

SISTEMA DE CONTROLE DE APOIO À DECISÃO BASEADO EM TECNOLOGIA VESTÍVEL

Ricardo Ribeiro

Universidade de Taubaté (UNITAU – Taubaté)
ricardo.reno@uol.com.br

Filipe Wiltgen

Universidade de Taubaté (UNITAU – Taubaté)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo (IFSP – Campinas)
Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC – Pindamonhangaba)
ProfWiltgen@gmail.com, Filipe.Wiltgen@unitau.br ou Filipe.Wiltgen@ifsp.edu.br

Resumo: Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle de apoio a tomada de decisão baseado em um colete sensorizado com tecnologia embarcada e vestível destinado a ser aplicado como um assistente pessoal na realização de tarefas complexas em situações de risco. Os eventos paralelos não associadas diretamente a ação principal e que podem prejudicar o sucesso da missão devem ser deixadas a cargo do sistema de controle e apoio a decisão. O protótipo do colete com tecnologia vestível é um dispositivo composto por um sistema de controle autônomo, com recurso de lógica nebulosa operado com múltiplos sensores aliados a um sistema de comunicação remota, transmissão de dados e gerenciamento de energia. Esse dispositivo deve ser capaz de fornecer ao usuário informações básicas como mudanças atmosféricas, presença de gases tóxicos, orientação via bússola, orientação de inclinação, temperatura e oxigenação corporal, batimento cardíaco e localização. Dada a quantidade e simultaneidade de informações captadas no ambiente em tarefas de curta ou de longa duração pode ocorrer em um ambiente hostil, o que traz a necessidade do uso racional dos recursos energéticos. A transmissão de dados remoto baseado em tecnologias de comunicação via rádio de longo alcance e de baixo consumo energético que contribui para a robustez do sistema. O protótipo em desenvolvimento dispõe de recursos de armazenamento de dados, estilo “caixa preta”, com a gravação das últimas informações captadas do ambiente. O dispositivo proposto, dada a sua natureza complexa, deverá ter um plano sistematizado de testes baseado em técnicas de Engenharia de Sistemas & Requisitos com a finalidade de permitir seguir no levantamento rígido do nível de maturidade tecnológica alcançada no desenvolvimento. Neste artigo será apresentado o domínio do problema e o domínio da solução para sistemas embarcados, âmbito de uma proposta de sistema eletrônico e de controle, ambos integrados via uma programação baseada em lógica nebulosa residente em microcontroladores de uso geral (na configuração mestre e escravo) inseridas em um colete.

Palavras-chave: Sensores, Apoio à Decisão, Lógica Nebulosa, Tecnologia Vestível, Sistemas Embarcados.

1. INTRODUÇÃO

Segundo os dados divulgados pela Organização Internacional do Trabalho relativos aos acidentes profissionais, mostram que o Brasil possui um dos maiores índices de acidentes fatais por atividades operacionais, apenas em 2021 houveram ~570 mil acidentes com ~2.500 óbitos refletindo um aumento de ~30% referente ao ano de 2020 (OIT, 2022; MFB, 2018). Acidentes quase sempre estão associados a grandes danos emocionais com prejuízos sociais e um alto custo econômico para toda a sociedade.

Equipamentos de proteção são essenciais para minimizar os riscos e ajudar a preservar a saúde e a integridade das pessoas. O desenvolvimento de equipamentos que possam ajudar e auxiliar profissionais na atuação em área de risco operacional, devem ser sempre uma atividade incentivada pela engenharia e pelas pesquisas científicas.

Os dispositivos de proteção utilizados em ambientes operacionais, sejam coletivos ou individuais, tem como finalidade auxiliar os usuários a se protegerem em atividades operacionais no ambiente de risco quando na execução de atividades de campo, em ambiente operacional civil ou militar (RIBEIRO e WILTGEN, 2021A; RIBEIRO e WILTGEN, 2022).

O propósito deste desenvolvimento científico é a obtenção de um protótipo físico real de um dispositivo vestível capaz de ser amplamente testado em ambiente controlado e em ambiente operacional relevante e ser capaz de ajudar na decisão do operador.

Este dispositivo vestível vem sendo construído em um colete com tecnologia eletrônica embarcada, destinado a auxiliar atividades operacionais em ambientes de risco e tem como objetivo monitorar certas variáveis ambientais inerentes as situações críticas, interpretá-las e posteriormente comunicar-se com usuário sobre as informações relevantes detectadas e analisadas para auxiliar na tomada de decisão referente a atividade operacional em execução.

O protótipo é baseado em um colete que utiliza diversos tipos de sensores interligados a um sistema microcontrolado, com comunicação remota, sistema de gerenciamento de energia, armazenamento de dados e interface com o usuário, assim como, a capacidade de dispor de alguns recursos autônomos, com o uso de lógica nebulosa para auxílio a tomada de decisão, procurando fornecer ao usuário um apoio operacional eficaz, fazendo com que a sua atenção e foco esteja na solução da operação principal da tarefa em questão.

