



CONTROLADOR NEBULOSO DE UM DISPOSITIVO VESTÍVEL DO TIPO COLETE PARA ATIVIDADES OPERACIONAIS EM CAMPO

FUZZY CONTROLLER OF VEST TYPE WEARABLE DEVICE FOR FIELD OPERATIONAL ACTIVITIES

Ricardo Ribeiro | ricardo.reno@uol.com.br

Filipe Wiltgen | profwiltgen@gmail.com

RESUMO

Atividades operacionais em campo ou ambientes de risco tornam a execução e a coordenação das ações bastante complexas. A fim de auxiliar as atividades em situações extremas foi proposto e desenvolvido o protótipo do colete sensorizado com tecnologia embarcada e vestível que permite ao usuário manter sua atenção na atividade principal, deixando a cargo de um assistente eletrônico vestível monitorar as variáveis importantes do ambiente em tempo real, interpretando e disponibilizando estas informações ao usuário, durante toda a operação. De tal forma que se houver perigo iminente o usuário possa ser alertado. O protótipo do colete sensorizado é um dispositivo vestível composto por um sistema de controle autônomo, com recurso de lógica nebulosa (LN) operado em um microcontrolador com múltiplos sensores, aliado a um sistema de comunicação remota, transmissão e gerenciamento de energia destinados a aplicações em ambiente civil ou militar. Quando em operação o colete captura dados de mudanças no ambiente ou no usuário de forma que estas informações são disponibilizadas para o mesmo e/ou para uma base operacional. O dispositivo deve ser capaz de simular um tipo de assistente pessoal artificial embarcado na forma de tecnologia vestível o dispositivo deve ser interpretado como uma máquina vestível, permitindo elevada capacidade de interação entre o equipamento e o usuário. No decorrer deste artigo tem-se a abordagem do controlador nebuloso embarcado com destaque a integração de dispositivos eletrônicos para o uso profissional em campo.

Palavras-chave: Sensores. Controle. Lógica Nebulosa. Tecnologia Vestível.
Engenharia de Sistemas & Requisitos.

ABSTRACT

Operational activities in field or risk environments make execution and coordination of actions quite complex. In order to assist activities in extreme situations, a sensorized vest prototype with embedded and wearable technology was proposed and developed, which allows user to keep their attention on main activity, leaving it to a wearable electronic assistant to monitor important variables of environment in time real, interpreting and making this information available to user, throughout operation. In such a way that if there is imminent danger user can be alerted. The sensorized vest prototype is a wearable device composed of an autonomous control system, with Fuzzy Logic (FL) feature, operated on a microcontroller with multiple sensors, combined with a remote communication, transmission and energy management system for applications in civilian or military environment. When in operation, vest captures data on changes in environment or user so that this information is made available to user and/or to an operational base. The device must be capable

of simulating a type of artificial personal assistant embedded in form of wearable technology. The device must be interpreted as a wearable machine, allowing a high capacity for interaction between the equipment and user. Throughout this paper, approach embedded fuzzy controller is highlighted, with emphasis on integration of electronic devices for professional use field.

Keywords: Sensors. Control. Fuzzy Logic. Wearable Technology. Systems & Requirements Engineering.

INTRODUÇÃO

O termo dispositivo vestível refere-se a toda tecnologia eletrônica embarcada ou computacional incorporada diretamente em peças do vestuário, ou mesmo, nos acessórios utilizados por um indivíduo (RHODES, 1997).

Esses dispositivos podem ser utilizados confortavelmente no dia a dia, assim como, ficar em contato direto com a superfície do corpo humano. Possuem a capacidade de executar tarefas semelhantes à de um computador, porém com a capacidade de controle com a utilização de sensores e atuadores para a análise do ambiente e outras ações em tempo real (METHAB e ABDULRAHMAN, 2018).

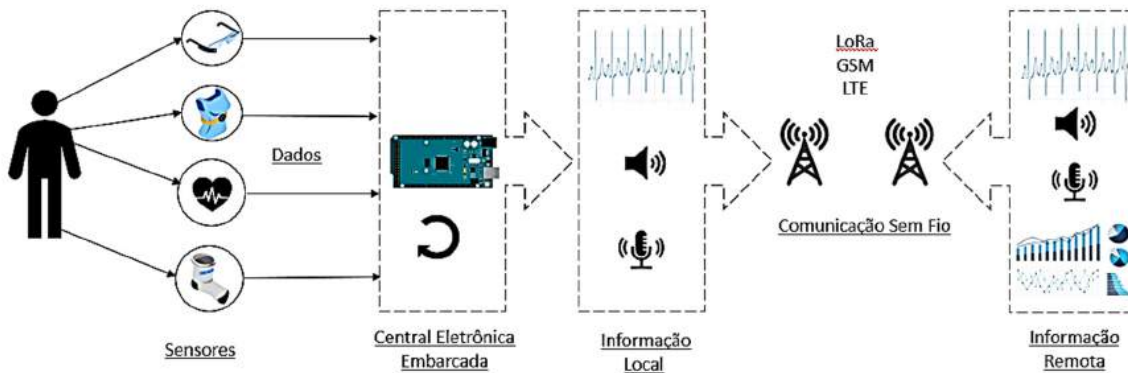
Estas análises podem ser realizadas pelos controladores eletrônicos (microcontroladores) existentes nos dispositivos, ou mesmo serem enviadas para análise remotavia comunicação móvel a distância através de protocolos específicos e dedicados as operações remotas (LIU, 2016; NGUYEN-HUU *et al.*, 2018; ISLAM *et al.*, 2020; TANG, 2007).

