



SIMULAÇÃO E PROTOTIPAGEM DE BAIXO CUSTO COMO APOIO AO ENSINO DE ENGENHARIA

LOW-COST SIMULATION AND PROTOTYPING TO SUPPORT ENGINEERING EDUCATION

Téo Cerqueira Revoredo¹

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v44p15-34.2025

RESUMO: Em um mundo em que as tecnologias e a sociedade mudam aceleradamente, os cursos de Engenharia devem se adaptar de forma rápida e constante para manterem seus níveis e os alunos motivados. Não se trata de tarefa fácil, especialmente quando há custos envolvidos. Assim, a emulação computacional e a prototipagem em pequena escala são ótimas alternativas para uma abordagem de aprendizagem baseada em projetos, que pode abordar e expandir os conteúdos apresentados em salas de aula e em experimentos de laboratório, ajudando os alunos a desenvolver novas habilidades e incentivando-os a buscar soluções que integrem várias disciplinas. Nesse contexto, este artigo apresenta resultados de trabalhos realizados na Universidade do Estado do Rio de Janeiro com base em simulação e prototipagem de código aberto e baixo custo, objetivando prover ferramentas de suporte para disciplinas de graduação em Engenharia. Os projetos integram um cenário mais amplo de pesquisa e desenvolvimento em temas relacionados às cidades inteligentes, sendo também apresentado um projeto voltado a competições de robótica. Os resultados abrangem protótipos de sistemas de microgeração de energia a carros autônomos, incluindo sistema de gerenciamento de energia residencial, braços robóticos e robôs de assistência, além de diferentes ambientes de emulação.

PALAVRAS-CHAVE: Educação em Engenharia; prototipagem de baixo custo; simulação.

ABSTRACT: In a world where technology and society change rapidly, engineering courses must quickly and constantly adapt to maintain their standards and keep students motivated. It is no easy task, especially when costs are involved. Thus, computational emulation and small-scale prototyping are great alternatives for a project-based learning approach, which can address and expand the content presented in classrooms and laboratory experiments, helping students develop new skills and encouraging them to seek solutions that integrate several disciplines. In this scenario, this article presents the results of work carried out at the State University of Rio de Janeiro based on low-cost, open-source simulation and prototyping, aiming to provide support tools for different disciplines of an undergraduate engineering course. The projects are part of a larger research and development scenario on topics related to smart cities, with a project focused on robotics competitions also presented. The results cover prototypes ranging from micro-power generation systems to self-driving cars, including home energy management systems, robotic arms and assistance robots, as well as different emulation environments.

KEYWORDS: Engineering Education; low-cost prototyping; sym-to-real emulation.

¹ Professor Associado, Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), teorevredo@uerj.br.



INTRODUÇÃO

Práticas que complementem a teoria discutida em sala de aula são fundamentais nos cursos de Engenharia. No entanto, experimentos convencionais não abordam completamente as habilidades que contribuem para a formação de um bom engenheiro, podendo ser suportados por outras atividades educacionais que estimulem conteúdos diferentes. Ademais, em um mundo que se modifica rapidamente, no qual a tecnologia e a sociedade giram em ritmo acelerado, os cursos de Engenharia devem se adaptar velozmente para manterem seus níveis e o interesse dos discentes. Contudo, não se trata de tarefa fácil, especialmente quando há custos envolvidos. Nesse contexto, modelagem, simulações realistas e prototipagem em pequena escala são ótimas alternativas para uma abordagem de aprendizagem baseada em projetos (PBL), para auxiliar no desenvolvimento de conceitos nem sempre explorados ao longo do curso, tais como trabalho em equipe, integração de disciplinas e criatividade.

A Engenharia Elétrica e em especial as ênfases de Eletrônica e Computação podem se beneficiar significativamente de abordagens PBL. O surgimento de plataformas de prototipagem eletrônica de código aberto e de baixo custo – como módulos Arduino (Arduino, 2018) e ESP-32 (Expressif systems, 2024), além de *hardware* de impressão 3D acessível e poderosas ferramentas de emulação de código aberto, como PyBullet (Coumans, 2015), *Car learning to act* (CARLA) (Dosovitskiy *et al.*, 2017) e NVIDIA Omniverse (Nvidia corporation, 2014) – expandiu as possibilidades de conteúdo de apoio ao ensino, de atividades extracurriculares, tais como competições educacionais, e de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) na universidade.