O desenvolvimento deste colete sensorizado tem significativa aplicação para as forças de segurança, forças policiais, forças armadas, defesa civil, corpo de bombeiros, guarda costeira, operações de busca, resgate e salvamento, além de operações profissionais no campo da manutenção e montagens, tais como, as operações ligadas as redes de gasodutos, de eletricidade, telefonia suspensa, de distribuição de gás encanado e em ambientes de espaços confinados.

O colete sensorizado construído na forma de tecnologia vestível permite que as informações sejam acompanhadas e monitoradas em tempo real, tanto pelo usuário, quanto pela equipe de apoio em campo. A tecnologia vestível permite uma grande flexibilidade para o desenvolvimento dos projetos com sensores e comunicações, fazendo com que dados importantes das variáveis ambientais do entorno, no qual se insere a tarefa operacional, possam ser analisados e interpretados e disponibilizados ao usuário de maneira a tornar a sua atuação operacional mais segura. Estes sinais podem ser coletados como as variáveis de temperatura, umidade, presença de gases tóxicos, assim como, como as variáveis de saúde do usuário, tais como, sua temperatura corporal, batimentos cardíacos, níveis de oxigenação, níveis de glicose sanguínea, entre diversas outras, proporcionando o acompanhamento evolutivo da operação pelo usuário e apoio operacional remoto.

O dispositivo proposto nessa pesquisa possui múltiplos recursos e iterações complexas que demandam o uso das técnicas de Engenharia de Sistemas & Requisitos para tornar robusto o desenvolvimento do protótipo experimental.

A execução sistemática de teste de desenvolvimento do tipo *RDT&E (Research, Development, Test & Evaluation)*, para o dispositivo vestível sensorizado. O plano de testes baseados nos ensaios em ambiente controlado (em laboratório) *DT&E (Developmental Test & Evaluation)*, e posteriormente, os ensaios em ambiente relevante (em campo) *OT&E (Operational Test & Evaluation)* irão corroborar e permitir avaliar a maturidade tecnológica do projeto, assim como, analisar a sua evolução do índice de *TRL (Technology Readiness Level)* (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021; RIBEIRO e WILTGEN, 2021A).

No decorrer deste artigo há uma abordagem sobre os conceitos dos dispositivos vestíveis, a sua evolução tecnológica e a vasta gama de aplicações possíveis nas rotinas operacionais. Um sistema de apoio confiável, dedicado a operações de risco, necessita de técnicas sistemáticas. Será explorada também, a utilização de alguns recursos de inteligência artificial, baseado em controladores em lógica nebulosa, trazendo os resultados de simulação em computador para dois modelos diferentes de controladores nebulosos, assim como, a viabilidade na implementação no dispositivo. Uma visão ampla e estruturada do colete, é apresentada, com as possíveis disposições de sensores e outros recursos operacionais. Por fim, tem-se as discussões a respeito da tecnologia e perspectivas futuras.

2. DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS EMBARCADOS EM DISPOSITIVOS VESTÍVEIS

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).

As tecnologias eletrônicas embarcadas são aquelas em que um sistema de controle fica incorporado aos dispositivos localmente, realizando operações de controle, gerenciamento, monitoramento e comunicação. Estes dispositivos, na maioria das vezes, devem ser capazes de interagir com o ambiente ao redor através de sensores e atuadores.

Os dispositivos vestíveis com tecnologia embarcada 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 remota via comunicação móvel a distância através de protocolos específicos e dedicados as operações remotas (LIU, 2016).

Atualmente estão bem difundidos muitos tipos de dispositivos vestíveis, como relógios dedicados ao monitoramento de função básicas de saúde do usuário (batimentos cardíacos, monitoramento do sono e até mesmo funções simples de rastreamento como a contagem de passos, distâncias percorridas e outras mais específicas) ou dispositivos com a função de realidade aumentada (NGUYEN-HUU *et al.*, 2018; ISLAM *et al.*, 2020; TANG, 2007; LAM, 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).

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

No grupo denominado *Coleta de Dados* o desenvolvimento operacional é apoiado por arranjos de sensores conectados em uma central de processamento e controle que atua nos subgrupos de sensores destinados a captura de parâmetros ambientais, assim como ocorre no outro subgrupo destinado ao monitoramento de dados fisiológicos do agente de campo (DOLEZ *et al.*, 2020; ISLAM *et al.*, 2020).

O subgrupo de sensores fisiológicos ou biossensores 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 para aquisição devido a sua grande popularização.