Em muitos casos as tecnologias embarcadas possuem a capacidade de sensoriamento e rastreamento de variáveis biológicas e fisiológicas multiplicando a capacidade e a percepção humana, incorporando uma forma de consciência artificial em sua funcionalidade com o propósito de alertar e/ou avisar o seu usuário quando houver mudanças do ambiente ao seu redor (PASCOE, 1998; GU *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2015). Na Figura 1 é possível notar uma representação genérica de dispositivos vestíveis.

Atualmente as evoluções no desenvolvimento de aplicações em dispositivos vestíveis nas áreas operacionais podem ser classificadas em dois grupos distintos (SVERTOKA *et al.*, 2020): o grupo de Coleta de Dados (dispositivos sensores destinados a aquisição de dados das mais variadas fontes), e outro grupo destinado a Transmissão de Dados (transmissões sem fio, permitindo a integração a longa distância com o uso de protocolos de comunicações).

No grupo denominado Coleta de Dados os desenvolvimentos operacionais estão apoiados nos arranjos de sensores conectados em uma central de que atua nos subgrupos de sensores destinados a aquisição de parâmetros ambientais e outro subgrupo destinado ao monitoramento de dados fisiológicos do agente de campo (DOLEZ *et al.*, 2020; ISLAM *et al.*, 2020).

Figura 1 - Representação genérica de dispositivos vestíveis.



Fonte: Próprios Autores (2022).

O subgrupo de sensores fisiológicos ou biosensores estão divididos nos diversos sensores destinados as medidas de parâmetros biológicos básicos, tais como: pressão arterial, temperatura corporal, nível de oxigenação sanguínea e batimento cardíaco. Estes são grupos de dispositivos sensores amplamente utilizados e considerados de baixo custo (DEHGHANI e KIM, 2019; CHOI *et al.*, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2018; MARDONOVA e CHOI, 2018; AL-FUQAHA *et al.*, 2015; ATZORI *et al.*, 2010; LIU e SUN, 2016).

Este projeto tem por base a aplicação das técnicas de Engenharia de Sistemas & Requisitos (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021) cujo propósito é a elaboração de uma sistemática de desenvolvimento de projetos e no uso de técnicas específicas que auxiliam os projetistas a explorarem as fases de testes de desenvolvimento do tipo (RDT&E - Research, Development, Test, and Evaluation) estão definidas no domínio da solução, em sua clássica divisão, com os testes em ambiente controlado (DT&E - Developmental Test & Evaluation) e os testes operacionais em ambiente relevante (OT&E - Operational Test & Evaluation) definindo a análise crítica para verificar o nível de maturidade tecnologia (TRL - Technology Readiness Level).

O COLETE MULTISENSORIZADO

O colete sensorizado está baseado no microcontrolador ATMEGA 2560 na plataforma Arduino Mega. A plataforma Arduino por ter dimensões e pesos reduzidos não é um limitante para o movimento do usuário, permitindo armazenar com facilidade o microcontrolador no interior do colete. Para atender as necessidades do projeto com um sistema estruturado foi definido a utilização de dois microcontroladores (Arduino Mega operando na configuração mestre/escravo (RIBEIRO e WILTGEN, 2021A).

O microcontrolador, no modo escravo é dedicado aos sensores, com os seus sinais de entrada com interface de iteração e a função armazenamento de dados de emergência (caixa preta). O microcontrolador mestre é dedicado ao controle de todo o sistema com os gerenciamentos de energia no modo autônomo, fluxo de dados e de comunicação a longa distância (RIBEIRO e WILTGEN, 2021B; RIBEIRO e WILTGEN, 2021C; RIBEIRO e

WILTGEN, 2023). Na Figura 2 pode ser vista a distribuição de alguns sensores integrados ao colete em testes.

Figura 2 - Sensores distribuídos no colete para atividades operacionais.



Fonte: Próprios Autores (2022).

Funcionalidades previstas para o colete:

- Posicionamento: Bússola Digital; GPS; Inclinaçãometro; Acelerômetro;
- Gases: Dióxido de Carbono; Monóxido de Carbono; Oxigênio e GLP;
- Comunicação: Microfone; Auto-Falante e Painel (Display Oled);
- Ambiental: Temperatura; Umidade; Luminosidade e Ultrassônico;
- Fisiológico: Batimento Cardíaco e Temperatura Corporal;
- Sistemas de Comunicação: SMS; GPRS e LoRa;
- Apoio: Iluminação Flash (SOS) e Infravermelho;
- Energia Elétrica: Bateria Recarregáveis, Painel Fotovoltaico e Gerador Termoelétrico Seeback;
- Térmicos: Resfriadores Peltier.

No controlador existe a atuação do firmware dedicado ao gerenciamento de energia do sistema autônomo. Este é projetado e programado em lógica nebulosa para informar ao usuário os cuidados necessários para cada cenário.