Nesse contexto, este trabalho apresenta resultados de projetos desenvolvidos no Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações (DETEL) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), com foco em simulação e prototipagem de sistemas de engenharia, que fornecem aos alunos de graduação ferramentas de apoio para fortalecer e ampliar o conteúdo abordado no decorrer do curso. A maioria dos projetos integra um cenário maior de PD&I em temas convergentes sobre as cidades inteligentes, buscando motivar os discentes a realizarem pesquisas aplicadas e a desenvolverem soluções de engenharia para questões relevantes da atualidade, ao mesmo tempo em que estabelece uma “malha de realimentação” com as disciplinas correlatas, por meio da produção de materiais de apoio, da divulgação científica e da introdução de novos elementos para a prática laboratorial. Adicionalmente, são realizados projetos



voltados para competições educacionais de robótica e ensino fora da universidade. Detalhes de projeto e implementação dos protótipos descritos fogem do escopo deste artigo e não são aqui discutidos, mas podem ser encontrados em outras publicações do autor, citadas ao longo do texto.

CONTEXTUALIZAÇÃO

Até 2050 os centros urbanos do planeta receberão 2,5 bilhões de novos habitantes (United Nations, 2019), o que pode levar as cidades a perderem funções básicas que reduziriam a qualidade de vida, tais como deficiências na gestão de resíduos, restrições nos sistemas de educação, saúde, segurança pública e mobilidade urbana, além de problemas operacionais (Weiss, Bernardes e Consoni, 2015). Sendo assim, o tema urbano ocupa papel central na agenda global, e “cidade inteligente” torna-se um termo amplamente difundido, referindo-se a um cenário urbano em que as tecnologias digitais são aplicadas não apenas para o melhor uso dos ativos e a redução das emissões, mas também para o estabelecimento de sistemas de transporte inteligentes, geração eficiente de energia, melhor administração pública entre outros aspectos.

A energia e a mobilidade urbana figuram como alicerces das mudanças necessárias. À medida que esta última se transforma com a adoção de veículos elétricos, híbridos, compartilhados e autônomos, cresce a exigência por infraestrutura capaz de apoiar essa nova realidade, em paralelo à evolução de sistemas e serviços de energia limpa, descentralizada e digitalizada, bem como à intensificação da eletrificação

Entre as diversas direções de trabalho envolvidas no contexto das cidades inteligentes, quatro se destacam e são descritas nas quatro subseções a seguir. De maneira complementar, no contexto da aplicação da aprendizagem baseada em projetos no desenvolvimento de sistemas de engenharia, a quinta subseção discorre brevemente sobre robôs de competição.

Geração distribuída com fontes renováveis

A geração de energia elétrica ou térmica pelo usuário final, por meio de equipamentos de pequena escala, cresce a passos largos em todo o mundo, sustentada pela difusão de fontes renováveis e pelo estabelecimento de novas



tecnologias de informação e comunicação em redes de baixa tensão, somadas a uma nova forma de gestão da produção descentralizada. Também conhecida como microgeração, essa abordagem representa um novo paradigma que, tipicamente, conduz à melhoria do desempenho do sistema elétrico, gerando benefícios tecnológicos, econômicos e ambientais (Moreira, 2010). Outrossim, destaca-se a possibilidade de transferência bidirecional de energia entre veículos elétricos e a rede de distribuição, fortalecendo o contexto das redes elétricas inteligentes, especialmente no que se refere ao controle da demanda e da produção. Torna-se, assim, evidente a importância de ações de PD&I em microgeração para as cidades inteligentes, incluindo a geração híbrida e o desenvolvimento de técnicas que possibilitem sua operação com máxima eficiência

Casas inteligentes

A tecnologia aliada ao uso eficiente de energia e da automação de tarefas é característica cada vez mais presente nas residências modernas, o que faz emergir o termo “casa inteligente”. No centro das atenções, a eficiência energética é foco de ações por parte da comunidade científica e organizações governamentais pelo mundo. A União Europeia, por exemplo, criou a Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) 2023/955 (European commission, 2023), que abrange uma variedade de medidas para melhorar o desempenho energético do setor da construção entre outros fatores. No Brasil, a redução do consumo de energia nas edificações é parte dos compromissos assumidos no âmbito da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), que apoia políticas públicas nacionais para promover as mudanças climáticas e o desenvolvimento sustentável e, ao mesmo tempo, reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Inmetro, 2024).

