranque do PID, porém sem *overshooting* e atingindo o ponto de controle em cerca de 6 segundos. A figura 12 apresenta as saídas e contribuição de cada elemento do  $PID_{LPA2v}$ .

Figura 11 – Resultados simulados de Malha Aberta, Malha Fechada e Controle PID e PID<sub>LPA2v</sub>.

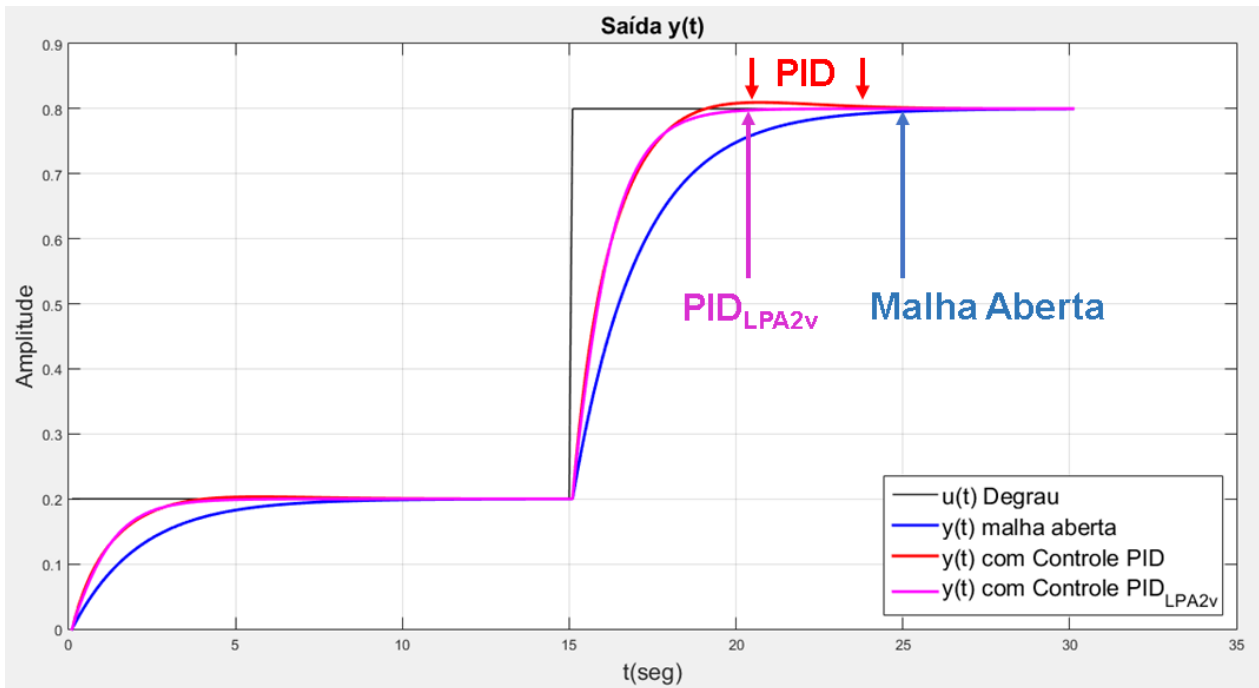
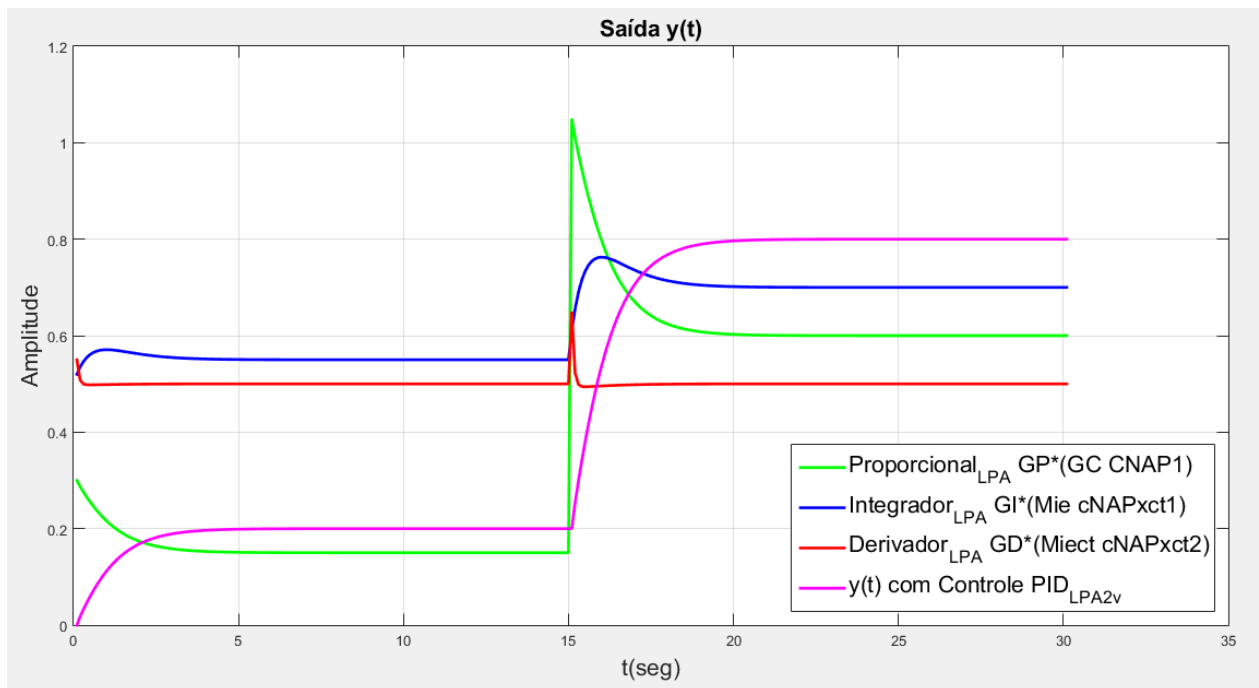