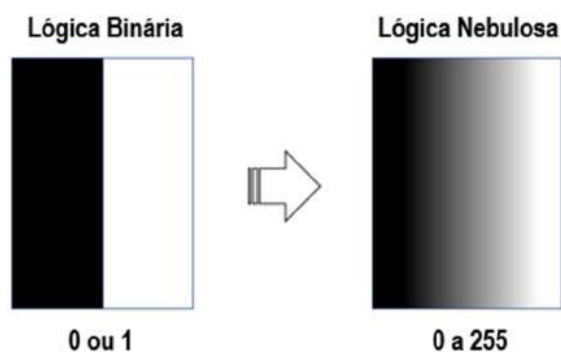
ATÉCNICA DE LÓGICA NEBULOSA E CONTROLADORES NEBULOSOS

Os recursos em inteligência artificial (IA) dedicadas as ações de controle do colete sensorizado estão baseadas no uso e aplicação das técnicas de lógica nebulosa (LN). O conceito da LN prevê o modelamento difuso ao invés do modelamento preciso. Na lógica tradicional, lógica binária (LB), as representações físicas do mundo são discretizadas em certo ou errado, verdadeiro (1) ou falso (0). O que é uma aproximação ruim do ambiente real.

Uma representação com mais níveis, por exemplo tons de cinza (256) aproxima-se melhor da representação do ambiente real. Níveis intermediários descritos em funções matemáticas que descrevem expressões de contexto podem facilmente modelar com boa aproximação os eventos no mundo real (0 a 255 do branco ao preto, com diferentes tonalidades possíveis de cinza) (SHAWN, 2007).

Uma representação gráfica simples, mostrando o conceito que expressa as diferenças entre a LB e a LN pode ser visto na Figura 3. Na LN os valores intermediários também são representativos dentro do universo de possibilidades. Esses valores podem assumir qualquer valor, inclusive os extremos que perfazem a LB (branco e preto).

Figura 3 - Comparativo entre a Lógica Binária (0 ou 1) e a Lógica Nebulosa (0 a 255).



Fonte: Próprios Autores (2022).

As variáveis envolvidas em uma lógica de controle em aplicações reais, podem ser melhor representadas se houverem graus de liberdade para a transição de um limite ao outro. Por exemplo um tanque pode estar “completo”, “quase completo”, “meio completo”, “quase vazio”, “parcialmente vazio” e “vazio”. Essa liberdade de transição permite que um sistema de controle possa ser parametrizado de maneira a ter regras de transição, oferecendo graus de pertinência para a tomada de decisão, tornando o controle de um sistema mais assertivo em conformidade com a realidade. Os limites de pertinência via de elaboração de regras, permitem expressar valores imprecisos ou nebulosos em informação. A capacidade de controlar os níveis de energia do sistema em função dos riscos envolvidos pela análise dos dados de um cenário real e de risco é parte fundamental para manter a autonomia do dispositivo em situações críticas.

Os sensores do colete permitem que o sistema tenha essa capacidade de controle e possa sozinho tomar decisões autônomas no gerenciamento de energia, dentro de um cenário estabelecido pelas regras de parametrização dentro do conceito da LN. Outro fator determinante é a definição de regras para o grau de pertinência estabelecido ao conjunto de variáveis que atendem as necessidades do projeto. O grau de pertinência permite uma representação de parâmetros imprecisos como os relacionados por exemplo a temperatura, tornando-se fundamental para o atendimento as regras de pertinência.

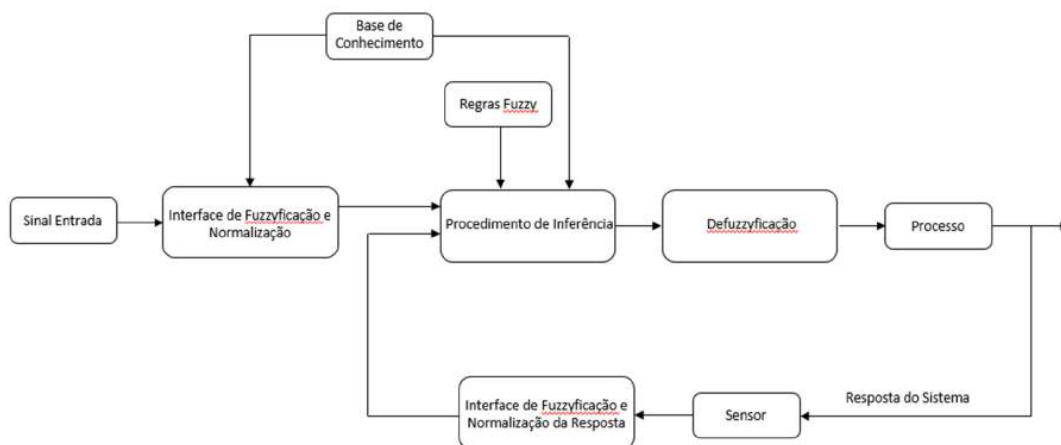
Os sistemas de controle são baseados em sinais de entrada oriundos de diversos dispositivos físicos, sensores, processados por um dispositivo lógico parametrizado com as características de

controle desejadas e disponibiliza em sua saída um sinal que permite atuar e modificar outro sistema físico. Os controladores podem ser do tipo malha aberta, sem o retorno da informação de saída na entrada do sistema de controle, ou podem ser de malha fechada, tendo o sinal de saída retornando a entrada para a estimativa de erro e melhor ajuste do sistema de controle.

Em sistemas de controle clássico é necessário descrever matematicamente, todas as relações entre as variáveis de entrada e de saída de maneira a ter uma função de transferência característica que possa descrever o sistema físico, permitindo assim, realizar o modelamento de controle de forma precisa. Em sistemas de controle nebulosos o modelamento é baseado em conhecimento heurístico possibilitando desta forma sua utilização em dinâmicas de controle não-linear e sem uma função de transferência matemática bem definida (NASCIMENTO JR. e YONEYAMA, 2020). Os controladores nebulosos são baseados em regras estabelecidas pelo conhecimento baseado em experiência humana. A lógica das variáveis é definida por uma série de regras definidas no contexto (SE-ENTÃO), e todos os parâmetros utilizados no controlador nebuloso são definidos em conjuntos e funções de pertinência.