Metodologias tradicionais de avaliação da eficiência energética de edifícios consideram a demanda total de energia durante um longo período. Porém, pode-se alcançar maior exatidão ao se considerar o consumo individual de aparelhos elétricos. Soluções de monitoramento que provejam grandes volumes de dados de consumo podem direcionar novos modelos e implementações de sistemas de controle (Tanasiev *et al.*, 2021). Nas cidades, as informações obtidas de residências individuais podem ser fundidas e fornecidas a organismos relevantes para melhorar a gestão da energia. Além disso, a redução da escala e o baixo custo dos



dispositivos inteligentes permitem incorporar sensores em mobiliário, eletrodomésticos e vestuário que podem ser úteis, por exemplo, no monitoramento de pessoas idosas e deficientes e nas rápidas identificação e resposta a ocorrências (Dias *et al.*, 2016). Portanto, sistemas integrados de monitoramento e controle que possam medir e responder a numerosos parâmetros físicos são relevantes, embora a integração de dispositivos heterogêneos possa ser difícil. Surge a Internet das Coisas (IoT), uma nova forma de conectar humanos e coisas, que tende a estabelecer conexão de forma inteligente entre bilhões de coisas e ampliar aplicações e fronteiras do mundo com entidades físicas e componentes virtuais em um futuro próximo (Li e Zhao, 2014), desde que superados desafios associados à capacidade de processamento, interoperabilidade, segurança e privacidade (Trivodaliev e Stojkoska, 2017).

Robôs de serviço e assistência

Sistemas robóticos destinados a servir e auxiliar seres humanos em tarefas cotidianas são atualmente um tema relevante de pesquisa e tendem a impactar, em breve, o dia a dia das pessoas, especialmente nas cidades inteligentes. Entre os principais objetivos estão o aumento da autonomia, da segurança e do bem-estar de idosos e pessoas com deficiência. Como exemplos, citam-se a integração de um braço robótico a uma cadeira de rodas, para auxiliar na abertura de portas e na manipulação de objetos, e o uso de robôs móveis autônomos para assistência e/ou prestação de serviços, direcionados a ajudar humanos em casa, no escritório, em hospitais entre outros contextos. Para realizar a maioria de suas tarefas, os robôs móveis devem ser capazes de navegar de forma inteligente de um local a outro em ambientes dinâmicos – uma tarefa desafiadora, dada a presença de múltiplas entidades móveis que podem obstruir ou interferir no trajeto. Tal cenário representa uma grande oportunidade para aplicação da metodologia PBL, permitindo a abordagem de problemas que envolvem desde a localização dos robôs e o mapeamento de ambientes até a interação homem/máquina, passando pela navegação autônoma e pela aquisição e processamento de dados

Veículos autônomos

Os carros modernos integram conhecimentos de diversas especialidades e são fruto de avanços tecnológicos recentes que os transformaram em máquinas de



deslocamento em grande escala, inteligentes e dotadas de recursos de entretenimento. Entre suas novas capacidades, destaca-se a navegação autônoma em diferentes ambientes. Veículos autônomos são capazes de perceber o ambiente ao redor, tomar decisões e navegar com segurança sem intervenção humana, demonstrando grande potencial para solucionar diversos problemas do transporte moderno (Lim e Taeihagh, 2018). Seu uso disseminado pode reduzir as emissões de poluentes e o consumo de energia, além de proporcionar ganhos econômicos e sociais por meio de uma gestão mais eficiente do tráfego e do fácil acesso aos meios de transporte. Além disso, espera-se que promovam melhorias significativas na segurança (Guerrero-Ibanez, Zeadally e Contreras-Castillo, 2015). No âmbito universitário, protótipos em pequena escala podem ser projetados e construídos como ferramentas de validação experimental de resultados de pesquisa e como recursos de apoio ao ensino. Entre as possibilidades, destaca-se o uso laboratorial em disciplinas de controle e servomecanismos, eletrônica e programação.