Figura 12 – Saídas Proporcional, Integral e Derivativa do PID<sub>LPA2v</sub>.





O sinal de erro é calculado pela cNAPp1 da figura 10 e aplicado um ganho (1,5x) em sua saída  $G_C$ , sendo o resultado a linha verde da figura 12. A função integrador é realizada pela cNAPxct1, como filtro passa baixa de primeira ordem, com fator de aprendizagem  $F_A$  igual a 0,2 e um ganho unitário (1x) aplicado a sua saída  $Mie$ , conforme a linha azul da figura. Já o derivador é realizado pela cNAPapxct2, atuando como filtro de primeira ordem,  $F_A$  igual a 0,8, porém com o sinal obtido da saída  $Miect$  e aplicado ganho também unitário, cujo sinal pode ser observado pela linha vermelha do gráfico. O resultado da soma dos 3 sinais mais uma correção de offset em razão das células somente operarem com valores entre 0 e 1 é apresentado pela linha magenta da figura.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os primeiros ensaios mostraram-se promissores e uma rede de células neurais artificiais paraconsistentes foi capaz de filtrar as medições de um sensor MEMS, conforme apresentado em [39] [40] [41].

Uma malha de controle composta por poucas células neurais atuando como gerador de sinal de erro, integrador e derivador apresentou resultados melhores que os do PID nas simulações em MATLAB para um processo simples de primeira ordem.

Espera-se que na continuidade desta pesquisa os objetivos sejam alcançados e uma rede neural artificial paraconsistente fundamentada na LPA2v, de forma inédita, implementada no núcleo do controlador de um sistema robótico apresente vantagens em relação aos sistemas atualmente utilizados, tanto na filtragem dos sinais dos sensores MEMS, quanto no efetivo controle e ainda com economia de recursos computacionais.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo uso de recursos e suporte técnicos oferecidos para esta pesquisa e a seus professores doutores Ronaldo Domingues Mansano, Bruno Augusto Angélico e João Francisco Justo Filho pelos seus ensinamentos e orientações.

### REFERÊNCIAS

[1] Ogata, K. Engenharia do Controle Moderno, Prentice-Hall, 5a edição, 2011.