Os sensores de que captam informações de atividades cerebrais, sons do coração, níveis de glicemia e atividades musculares, entre outras mais específicas, ainda são raros e caros, estes estão em contínuo desenvolvimento quase sempre destinados para aplicações médicas (DEHGHANI e KIM, 2019; CHOI *et al.*, 2017).

No grupo destinado a *Transmissão de Dados* estão destinados a tecnologia de comunicação sem fio com foco nas tecnologias de redes com os protocolos do tipo *bluetooth*, *zigbee*, *LoRa*, entre tantos outros. Os conceitos básicos em todos estes grupos de sensores estão na forma de comunicações de dados voltadas para o baixo consumo de energia elétrica (RODRIGUES *et al.*, 2018).

Na Figura 1 é possível notar a representação genérica para os conceitos envolvidos na representação dos dispositivos vestíveis.

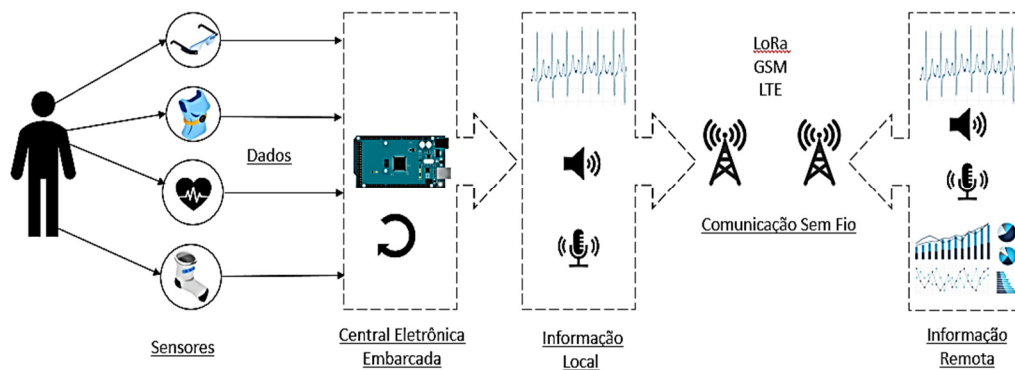


Figura 1. Representação Genérica de Dispositivos Vestíveis.
Fonte: Próprios Autores (2022).

O campo destinado aos dispositivos vestíveis está em constante evolução e desenvolvimento, apresentando um futuro promissor. Por outro lado, há também alguns desafios a serem superados como a rápida evolução tecnologia dos dispositivos, fazendo com que em um curto espaço de tempo, a tecnologia empregada pode estar superada tornando o dispositivo obsoleto rapidamente.

O grande volume de dados gerados exige sistemas com grande capacidade de armazenamento e robustez para análise de dados. Por fim, as tratativas relacionadas a privacidade e segurança de dados também impõem desafios a serem enfrentados pelos dispositivos vestíveis no futuro próximo (MARDONOVA e CHOI, 2018; AL-FUQAHA *et al.*, 2015; ATZORI *et al.*, 2010; LIU e SUN, 2016; MEHTAB e ABDULRAHMAN, 2018).

O colete sensorizado sendo um equipamento de proteção, em última instância traz inerente a sua função básica de sinalização visual tem sua característica potencializada ao agregar o conceito dos dispositivos vestíveis, trazendo ao usuário uma ampla gama de recursos tecnológicos para auxiliar as tarefas complexas executadas em situações de risco.

Todo o projeto tem por base a resolução de um problema. As técnicas apresentadas pela Engenharia de Sistemas & Requisitos (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021) tem por propósito a elaboração de uma sistemática de desenvolvimento de projetos e no uso de técnicas específicas que auxiliam os projetistas a explorarem as reais necessidades dos clientes chegando ao entendimento completo do problema, encontrando os contornos limites para, posteriormente apresentar uma proposta de solução robusta que atenda as expectativas.

A técnica que demonstra de forma clara e objetiva a necessidade de explorar profundamente os domínios do problema e posteriormente de forma sistematizada no domínio da solução é a estrutura conhecida como modelo em “V”. Esta técnica foi desenvolvida na década de 70, e proposta como um modelo na década de 80, teve o seu uso estabelecido pelo Conselho Nacional de Engenharia de Sistemas (INCOSSE) nos Estados Unidos no início dos anos 90 (Wiltgen, 2020).

A fases de testes de desenvolvimento do tipo *RDT&E* estão definidas no domínio da solução, em sua clássica divisão, com os testes em ambiente controlado (*DT&E*) e os testes operacionais em ambiente relevante (*OT&E*) definindo ao final a validação ou não de um projeto. Após a finalização dos testes e uma análise crítica em todas as documentações, é possível verificar o nível de maturidade tecnologia (*TRL*) que o projeto alcançou, permitindo de acordo com os resultados, validar o projeto para a fase de operação e fabricação (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021).