Robôs de competição

A robótica é multidisciplinar e requer conhecimentos de diferentes áreas, sendo suas atividades tipicamente mais produtivas quando realizadas em grupo. Assim, ela tem potencial para ser uma ótima ferramenta de auxílio ao ensino, fato comprovado pela realização de diversos eventos educacionais na área, que geralmente envolvem competições de robôs com diversos objetivos. Como exemplo de aplicação da abordagem PBL no desenvolvimento de robôs de competição e seu uso para motivar alunos e complementar disciplinas teóricas, cita-se a construção de um time de futebol de robôs para a categoria IEEE Very Small Size Soccer (VSSS). Criar robôs jogadores de futebol por si só não é uma ação que produza impactos sociais ou econômicos significativos, embora as conquistas alcançadas durante seu desenvolvimento levem a grandes avanços. Na classe IEEE VSSS 3x3, dois times de três robôs autônomos jogam uma partida controlada por um sistema computacional externo que processa imagens de uma câmera posicionada acima do campo. A empreitada envolve desafios desde o projeto mecânico até a navegação autônoma simultânea de robôs, incluindo projeto e testes eletrônicos, fabricação, desenvolvimento de sistemas de controle e visão computacional.



METODOLOGIA

A proposta de desenvolvimento de simulações realistas e protótipos de pequena escala como apoio ao ensino é integrada a projetos coordenados e a orientações realizadas pelo autor, permeando trabalhos de diferentes esferas. Integra-se alunos de Iniciação Científica (IC), Iniciação Científica Junior (ICJr), Programa Institucional de Bolsas de Desenvolvimento Tecnológico e de Inovação (PIBITI), monitoria, grupos discentes – como a equipe de robótica da UERJ (UERJBotz) e o grupo de robótica e automação (RAS) do Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE) –, Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC) e de mestrado. Ademais, a interação entre o coordenador e os demais professores da instituição ocorre com o intuito de discutir necessidades, aplicações e materiais de apoio cuja produção seja considerada relevante. Essa interação é formalizada no escopo de um projeto apoiado pela UERJ, no âmbito do Programa Prodocência, que financia cinco bolsas na modalidade acadêmico-profissional para alunos e uma bolsa de coordenação, cujo fluxograma é apresentado na Figura 1.

Para viabilizar a interação entre todos os envolvidos, utiliza-se a ferramenta *Google Classroom*, cujo acesso é fornecido pela UERJ, como centralizadora das comunicações entre os membros das equipes, bem como repositório de material associado e ferramenta de estabelecimento e acompanhamento de metas. Desse modo, todos os envolvidos têm à disposição documentação de apoio, vídeos de seminários já realizados sobre temas de interesse, códigos de simulações entre outros, o que os permite a interação, que se tire dúvidas e a inclusão de novos materiais a qualquer momento. Reuniões entre o coordenador e os alunos são realizadas para acompanhamento e avaliação do trabalho. A maior parte das atividades são realizadas nos laboratórios de Engenharia Elétrica (LEE) da Faculdade de Engenharia (FEN) da UERJ.