- [2] Nof, Shimon Y. (editor). Handbook of Industrial Robotics, 2nd ed. John Wiley & Sons. 1378 pp. ISBN 0-471-17783-0, 1999.
- [3] Killingsworth, N. J.; Krstic, M. PID tuning using extremum seeking, IEEE Control Systems Magazine, pp. 70-79, Feb, 2006.
- [4] Bhuyan, A. I.; Mallick, T. C. "Gyro-accelerometer based control of a robotic Arm using AVR microcontroller," 2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST), Cox's Bazar, 2014, pp. 409-413.
- [5] Skogestad, S.; Postlethwaite, I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. John Wiley & Sons, Second Edition, 574 p, 2005.doi: 10.1109/IFOST.2014.6991151.
- [6] Kwon, S. J.; Yang, K. W.; Park, S. An effective kalman filter localization method for mobile robots. In Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006.
- [7] Valade, A.; Acco, P.; Grabolosa, P.; Fourniols, J-Y. A Study about Kalman Filters Applied to Embedded Sensors. Sensors, doi:10.3390/s17122810, 2017.
- [8] Julier, S. J.; Uhlmann, J. K. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems, Int. Symp. Aerospace/Defense Sensing Simul. and Controls 3, 1997.
- [9] Peri, V. M.; Simon, D. Fuzzy logic control for an autonomous robot, Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS 2005, Annual Meeting of the North American, pages 337- 342, 2005.
- [10] Gomide, F. A. C.; Gudwin, R. R. Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. Revista SBA Controle & Automação, Vol.4 n°3, setembro-outubro, páginas 97 – 115. 1994.
- [11] He, W.; Chen, W.; Yin, Z. Adaptive Neural Network Control of an Uncertain Robot with Full-State Constraints. IEEE Transactions on Cybernetics, vol. 46, no. 3, 620 p, 2016.
- [12] Dewi, T.; et al. Neural Network Controller Design for a Mobile Robot Navigation; a Case Study. Proc.EECSI 2017, Yogyakarta, Indonesia, 19-21 Sep, 2017.
- [13] Ma, J.; et al. Adaptive Neural Network Controller of an Intelligent Commode Robot for Trajectory Tracking. IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems, Beijing, China, pages 304 – 309, Oct, 2017.
- [14] Crenganis, M.; et al. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Kinematics Solutions of Redundant Robots. 6th International Conference on Computers Communications and Control (ICCCC)s, IEEE, pages 271 – 276, 2016.
- [15] Gupta, R. K.; Chauhan, S. Comparison of PID Controller & Adaptive Neuro Fuzzy Controller for Robot Manipulator. IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, 2015.
- [16] Pan, W.; et al. A Neuro-Fuzzy Visual Servoing Controller for an Articulated Manipulator. IEEE Access, pages 3346 – 3357, Vol 6, 2018.
- [17] Da Silva Filho, J. I. Treatment of Uncertainties with Algorithms of the Paraconsistent Annotated Logic. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, v. 4, pages 144-153, May, 2012.
- [18] Abe, J. M., org. Tópicos de Sistemas Inteligentes Baseados em Lógicas Não clássicas / Jair Minoro Abe, org. – São Paulo, Instituto de Estudos Avançados, WICS, 2016.