No projeto de um controlador nebuloso é esperado que o sistema a ser controlado tenha características observáveis e controláveis, que haja conhecimento por parte do projetista das possíveis reações do sistema mediante as determinadas entradas e regras bem estabelecidas, ou seja, que possa existir uma resposta adequada e razoável para cada entrada estabelecida. O sistema deve permitir regras de estabilidade em um espaço aceitável para a precisão da resposta. Na Figura 4 observa-se a estrutura de um controlador nebuloso.

Figura 4 - Representação de um Controlador Nebuloso.



Fonte: Próprios Autores (2022).

O controlador nebuloso é uma malha fechada normalizada para estabelecer os valores das entradas e das saídas em um escalonamento dentro do universo de discurso, tornando-os assim nebulosos. Os valores recebidos são *fuzzyficados*, transformando-os os números pertencentes a conjuntos nebulosos, de modo a tornar-se instâncias de variáveis linguísticas. A base de conhecimento consiste em regras que caracterizam uma estratégia de controle e suas metas. O procedimento de inferência está relacionado ao processamento dos dados nebulosos de acordo com os operadores de implicação e as regras de inferência.

A etapa de *defuzzyficação* transforma as variáveis nebulosas em variáveis de controle que irão fisicamente atuar no processo, voltando a executar um escalonamento das variáveis nebulosas no universo de discurso para o universo das variáveis reais da aplicação no mundo real. Os métodos mais utilizados para executar a transformação de variáveis é a aplicação do critério do máximo ou do centroide (centro de massa) da área.

O controlador, aplicado ao colete sensorizado para o gerenciamento de energia utiliza como variáveis de entrada a tensão elétrica da bateria de alimentação do sistema e a corrente elétrica consumida pelos grupos sensores e pelo sistema comunicação sem fio para as diversas necessidades de aplicação em campo.

O objetivo é ser capaz de informar em tempo real, via um painel, o nível de carga da bateria e a sua provável autonomia em operacional. Desta forma, auxiliando o usuário do colete a decisão, em horas de disponibilidade de uso do equipamento, mediante os diversos cenários envolvidos em diversas operações.

As condições de contorno que servirão de base para o controlador serão:

- *Tensão de alimentação do sistema* proveniente de uma bateria de 9Vcc;
- Limite Operacional de Tensão estabelecido no intervalo de 7 a 9Vcc;
- Limite Operacional de Corrente oscilando no intervalo de 50mA a 220mA.

A variáveis linguísticas estabelecidas para as entradas de tensão e corrente elétrica e a de saída para o modelamento tanto dos controladores de *Mamdani* como o de *Takashi Sugeno*, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Representação das variáveis linguísticas para o os Controladores Nebulosos.

Tensão da Bateria (Vcc)	Corrente GrupoSensor (mA)	Disponibilidade Energética(H)
Inaceitável	Mínimo	(E) Retornar Base
Crítico	Baixo	(D) Atenção
Baixo	Intermediário	(C) Baixo
Médio	Avançado	(B) Intermediário
Completa	Plena Atividade	(A) Atividade Plena

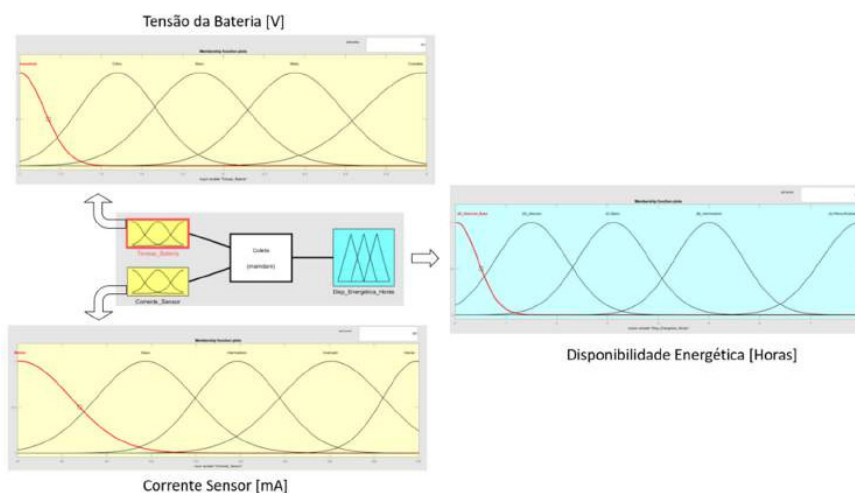
Fonte: Próprios Autores (2022).

As funções de transferência aplicadas foram gaussianas para as entradas e saídas, definidas no mesmo intervalo e com o mesmo ponto de inflexão das curvas, isso vale tanto parao modelo do tipo *Mamdani* quanto do tipo *Sugeno*, no qual os intervalos das variáveis estão compreendidos nas seguintes faixas operacionais:

- Tensão da Bateria: 7 à 9Vcc;
- Corrente Sensor: 40 à 220mA;
- Disponibilidade Energética: 0 à 8 horas.

O Modelamento do controlador do tipo Mamdani foi configurado para as seguintes entradas e saídas conforme pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Representação das funções de pertinência gaussianas para as entradas (tensão e corrente) e saída (horas) em um controlador nebuloso do tipo Mamdani.