RESULTADOS

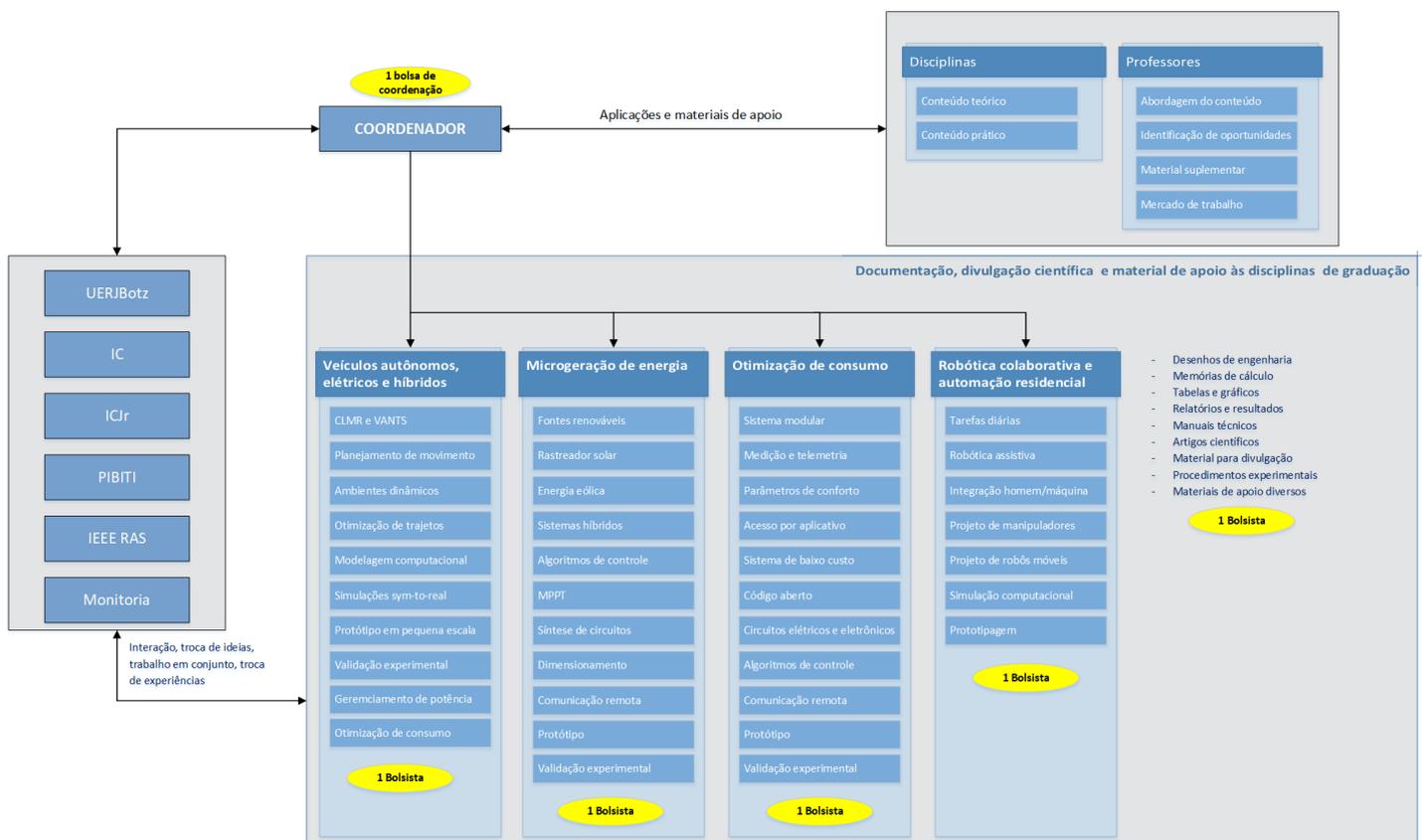
Um rastreador solar é um sistema capaz de modificar sua orientação ao longo do dia para que esteja sempre direcionado para o sol. É uma característica útil em sistemas de geração fotovoltaica, que pode elevar a sua eficiência significativamente. Do ponto de vista da pesquisa e desenvolvimento, um protótipo em pequena escala de um gerador fotovoltaico com rastreador solar pode ser utilizado para validar propostas de controle com foco na otimização da geração



de energia, testar arquiteturas e metodologias de comunicação e integração com sistemas de automação residencial, entre outras possibilidades. Por sua vez, sob a perspectiva do ensino, o protótipo permite a aplicação de conceitos de síntese e o projeto de circuitos eletrônicos, eletrônica de potência, controle e instrumentação, processamento de sinais e projeto mecânico.

Um protótipo em pequena escala desse tipo de sistema foi desenvolvido por alunos. Com uma abordagem baseada em PBL, sua primeira versão foi utilizada para investigar algoritmos de rastreamento solar, avaliar mecanismos de movimentação e implementar circuitos de instrumentação e controle. Seu aspecto geral é apresentado na Figura 2(a). Testes de campo compararam seu desempenho com o de um painel fotovoltaico fixo com especificações semelhantes, resultando em um ganho de 48,5 %. A comparação com trabalhos similares da literatura validou seu desempenho e suas características de baixo custo (Revoredo, Ribeiro e Leitão, 2019).