- [19] Da Costa, N. C. A.; Abe, J. M.; Murolo, A. C.; et al. *Lógica Paraconsistente Aplicada*. São Paulo: Atlas, ISBN 8524422184. 5, 1999.
- [20] Da Silva Filho, J. I., et al. *Paraconsistent Artificial Neural Network for structuring Statistical Process Control in Electrical Engineering. Towards Paraconsistent Engineering Book*, Springer International Publishing, pages 77-102, 2016.
- [21] Da Silva Filho, J. I.; Abe, J. M. *Fundamentos das redes neurais artificiais paraconsistentes - Destacando Aplicações em Neurocomputação*. São Paulo: Ed. Arte & Ciência, 291 p, 2001.
- [22] Da Silva Filho, J. I.; Abe, J. M.; Lambert-Torres, G. *Inteligência Artificial com as Redes de Análises Paraconsistentes*. 1a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 328 p, 2008.
- [23] Ajwad, S. A.; Baizid, K.; Iqbal, J. A comprehensive state-of-the-art on control of industrial articulated robots. *Journal of the Balkan Tribological Association* Vol. 20, No 4, pages 499–521, 2014.
- [24] Zarchan, P.; Musoff, H. *Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Incorporated. ISBN 978-1-56347-455-2, 2000.
- [25] Andreasen, M. M. Non-linear DSGE Models and The Central Difference Kalman Filter, *Journal of Applied Econometrics*, 28, pages 929-955, May, 2012.
- [26] Ankur, J.; Chang, E. Y. Adaptive sampling for sensor networks, 1st international workshop on data management for sensor network in conjunction with VLDB, USA, pages 10-16, 2004.
- [27] Terra, M. H. Inoue, R. S. Applications of Robust Descriptor Kalman Filter in Robotics. *Recent Advances and Applications*, Book edited by: Victor M. Moreno and Alberto Pigazo, 507-534 p, I-Tech, Vienna, Austria, 2009.
- [28] Valade, A.; Acco, P.; Grabolosa, P.; Fourniols, J-Y. A Study about Kalman Filters Applied to Embedded Sensors. *Sensors*, doi:10.3390/s17122810, 2017.
- [29] Wakileh, B. A. M.; Gill, K. F. Use of Fuzzy Logic in Robotics, *Computers in Industry*, Vol 10, Issue 1, 35-46pp, Elsevier, 1988.
- [30] Russo, F. Fuzzy Filtering; of Noisy Sensor Data. *Technology Conference Brussels, Belgium*, 1281-1285 p, June 4-6, 1996.
- [31] Trusca, M.; Lazea, G. Neural network enhancement of closed-loop controllers for nonlinear systems, *IEEE Advanced Motion Control - AMC 2002 - Maribor, Slovenia*, pages 291 – 295, 2002.
- [32] Lin, J.; Lian, R-J. Hybrid fuzzy-logic and neural-network controller for MIMO systems. *Mechatronics* 19, Elsevier, pages 972 – 986, 2009.
- [33] Callister, W. D.; Rethwisch, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Introdução*. Tradução Sérgio Soares. Revisão Técnica José Roberto d’Almeida, LTC editora. 8ª edição, 2013.
- [34] Shaeffer, D. K. "MEMS inertial sensors: A tutorial overview," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 4, pp. 100-109, April 2013. doi: 10.1109/MCOM.2013.6495768

- [35] Brigham Young University Compliant Mechanisms Research. Introduction to Microelectromechanical Systems (MEMS). Disponível em: <https://compliantmechanisms.byu.edu/content/introduction-microelectromechanical-systems-mems>.
- [36] IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros," in IEEE Std 1431-2004, vol., no., pp.1-78, Dec. 20 2004. doi: 10.1109/IEEESTD.2004.95744
- [37] Burg, A.; Meruani, A.; Sandheinrich, B.; Wickmann, M. MEMS Gyroscopes and their applications. Introduction to Microelectromechanical system. Northwestern University. Disponível em: <http://clifton.mech.northwestern.edu/~me381/project/done/Gyroscope.pdf>.
- [38] Laboratório de Controle Aplicado POLI-USP, disponível em: <http://sites.usp.br/lca/>.
- [39] Carvalho Junior, A.; Da Silva Filho, J. I.; Mario, M. C. A Study of Paraconsistent Artificial Neural Cell of Learning Applied as PAL2v Filter. IEEE Latin America Transactions, Vol. 16, No. 1, pages 196 – 203, Jan 2018.
- [40] Carvalho Junior, A.; Da Silva Filho, J. I.; Mario, M. C. Estimador de Estado Adaptativo Paraconsistente. Exatas Online, ISSN 2178-0471, vol. 9 Mar. 2018, pág. 25-30. Disponível em: [http://www2.uesb.br/exatasonline/images/V9NE\\_WMO\\_pag25-30.pdf](http://www2.uesb.br/exatasonline/images/V9NE_WMO_pag25-30.pdf).
- [41] Carvalho Junior, A.; Da Silva Filho, J. I.; Mario, M. C. Suavização de Ruído de Sinal Analógico com Filtro LPA2v em Microcontrolador. 8º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP, 2017. Disponível em: <http://ocs.ifsp.edu.br/index.php/conict/8cic/paper/view/3092/329>.
- [42] Carvalho Junior, A.; et al. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020170158063, título: "FILTRO PARACONSISTENTE DE SINAIS ANALÓGICOS", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial, Depósito: 24/07/2017. Instituição financiadora: Unisanta - Universidade Santa Cecília. Publicação da Patente na revista RPI do INPI, número 2515, pag. 318, de 19/03/2019, link: <http://revistas.inpi.gov.br/pdf/Patentes2515.pdf>.
- [43] Coelho, M. S.; et al. Hybrid PI controller constructed with paraconsistent annotated logic. Control Engineering Practice, Volume 84, 2019, Pages 112-124, ISSN 0967-0661, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.11.007>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066118306932>)