Para a estruturação dos testes devem ser elaborados documentos e procedimentos bem estruturados para acompanhamento e registro de cada uma das fases. Caso a evolução dos resultados dos testes não seja satisfatória, novas alternativas e modificações devem ser apresentadas para a evolução do projeto até a fase de maturidade.

Os requisitos do projeto para o protótipo do colete sensorizado de tecnologia vestível deve atender as necessidades dos usuários na execução de tarefas em um ambiente de risco real oferecendo apoio confiável para uma operação segura.

Pode-se destacar no projeto o atendimento aos requisitos em ergonomia, versatilidade e flexibilidade, facilidade de utilização, comunicação a longas distâncias, armazenamento de dados (modelo do tipo “caixa preta”), gerenciamento de energia sendo controlado de forma autônoma, além de possuir um sistema de troca térmica de baixo custo.

Para a realização do plano de testes a concepção de um protótipo experimental de um dispositivo vestível destinado a aplicações em áreas de risco vem sendo desenvolvido um colete sensorizado objeto desta pesquisa.

3. PROTÓTIPO DO 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 interação com o ambiente e a função armazenamento de dados de emergência no estilo “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). Na Figura 2 pode ser vista a versatilidade de distribuição dos vários modelos de sensores na estrutura do colete.



Figura 2. Mapeamento dos sensores distribuídos no dispositivo vestível (colete) para atividades operacionais.

Fonte: Adaptado de Wiltgen (2020), Ribeiro e Wiltgen (2021A, 2021B e 2021C).

A plataforma Arduino *ATMEGA 2560* possui diversas entradas e saídas, barramento de comunicação serial nos protocolos *SPI*, *I2C* e *USB* oferecendo diversas possibilidades de conexão de sensores de diferentes tecnologias permitindo grande flexibilidade no desenvolvimento. As principais características da placa Arduino Mega com o processador *ATMEGA 2560* é possuir 8 bits na arquitetura do tipo *RISC* com 256kB de memória *Flash*, 8kB de memória *RAM* e 4kB de memória *EEPROM* e sistema operando com uma frequência de 16MHz, alimentados por um grupo de baterias de longa duração.

A Figura 3 mostra o colete sensorizado, no seu atual estágio de desenvolvimento, com a distribuição de alguns sensores integrados e em testes.

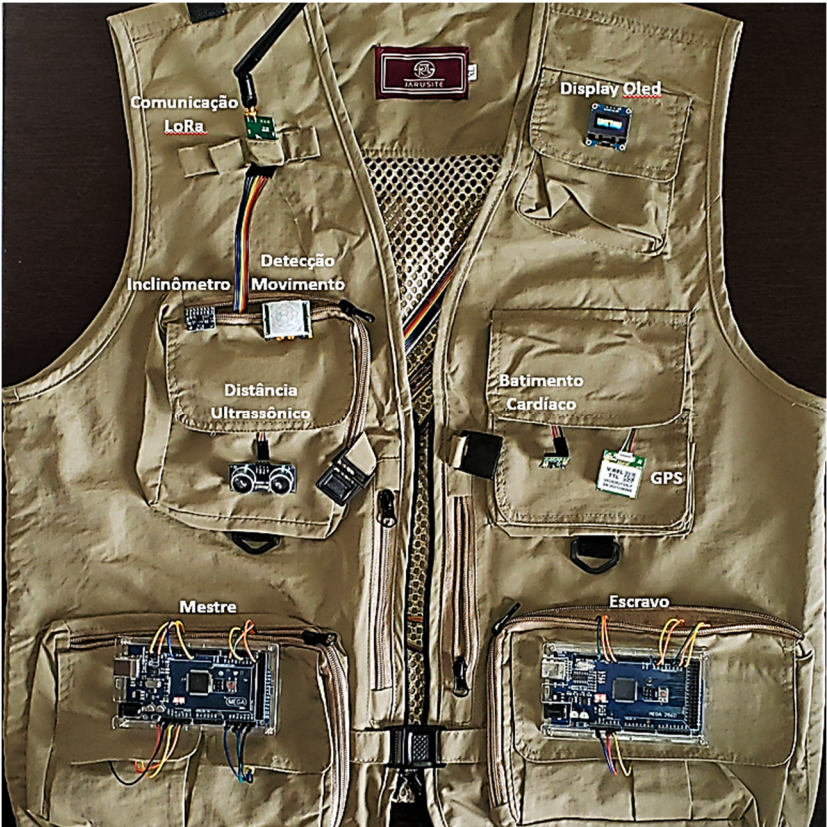


Figura 3. Mapeamento dos sensores distribuídos no dispositivo vestível (colete) em testes.
Fonte: Próprios Autores (2022).

No grupo sensores, as funcionalidades previstas estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição dos sensores no colete.