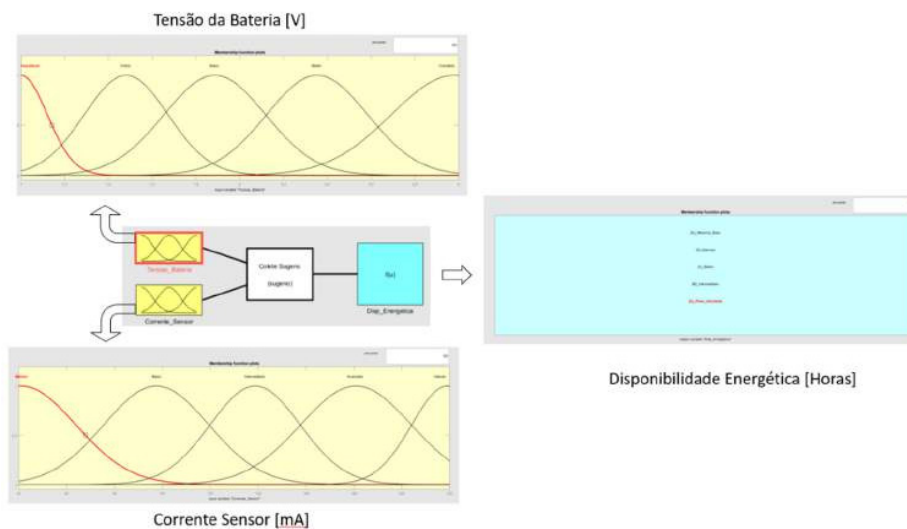


Fonte: Próprios Autores (2022).

No modelo Takashi Sugeno as entradas foram as mesmas, porém na saída deste tipo de controlador tem se a possibilidade de usar uma função linear relacionada as variáveis de entrada ou optar por uma saída constante, neste artigo optou se pela saída constante, como pode ser visto na Figura 6.

As regras de inferência para ambos os controladores foram as mesmas. Ao todo foram definidas 25 regras com todas as combinações de ações possíveis para este sistema de controle, como pode ser observado na lista de regras na Figura 7.

Figura 6 - Representação das funções de pertinência gaussianas para as entradas (tensão e corrente) e saída (horas) em um controlador nebuloso do tipo Takashi Sugeno.



Fonte: Próprios Autores (2022).

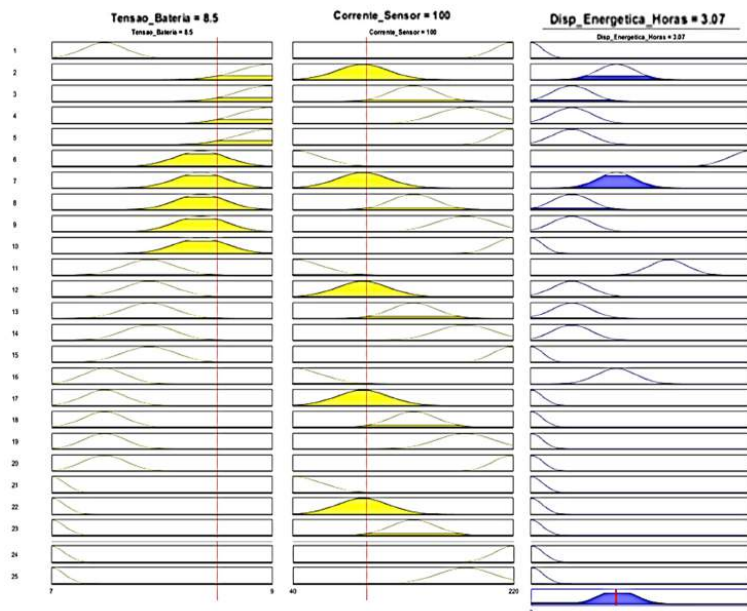
Figura 7 - Regras de inferência para os controladores nebulosos do tipo Mamdani e do tipo Takashi Sugeno para o coleta sensorizado.