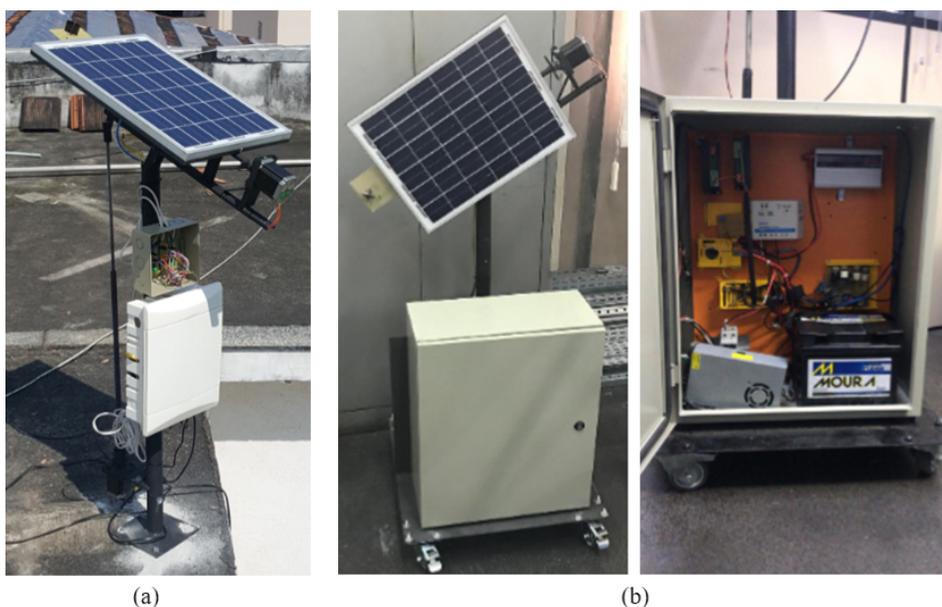
Figura 1 – Integração entre alunos de diferentes esferas



Fonte: elaborada pelo autor.

Para ampliar as possibilidades de PD&I e ensino, o protótipo foi aprimorado. A síntese de circuitos eletrônicos, a adaptação a um grau de proteção IP adequado, a adição de bateria e conversor de energia (para operação desconectada da rede elétrica), bem como a incorporação de sensores de temperatura e umidade para monitoramento das condições operacionais, são exemplos de modificações realizadas – além da utilização de estruturas impressas em 3D para melhor acomodar os subsistemas. Um sistema de monitoramento remoto também foi desenvolvido para a aquisição de dados operacionais a distância (Netto *et al.*, 2023). A comunicação é feita por meio de rede GPRS, com um sistema baseado em um microprocessador Raspberry Pi 3 e um modem celular, e os registros são enviados e processados em uma plataforma de livre acesso (Mathworks, 2018). A Figura 2(b) apresenta o sistema atualizado.

Figura 2 – Protótipo de sistema de microgeração fotovoltaico; (a) versão 1 e (b) versão 2

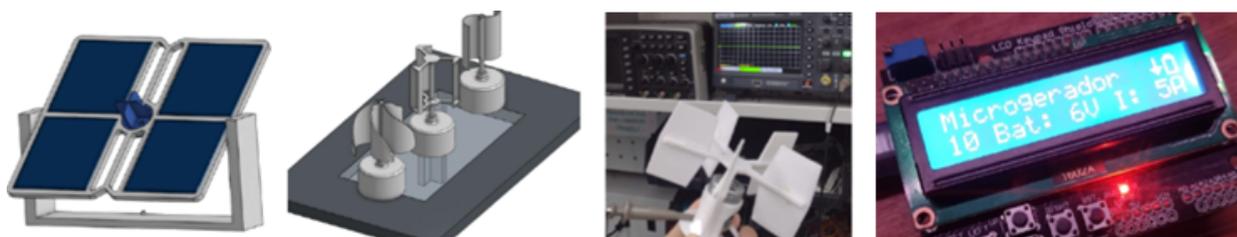


Fonte: elaborada pelo autor.

Um sistema de microgeração híbrido de menor escala está também em desenvolvimento como outro resultado da abordagem PBL. Trata-se uma planta de geração solar-eólica baseada em Arduino, com turbinas de diferentes tipos impressas em 3D, um sistema fotovoltaico com rastreador solar e outros elementos. Pretende-se alcançar uma planta funcional para a validação de algoritmos de rastreamento do ponto de operação de máxima potência (MPPT), por exemplo,

bem como para demonstrações em salas de aula e feiras científicas. A Figura 3 ilustra alguns dos elementos que compõem a planta.

Figura 3 – Alguns componentes da planta de microgeração solar-eólica



Fonte: elaborada pelo autor.

Estudos sobre microgeração solar-eólica também foram explorados em simulação. Em Oliveira e Revoredo (2022), um modelo dinâmico de um sistema solar-eólico é apresentado, o qual permite a avaliação de cenários de demanda e implementação de estratégias de gestão de energia. A comparação de desempenho de dois algoritmos de MPPT baseados em técnicas de inteligência artificial é feita com base em dados reais coletados em uma estação meteorológica. Os resultados validam o modelo e dão base para projeto de algoritmos para aplicações específicas.