<i>Grupo</i>	<i>Características dos Sensores</i>
<i>Posicionamento</i>	<i>Bússola Digital</i>
	<i>GPS</i>
	<i>Inclinômetro</i>
	<i>Acelerômetros</i>
<i>Gases</i>	<i>CO2 – Dióxido de Carbono</i>
	<i>CO – Monóxido de Carbono</i>
	<i>O2 – Oxigênio</i>
	<i>Compostos GLP</i>
<i>Comunicação</i>	<i>Microfone</i>
	<i>Auto Falante</i>
	<i>Display Oled</i>
<i>Ambiental</i>	<i>Temperatura</i>
	<i>Umidade</i>
	<i>Luminosidade</i>
	<i>Ultrassônico</i>
<i>Fisiológico</i>	<i>Estação Meteorológica (Pressão x Temperatura x Umidade)</i>
	<i>Batimento Cardíaco</i>
	<i>Temperatura Corporal</i>

Fonte: Ribeiro e Wiltgen (2021A).

Os componentes sensores, descritos no Tabela 1, fazem a aquisição os sinais que permitem o monitoramento em tempo real das variáveis ambientais na qual o usuário está inserido, e assim, cuidando constantemente de sua integridade. No Tabela 2., é possível notar os sinais de apoio, fontes de energia elétrica, sistemas de comunicações e dispositivos térmicos utilizados no colete.

Tabela 2. Elementos de apoio energia, térmico e de comunicações.

<i>Grupo</i>	<i>Característica dos Sensores</i>
<i>Sistemas de Comunicações</i>	<i>SMS</i>
	<i>GPRS</i>
	<i>LoRa</i>
<i>Apoio</i>	<i>Iluminação Flash (SOS)</i>
	<i>Iluminação Infravermelho</i>
<i>Energia Elétrica</i>	<i>Baterias Recarregáveis</i>
	<i>Painel Fotovoltaico</i>
	<i>Gerador Termoelétrico de Seebeck</i>
<i>Térmicos</i>	<i>Resfriadores de Peltier</i>

Fonte: Ribeiro e Wiltgen (2021A).

O sistema de apoio tem por finalidade fornecer recursos necessários para o usuário disponibilizando iluminação de emergência, iluminação tipo flash piscante em código *Morse (SOS)*, iluminação do tipo infravermelho e ultravioleta, possibilitando a sua localização térmica sempre que outras interferências não permitirem a sua visualização pelos meios normais em luz visível.

O sistema de comunicação remota de longa distância e de baixo consumo energético, permite o envio de sinais utilizados para a troca de informação importantes, ou mesmo, para o envio dos alertas necessários no momento da intervenção. O sistema utiliza como fonte de alimentação baterias recarregáveis de alta intensidade e longa duração, podendo contar, ainda, com o uso alternativo e emergencial baseado em células fotovoltaicas e geradores termoelétricos do tipo *Seebeck*, ambos, fixados às áreas externas do colete e ligados ao gerenciador de carga do sistema de controle do colete. A refrigeração do conjunto poderá conter células do tipo *Peltier*, fixados ao colete em regiões estratégicas, permitindo o controle da temperatura para os sistemas eletrônicos, assim como, fornecendo o conforto necessário ao usuário no controle da temperatura interna do colete.

No controlador mestre existe a atuação do *firmware* dedicado ao gerenciamento de energia do sistema autônomo. Este *firmware* projetado e programado em lógica nebulosa coleta as informações dos sensores e classifica as prioridades através de regras pré-estabelecidas sempre analisando o risco de autonomia das baterias. Sempre informando ao usuário os cuidados necessários para cada cenário. Esses cenários serão definidos para cada operação de coordenação de energia e será aprendido através de conhecimento prévio dos possíveis cenários permitindo a tomada de decisão mais assertiva em uma operação de risco.

4. TÉCNICA DE LÓGICA E CONTROLADORES NEBULOSOS NO APOIO A DECISÃO

A lógica de controle autônomo adotada para o gerenciamento de energia é crítica para esta aplicação operando em ambientes de risco, no qual o fator segurança operacional é fundamental para o progresso da operação. Nesta situação a confiabilidade no equipamento torna-se um fator extremamente relevante. Dada a variabilidade de situações em que o dispositivo pode estar envolvido deve haver uma definição básica dos recursos mínimos disponíveis para cada caso.

A opção de fazer uso de recursos de inteligência artificial neste dispositivo vestível tem como função adaptar-se de maneira eficiente a cada diferente situação e ambiente trazendo vantagens operacionais consideradas importantes no auxílio da decisão do usuário do dispositivo. Os recursos em inteligência artificial dedicadas às ações de controle do colete sensorizado estão baseadas no uso e aplicação das técnicas de lógica nebulosa. O conceito da lógica nebulosa prevê o modelamento difuso, baseado na teoria dos conjuntos e nas variáveis linguísticas, (ZADEH, 1975) ao invés do modelamento preciso e digital (zeros e uns).