1. If (Tensao_Bateria is Critico) and (Corrente_Sensor is Intenso) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)
2. If (Tensao_Bateria is Completa) and (Corrente_Sensor is Baixo) then (Disp_Energetica_Horas is (C) Baixo) (1)
3. If (Tensao_Bateria is Completa) and (Corrente_Sensor is Intermediario) then (Disp_Energetica_Horas is (D) Atencao) (1)
4. If (Tensao_Bateria is Completa) and (Corrente_Sensor is Avancado) then (Disp_Energetica_Horas is (D) Atencao) (1)
5. If (Tensao_Bateria is Completa) and (Corrente_Sensor is Intenso) then (Disp_Energetica_Horas is (D) Atencao) (1)
6. If (Tensao_Bateria is Medio) and (Corrente_Sensor is Minimo) then (Disp_Energetica_Horas is (A) Plena_Atividade) (1)
7. If (Tensao_Bateria is Medio) and (Corrente_Sensor is Baixo) then (Disp_Energetica_Horas is (C) Baixo) (1)
8. If (Tensao_Bateria is Medio) and (Corrente_Sensor is Intermediario) then (Disp_Energetica_Horas is (D) Atencao) (1)
9. If (Tensao_Bateria is Medio) and (Corrente_Sensor is Avancado) then (Disp_Energetica_Horas is (D) Atencao) (1)
10. If (Tensao_Bateria is Medio) and (Corrente_Sensor is Intenso) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)
11. If (Tensao_Bateria is Baixo) and (Corrente_Sensor is Minimo) then (Disp_Energetica_Horas is (B) Intermediario) (1)
12. If (Tensao_Bateria is Baixo) and (Corrente_Sensor is Baixo) then (Disp_Energetica_Horas is (D) Atencao) (1)
13. If (Tensao_Bateria is Baixo) and (Corrente_Sensor is Intermediario) then (Disp_Energetica_Horas is (D) Atencao) (1)
14. If (Tensao_Bateria is Baixo) and (Corrente_Sensor is Avancado) then (Disp_Energetica_Horas is (D) Atencao) (1)
15. If (Tensao_Bateria is Baixo) and (Corrente_Sensor is Intenso) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)
16. If (Tensao_Bateria is Critico) and (Corrente_Sensor is Minimo) then (Disp_Energetica_Horas is (C) Baixo) (1)
17. If (Tensao_Bateria is Critico) and (Corrente_Sensor is Baixo) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)
18. If (Tensao_Bateria is Critico) and (Corrente_Sensor is Intermediario) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)
19. If (Tensao_Bateria is Critico) and (Corrente_Sensor is Avancado) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)
20. If (Tensao_Bateria is Critico) and (Corrente_Sensor is Intenso) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)
21. If (Tensao_Bateria is Inaceitavel) and (Corrente_Sensor is Minimo) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)
22. If (Tensao_Bateria is Inaceitavel) and (Corrente_Sensor is Baixo) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)
23. If (Tensao_Bateria is Inaceitavel) and (Corrente_Sensor is Intermediario) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)
24. If (Tensao_Bateria is Inaceitavel) and (Corrente_Sensor is Intenso) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)
25. If (Tensao_Bateria is Inaceitavel) and (Corrente_Sensor is Avancado) then (Disp_Energetica_Horas is (E) Retomar_Base) (1)

Fonte: Próprios Autores (2022).

Resultado do modelamento de Mamdani, para uma tensão de alimentação de $\sim 8,5\text{Vcc}$ e uma corrente do grupo sensor de $\sim 100\text{mA}$, implica em uma disponibilidade de operação é de ~ 3 horas, conforme saída da simulação na Figura 8.

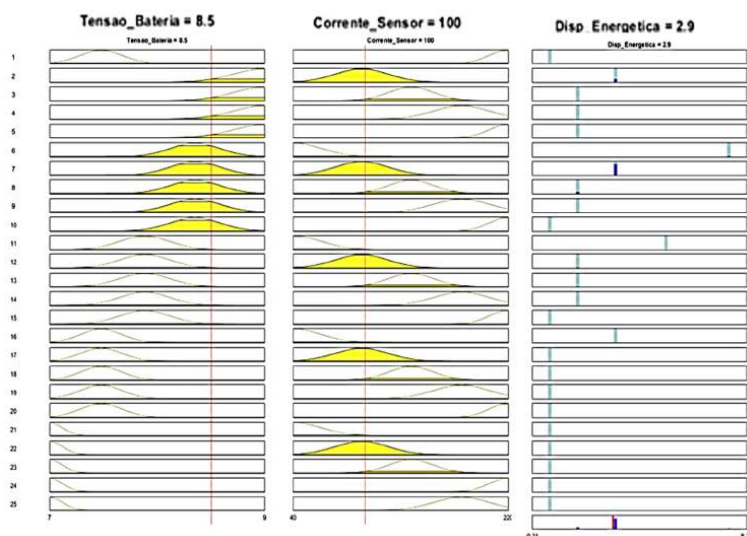
Figura 8 - Resultado do controlador nebuloso do tipo Mamdani.



Fonte: Próprios Autores (2022).

A resposta do controlador Takashi Sugeno, para as mesmas tensões e correntes elétricas implicou em uma disponibilidade de operação de ~ 3 horas, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Resultado do controlador nebuloso do tipo Takashi Sugeno.

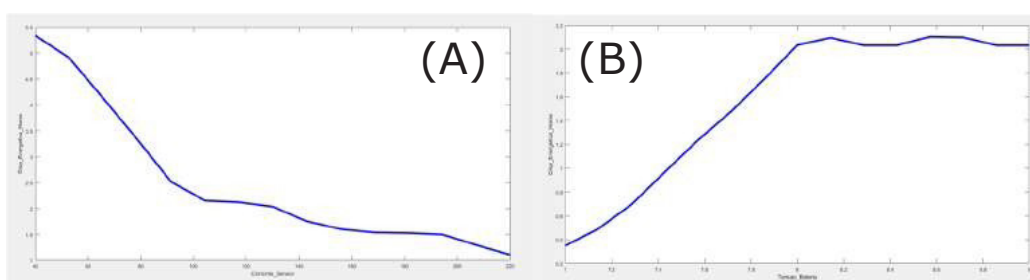


Fonte: Próprios Autores (2022).

As curvas de disponibilidade de energia em função da tensão e corrente elétrica, no controlador do tipo Mamdani, mostram a tendência de resposta do colete para as diversas situações de uso em campo, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – (A) Disponibilidade de energia em corrente elétrica na carga e (B)

Disponibilidade de energia em tensão elétrica na carga para um controlador nebuloso do tipo Mamdani.