Outro resultado dos trabalhos aqui descritos é um sistema de baixo custo para monitorar e controlar elementos elétricos em uma casa. Modular, com sensores, atuadores, microcontroladores e capacidade de comunicação sem fio; o sistema realiza a aquisição de dados e envia sinais de comando para aparelhos em um ambiente doméstico. Os módulos são projetados para instalação sem alterações estruturais. O sistema provê valores atuais e históricos de corrente elétrica, temperatura ambiente e umidade por rede local ou internet, e o usuário pode comandar elementos remotamente. *Hardware* e *software* de código aberto fornecem escalabilidade, baixo custo e fácil atualização. A Figura 4 ilustra um módulo do sistema e uma tela do *software* desenvolvido. Experimentos demonstraram a capacidade do sistema de executar ações básicas de uma casa inteligente. Detalhes sobre projeto, fabricação, *software*, custos e experimentos poder ser conferidos em Azambuja e Revoredo (2023).

Entre as disciplinas do curso de Engenharia Eletrônica da UERJ que podem ser auxiliadas pela utilização desse protótipo, cita-se Eletrônica Analógica I a V, Eletrônica Industrial I e II, Técnicas Digitais I e II, Controle e Servomecanismos I, II e III, Princípios de Telecomunicações I e II, Microprocessadores entre outras.

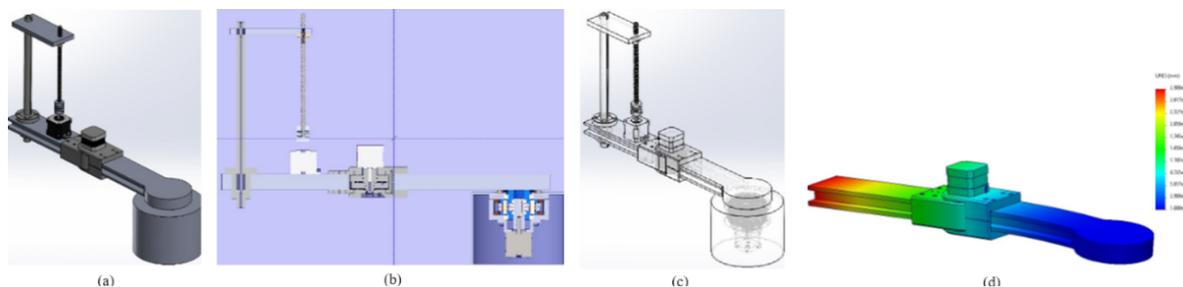
Figura 4 – Partes do sistema de telemetria e controle de energia; (a) controlador de interruptor e (b) tela do software com dados atuais e históricos



Fonte: elaborada pelo autor.

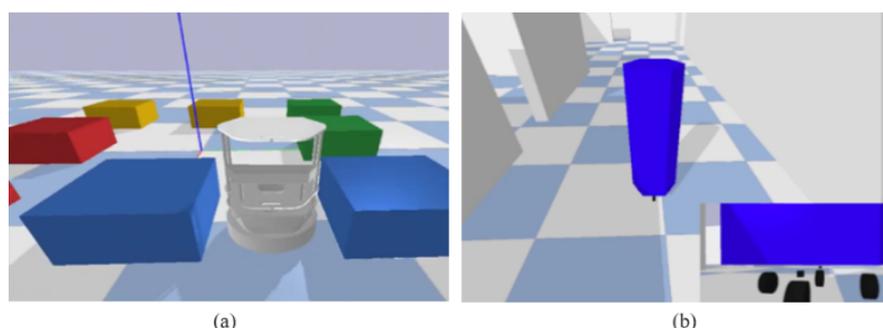
Entre os projetos desenvolvidos, alguns são direcionados à robótica de serviço e assistência. Embora ainda em estágio inicial, resultados já foram alcançados em dois tópicos: desenvolvimento de uma plataforma robótica aberta para simulação e fabricação de um braço robótico simples e desenvolvimento de um robô de atendimento/assistência que pode ser adaptado a aplicações, tais como direcionar pessoas em uma empresa ou auxiliar pacientes em um hospital.