Na lógica digital binária 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 subníveis, por exemplo tons de cinza (256) aproxima-se melhor da representação do ambiente real, isso pode ser obtido com a utilização da técnica de lógica nebulosa. 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).

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. O grau de pertinência permite uma representação de parâmetros imprecisos como os relacionados a temperatura. Essa associação torna-se fundamental para o atendimento às regras de pertinência.

Os limites de pertinência, via 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 em 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 Lógica Nebulosa.

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 extraídos da experiência humana prévia. 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.

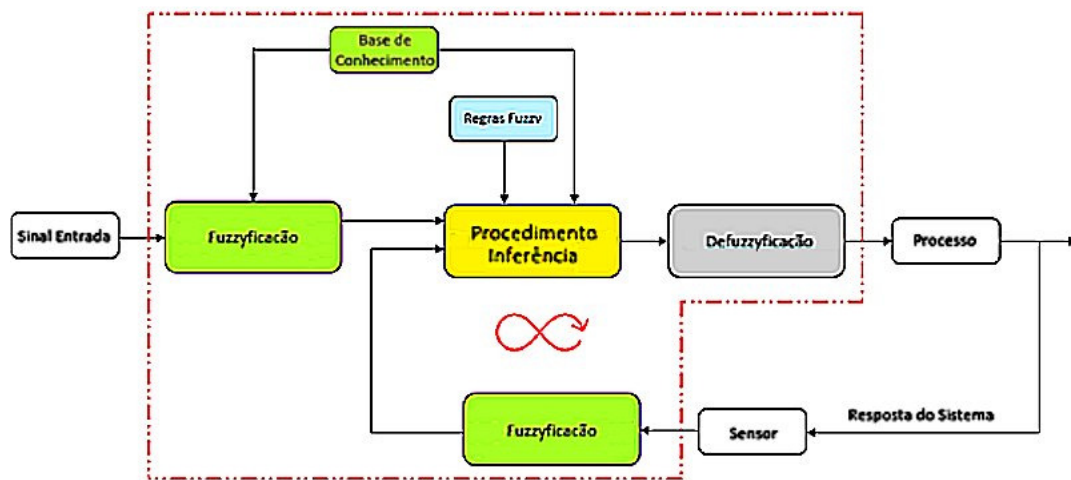


Figura 4 – Representação de graus de pertinência para o controle de temperatura em lógica nebulosa.
Fonte: Próprios Autores (2022).

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.

5. DISCUSSÃO

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.

Para a definição do controlador nebuloso que melhor se ajusta ao projeto do colete sensorizado definiu-se a escolha de dois modelos: um do tipo *Mamdani* (MAMDANI, 1974) e o outro no modelo de *Takashi Sugeno* (SUGENO e YASUKAWA, 1993) a serem simulados, em computador, respeitando as mesmas condições de entrada para o sistema.

As condições de contorno que servirão de base para o controlador serão: A - *Tensão de alimentação do sistema proveniente de uma bateria de ~9Vcc*, B - *Limite operacional de tensão estabelecido no intervalo de ~7 a ~9Vcc* e C - *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 3.

Tabela 3. Representação variáveis linguísticas para controlador nebuloso.

<i>Tensão da Bateria (Vcc)</i>	<i>Corrente Grupo Sensor (mA)</i>	<i>Disponibilidade Energética (H)</i>
<i>Inaceitável</i>	<i>Mínimo</i>	<i>(E) Retomar Base</i>
<i>Crítico</i>	<i>Baixo</i>	<i>(D) Atenção</i>
<i>Baixo</i>	<i>Intermediário</i>	<i>(C) Baixo</i>
<i>Médio</i>	<i>Avançado</i>	<i>(B) Intermediário</i>
<i>Completa</i>	<i>Plena Atividade</i>	<i>(A) Atividade Plena</i>

Fonte Próprios Autores (2022).

As funções de pertinência utilizadas foram do tipo gaussianas, tanto para as entradas, quanto para as saídas. Definidas no mesmo intervalo e com o mesmo ponto de inflexão das curvas, isso vale tanto para o modelo do tipo *Mamdani* quanto do tipo *Sugeno*. O Modelamento do controlador do tipo *Mamdani* foi configurado para as seguintes entradas e saídas.

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.

6. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

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. Resultado do modelamento de *Mamdani*, para uma tensão de alimentação de ~8,5Vcc e uma corrente do grupo sensor de ~100mA, implicou em uma disponibilidade de operação é de ~3 horas. A resposta do controlador *Takashi Sugeno*, para as mesmas tensões e correntes elétricas implicou em uma disponibilidade de operação de ~3 horas.