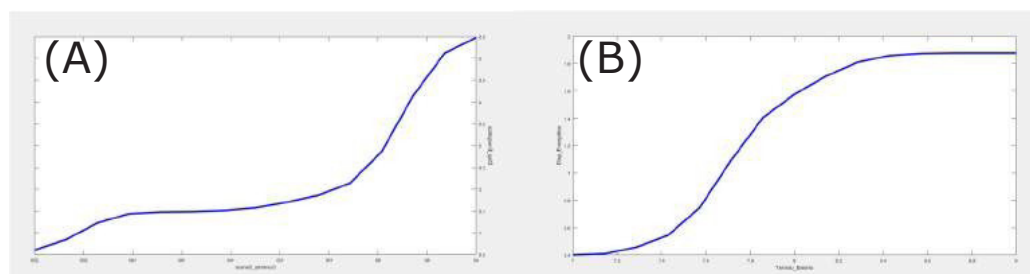


Fonte: Próprios Autores (2022).

As respostas para a disponibilidade energética no controlador do tipo Takashi Sugeno em função das variáveis tensão e corrente elétricas para o colete pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - (A) Disponibilidade de energia em corrente elétrica na carga e (B)

Disponibilidade de energia em tensão elétrica na carga em um controlador nebuloso do tipo Takashi Sugeno.

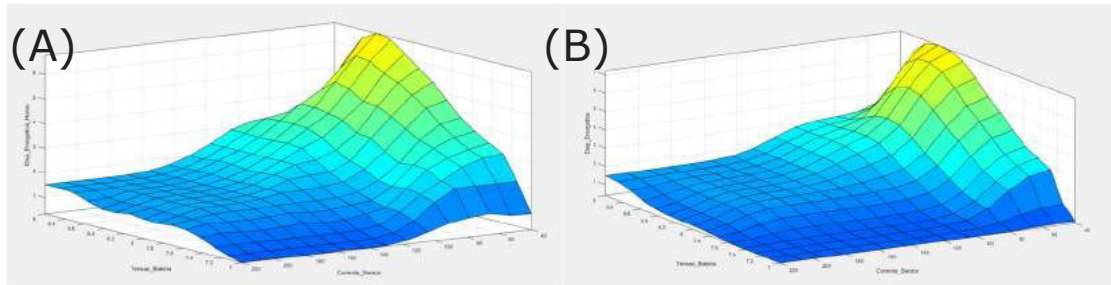


Fonte: Próprios Autores (2022).

Outra forma visual comparativa entre os controladores Mamdani e Sugeno para os limites operacionais impostos ao modelo pode ser observada pelo gráfico de superfície, englobando as variáveis

de entrada tensão, corrente e a disponibilidade energética, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Superfície de controle em um controlador nebuloso do tipo Mamdani (A) e do tipo Takashi Sugeno (B).



Fonte: Próprios Autores (2022).

DISCUSSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

O desenvolvimento do colete sensorizado executou a fase de teste individuais (FTI – Fase de Testes Individuais) e atualmente está na fase de teste coletivos integrados (FTC – Fase de Testes Coletivos) em ambiente controlado (*DT&E*), em laboratório.

Uma rotina de testes de desenvolvimento estabelecida para cada componente sensor do colete permite que os resultados, individuais, possam ser comparados com as curvas estabelecidas pelo fabricante referente os parâmetros de aprovação para cada componente (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021).

A proposta de um controlador nebuloso para a gestão de recursos energéticos do colete sensorizado apresentou resultados importantes para a escolha do tipo de controlador a ser agregado no *firmware* em programação estruturada na placa do Arduino Mega principal de controle.

O comportamento dos controladores do tipo *Mamdani* e do tipo *Takashi Sugeno* forneceram resultados muito próximos um do outro. Nas Figuras 10, 11 e 12 é possível observar a semelhança nas respostas em ambos os controladores, principalmente para uma corrente elétrica de $\sim 100\text{mA}$ e uma tensão elétrica de $\sim 8,5\text{Vcc}$.

O controlador do tipo *Mamdani* apresentou uma disponibilidade de energia estimada em ~ 3 horas e o controlador do tipo *Takashi Sugeno* o resultado foi de $\sim 2,9$ horas, o fato confirma a boa aproximação existente entre os dois tipos de controladores nebulosos nesse estudo.

Outra informação importante são os limites estáveis de tensão elétrica que no controlador do tipo *Mamdani* ficou entre ~ 8 à $\sim 9V_{cc}$, e para o controlador do tipo *Takashi Sugeno* ficou entre $\sim 8,5$ à $\sim 9V_{cc}$. A partir destes limites inferiores, a queda de tensão elétrica aumenta com o tempo de utilização. Observa-se uma queda acentuada da tensão elétrica a partir das duas últimas horas de uso. Quanto à corrente elétrica é possível observar que a melhor resposta do sistema está na faixa entre ~ 100 à $\sim 160mA$ em ambos controladores nebulosos.

Nas curvas de superfície de controle (Figura 12), nota-se uma suavidade maior nas respostas do controlador do tipo *Takashi Sugeno* em relação ao controlador do tipo *Mamdani*. Para a aplicação no colete sensorizado o controlador do tipo *Takashi Sugeno* é mais vantajoso em relação ao controlador do tipo *Mamdani* com a vantagem de exigir menos recursos de processamento, pois os controladores do tipo *Takashi Sugeno* não necessitam da etapa de *defuzzyficação*, tornando o *firmware* mais “leve”, e assim, mais fácil de ser implementado em um controlador *ATMega 2560* da família Arduino, possibilitando maior espaço em memória e menor tempo de execução.

Espera-se em breve que o primeiro protótipo físico real do dispositivo eletrônico vestível esteja pronto para testes em laboratório com todos os recursos implementados.