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. Observa-se que ambos os controladores possuem boa aproximação na resposta esperada.

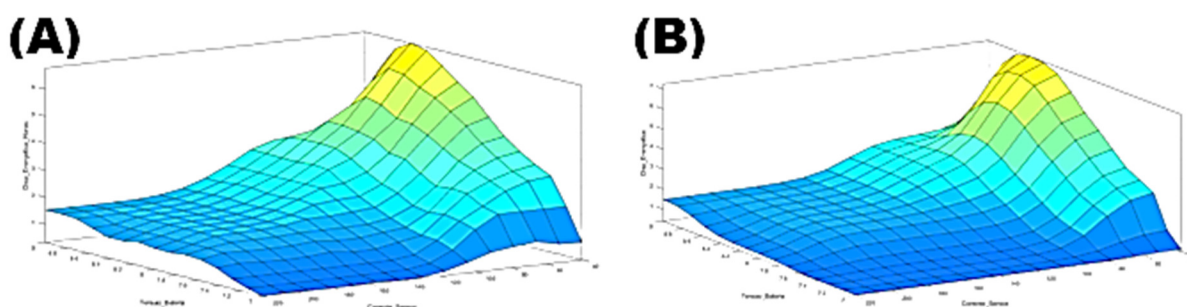


Figura 12. Superfície de controle em um controlador nebuloso do tipo *Mamdani* (A) e do tipo *Takashi Sugeno* (B)
Fonte: Próprios Autores (2022).

O colete sensorizado está em fase final de teste individuais (*FTI – Fase de Testes Individuais*), e pronto para iniciar a realização dos testes coletivos integrados (*FTC – Fase de Testes Coletivos*) ainda em ambiente controlado (*DT&E*), ou seja, 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 responsável pelo controle.

O comportamento dos controladores do tipo *Mamdani* e do tipo *Takagi 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 ~100mA e uma tensão elétrica de ~8,5Vcc. O controlador do tipo *Mamdani* apresentou uma disponibilidade de energia estimada em ~3 horas de operação, e o controlador do tipo *Takashi Sugeno* o resultado foi um pouco menor cerca de ~2,9 horas de operação. Este fato confirma a boa aproximação existente entre os dois tipos de controladores nebulosos aplicados a nesse estudo.

Outra informação importante são os limites estáveis de tensão elétrica que no controlador do tipo *Mamdani* ficou entre ~8 à ~9Vcc, e para o controlador do tipo *Takashi Sugeno* ficou entre ~8,5 à ~9Vcc. A partir destes limites inferiores, a queda de tensão elétrica aumenta com o tempo de utilização. Quanto a corrente elétrica é possível observar que a melhor resposta do sistema está na faixa entre ~100 à ~160mA em ambos os 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 *desfuzzyficação*, tornando o *firmware* mais “leve e rápido”, 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 do programa.

Acredita-se que em um futuro breve este dispositivo possa ajudar as forças militares e profissionais civis na realização segura de tarefas operacionais que envolvem riscos (altura, temperatura, confinamento, esforço físico e estresse), auxiliando e fornecendo subsídios para tomadas decisões importantes durante a execução destas tarefas em campo.

7. REFERÊNCIAS

- AL-FUQAHA, A., GUIZANI, M., ALEDHARI, M., AYYASH, M. *Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications*. IEEE Communications Surveys and Tutorials. v.17(04), pp.2347-2376, 2015.
- ATZORI, L., IERA, A., MORABITO, G. *The Internet of Things: A Survey*. Computer Networks. v.54(15), pp.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), pp.10-11, 2018.
- CHOI, B., HWANG, S., LEE, S.H., *What Drives Construction Workers Acceptance of Wearable Technologies in The Workplace: Indoor Localization and Wearable Health Devices for Occupational Safety and Health*. Automation in Construction. v.84, pp.31-41, 2017.
- DEGHANI, 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), pp.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), pp.1-9, 2020.
- MFB (Ministério da Fazenda Brasileiro), *Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho*. AEAT 2018.v.1(04), pp.62, 2018.
- GU, Y., ZHANG, T., CHEN, H., WANG, F., PU, Y. GAO, C., LI, S. *Mini Review on Flexible and Wearable Electronics for Monitoring Human Health Information*. Nanoscale Research Letters. v.14(01), pp.1-15, 2019.
- ISLAM, G.M., ALI, A., COLLIE, S., *Textile Sensors for Wearable Applications: A Comprehensive Review*. Cellulose. v.27(11), pp.6103-6131, 2020.
- LAM, P.T., *Recent Developments in Flexible Wearable Electronics for Monitoring Applications*. Transactions of the Institute of Measurement & Control. v.29(03-04), pp.283-300, 2007.
- LIU, J., SUN, W., *Smart Attacks against Intelligent Wearables in People-Centric Internet of Things*. IEEE Communications Magazine. v.54(12), pp.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, pp.3-8, 2016.
- MAMDANI, E. H., *Application of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant*. Proc. Inst. Elect. Eng., v.121, pp.1585-1588, 1974.
- MARDONOVA, M., CHOI, Y., *Review of Wearable Device Technology and its Applications to the Mining Industry*. Energies. v.11(03), pp.547, 2018.
- MEHTAB, M., ABDULRAHMAN, A., *Purpose, Scope, and Technical Considerations of Wearable Technologies*. Wearable Technologies: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. v.1(04), pp.1-20, 2018.
- NASCIMENTO JR., C., YONEYAMA, T., *Inteligência Artificial em Controle e Automação*. Blucher, 2020. 250p.
- 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), pp.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 Out., v.1(01), pp.92-99, 1998.

- RHODES, B.J., *The Wearable Remembrance Agent: A System for Augmented Memory*. Personal Technologies. v.1(04), pp.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, pp.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, pp.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, pp.1-20, 2021C.
- RIBEIRO, R., WILTGEN, F., *Desenvolvimento de Colete com Sensores Embarcados para Aplicação Civil e Militar*. Engenharia - Construção de Conhecimentos. Uniesmero. v. 1 (cap. 2), 2022.
- RODRIGUES, J., REZENDO, D., JUNQUEIRA, H., SABINO, M., PRINCE, R. AL-MUHTADI, J., DE ALBUQUERQUE, V., *Enabling Technologies for the Internet of Health Things*. IEEE. v.6, pp:13129-13141, 2018.
- SHAWN, I.S., *Controle e Modelagem Fuzzy*. Blucher, 2007. 300p.
- SILVA, B.M., RODRIGUES, J., SALEEM, K., *Mobile-Health: A Review of Current State in 2015*. Journal of Biomedical Informatics. v.56, pp.265-272, 2015.
- SUGENO, M., YASUKAWA, T., *A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitative Modeling*. IEEE Trans. Fuzzy Syst. v.1(01), pp.7-31, 1993.
- SVERTOKA, E., RUSU-CASANDRA, A., MARGHESCU, I., *State-of-the-Art of Industrial Wearables: A Systematic Review*. 13th International Conference on Communications. Bucureste, Romênia, 16 July, pp.411-415, 2020.
- OIT (Organização Internacional Trabalho), *Observatório de Segurança e Saúde do Trabalho*. Smartlabr, 2022.
- WILTGEN, F., *Técnica de Ensaio de Sistemas Complexos com Metodologia de Engenharia de Sistemas & Requisitos*. Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas. v.4(01), pp.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, pp.1-10, 2021.
- ZADEH, L.A., *The Concept of A Linguistic Variable And Its Application to Approximate Reasoning*. Information Sciences. v.8(03), pp.199-249, 1975.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo científico.

DECISION SUPPORT CONTROL SYSTEM BASED ON WEAR TECHNOLOGY

Ricardo Ribeiro

Universidade de Taubaté (UNITAU – Taubaté)
ricardo.reno@uol.com.br

Filipe Wiltgen

Universidade de Taubaté (UNITAU – Taubaté)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo (IFSP – Campinas)
Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC – Pindamonhangaba)
ProfWiltgen@gmail.com, Filipe.Wiltgen@unitau.br ou Filipe.Wiltgen@ifsp.edu.br

Abstract. This paper presents development of a decision support control system based on a sensorized vest with embedded and wearable device intended to be applied as a personal assistant in performing complex tasks in risky situations. Side events not directly associated with main action and which may hamper success of mission should be left to decision support and control system. The prototype of vest with wearable technology is a device composed of an autonomous control system, with a fuzzy logic feature operated with multiple sensors allied to a remote communication, data transmission and energy management system. This device must be able to provide user with basic information such as atmospheric changes, presence of toxic gases, compass orientation, inclination orientation, body temperature and oxygenation, heartbeat and location. Given the amount and simultaneity of information captured in environment in short or long duration tasks, it can occur in a hostile environment, which brings need for rational use of energy resources. Remote data transmission based on long-range, low-power radio communication technologies that contribute to the system's robustness. The prototype under development has data storage resources, "black box" style, with recording of last information captured from environment. The proposed device, given its complex nature, should have a systematized test plan based on Systems & Requirements Engineering techniques in order to allow for a rigid survey level of technological maturity reached in development. In this paper, problem domain and solution domain for embedded systems will be presented, as part of an electronic and control system proposal, both integrated via a programming based on fuzzy logic residing in general-purpose microcontrollers (in master and slave configuration) inserted into a vest.

Keywords: Sensors, Decision Support, Fuzzy Logic, Wearable Technology, Embedded Systems.