Em um breve futuro é possível que dispositivos similares possam integrar as forças militares e civis na realização segura de tarefas operacionais que envolvem riscos, auxiliando e fornecendo subsídios aos usuários para tomadas decisões eficazes e importantes durante a execução destas tarefas em campo.

REFERÊNCIAS

- AL-FUQAHA A., GUIZANI M., MOHAMMADI, ALEDHARI M., AYYASH M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**. v.17(04), p.2347–2376, 2015.
- ATZORI, L., IERA, A., MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**. v.54(15), p.2787–2805, 2010.
- CHEN, S.T., LIN S.S., LAN W., HSU Y.H. Design and Development of a Wearable Device for Heat Stroke Detection. **Sensors**. v. 18(01), p 10-11, 2018.
- CHOI, B., HWANG, S., LEE, S.H. What Drives Construction Workers Acceptance of Wearable Technologies in Workplace: Indoor localization and Wearable Health Devices for Occupational Safety and Health. **Automation in Construction**. v.84, p.31–41, 2017.
- DEHGHANI, M., KIM, K.J. Past and Present Research on Wearable Technologies: Bibliometric and Cluster Analyses of Published Research from 2000 to 2016. **International Journal of Innovation and Technology Management**. v.16(01), p.1–21, 2019.
- DOLEZ, P.I., DECAENS J., BUNS T. Applications of Smart Textiles in Occupational Health and Safety. **IOP Conference Series Materials Science and Engineering**. v.827(01), p.1–9, 2020.
- ISLAM, G.M., ALI A., COLLIE S. Textile Sensors for Wearable Applications: A Comprehensive Review. **Cellulose**. v.27(11), p.6103–6131, 2020.
- NASCIMENTO JR., C., YONEYAMA, T. Inteligência Artificial em Controle e Automação. **Blucher**, 2020. 77- 87p.
- LIU, J., SUN, W. Smart Attacks against Intelligent Wearables in People-Centric Internet of Things. **IEEE Communications Magazine**. v.54(12), p.44–49, 2016.
- LIU, X., VEGA K., MAES P., PARADISO A. J. Wearability Factors for Skin Interfaces. **ACM International Conference Proceeding Series**, Genebra, Suíça, 25 a 27 fevereiro, v.1, p.3-8, 2016.
- MARDONOVA, M., CHOI, Y. Review Of Wearable Device Technology and Its Application to the Mining Industry. **Energies**. v.11(03), p.547, 2018.
- NGUYEN-HUU, K., SONG, C.L. LEE, S.W. Smartwatch/Smartphone Cooperative Indoor Lifelogging System. **International Journal of Engineering and Technology Innovation**. v.8(04), p.261–273, 2018.
- PASCOE, J. Adding Generic Contextual Capabilities To Wearable Computers. **Second International Symposium on Wearable Computer IEEE Computer Society**, Pittsburgh, PA, USA, 19-20 October, v.1(01), p.92–99, 1998.
- RHODES, B.J. The Wearable Remembrance Agent: A System for Augmented Memory. **Personal Technologies**. v.1(04), p.218–224, 1997.
- RIBEIRO, R., WILTGEN, F. Desenvolvimento de Colete com Sensores Embarcados para Aplicação Civil e Militar. **ITA SIGE XXIII, Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa**, São José dos Campos, 28 e 29 de setembro, p.1-5, 2021A.
- RIBEIRO, R., WILTGEN, F. Colete Autônomo com Sensores Embarcados Para Operações em Campo. **UFABC, Workshop Engenharia Mecânica, WEM 2021**, Universidade Federal ABC, 27 a 29 setembro, p. 1-20, 2021B.
- RIBEIRO, R., WILTGEN, F. Teste de Integração de Colete com Múltiplos Sensores via Engenharia de Sistemas e Requisitos. **UNITAU, X CICTED, Congresso Internacional de Ciência Tecnologia e Desenvolvimento**, Universidade de Taubaté, 20 a 22 de outubro, p. 1- 20, 2021C.
- RIBEIRO, R., WILTGEN, F. Sistema de Controle de Apoio à Decisão Baseado em Tecnologia Vestível. **COBEF 2023 - Congresso Brasileiro de Fabricação**, Brasília – DF, 10-15 de maio, p.1-10 2023.

RODRIGUES, J., DE REZENDE SEGUNDO D., JUNQUEIRA H., SABINO M., PRINCE R.AL-MUHTADI J., DE ALBUQUERQUE V. Enabling Technologies for the Internet of HealthThings. **IEEE Access**. v.6, p.13129–13141, 2018.

SHAWN, I.S. Controle e Modelagem Fuzzy. **Blucher**, 2007. 13-17p.

SILVA, B.M.C., RODRIGUES J. J.P.C., DE LA TORRE DIEZ, CORONADO LÓPEZ M.,SALEEM K., Mobile-Health: A Review of Current State in 2015. **Journal of Biomedical Informatics**. v.56, p.265–272, 2015.

SVERTOKA, E., RUSU-CASANDRA, A., MARGHESCU, I. State-of-the-Art of Industrial Wearables: A Systematic Review. **13th International Conference on Communications**. Bucareste, Romênia 16 July, p.411–415, 2020.

WILTGEN, F. Técnica de Ensaios de Sistemas Complexos com Metodologia de Engenharia de Sistemas & Requisitos. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**. v.4(01), p.51–60, 2020.

WILTGEN, F. Testing Plan in Systems & Requirements Engineering for Strategic Engineering Areas. **26° International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)**. Curitiba, 22 a 26 de novembro, p.1–10, 2021.