Desenvolver um braço robótico simples impresso em 3D baseado em Arduino é um bom ponto de partida para motivar estudantes de graduação a trabalhar com robótica de manipuladores. Sabendo que Cinemática, dinâmica e controle de robôs não é uma matéria fácil, uma abordagem PBL partindo de um manipulador simples é uma boa introdução à robótica com objetivo de serviço ou assistência. O projeto se encontra em fase final de concepção e impressão 3D. Além da fabricação do *hardware*, também está em andamento o desenvolvimento de um ambiente de simulação, no qual algoritmos de planejamento e controle de movimento poderão ser testados antes de serem verificados no sistema real. O ambiente é baseado em uma plataforma de código aberto com linguagem python (PyBulet). Até o momento, o trabalho exigiu projeto estrutural, incluindo análise de tensões por elementos finitos (FEM), cálculos de carga e projeto de juntas e especificações eletrônicas e de instrumentação, e tem sido usado como exemplo de aplicação em alguns cursos de graduação. A Figura 5 apresenta desenhos do manipulador do robô e um exemplo da análise de tensões usando FEM.

Figura 5 – Braço robótico; (a) perspectiva (b) corte lateral (c) componentes internos (d) FEM

Fonte: elaborada pelo autor.

Outro projeto de robótica assistiva em desenvolvimento é um robô com capacidade de navegação autônoma em ambientes internos, que pode ser adaptado a diferentes tarefas, como recepcionar e direcionar convidados em escritórios, oficinas ou outros tipos de eventos, ou ainda se movimentar em hospitais, auxiliando pacientes e profissionais de saúde ao fornecer meios para conferência com um médico, medir sinais vitais ou transportar instrumentos e kits de ajuda. O projeto envolve alunos do Ensino Médio que trabalham com estratégias simples de navegação, prototipagem de impressão 3D de um robô diferencial simples e programação de tarefas elementares, como o uso de sensores ultrassônicos para medir a distância até uma entidade a ser evitada ou seguida. Alunos de graduação realizam modelagens cinemática e dinâmica e emulação física do robô, além de outras tarefas como processamento de imagens e comunicação/interação com humanos e máquinas. Alunos de pós-graduação estão envolvidos em tópicos avançados, como novas técnicas para navegação autônoma em ambientes complexos. A Figura 6 exemplifica as emulações realizadas. Na Figura 6(a) é mostrado um ambiente de simulação genérico, no qual o desvio de obstáculos é testado, enquanto a Figura 6(b) exemplifica o movimento do robô em um ambiente que simula um escritório real.

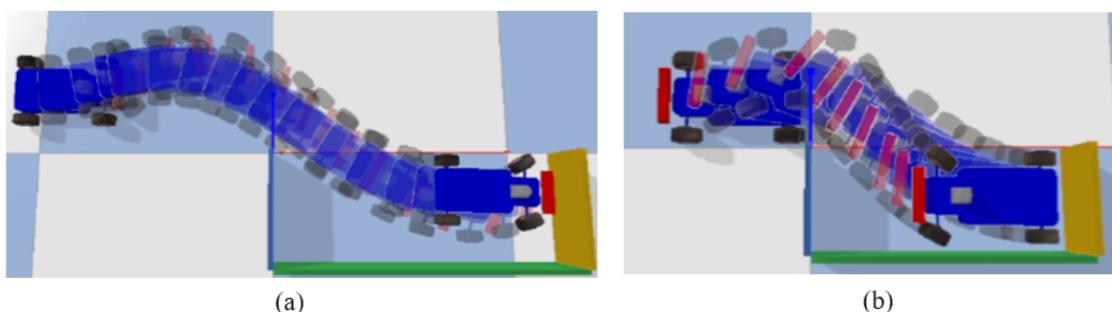
Figura 6 – Robô autônomo de serviço; (a) ambiente genérico (b) mapa de um ambiente real

Fonte: elaborada pelo autor.



Em termos de simulação, PyBullet e CARLA são utilizados para investigar aplicações de veículos autônomos, como estacionamento e navegação em ambientes complexos. Entre os trabalhos realizados com o PyBullet, destacam-se o planejamento e o seguimento de trajetórias para manobras de estacionamento, utilizando algoritmos genéticos, controle preditivo e algoritmos de perseguição pura (Vieira e Revoredo, 2022; Vieira, Argento e Revoredo, 2021), árvores aleatórias de exploração rápida (RRT) (Ferreira, Vieira e Revoredo, 2022), além de técnicas de aprendizado por reforço (Ferreira, 2022). As Figuras 7(a) e 7(b) ilustram exemplos de resultados obtidos no estacionamento paralelo de um veículo, utilizando marchas à frente ou à ré, com rastreamento da trajetória planejada por meio de um controlador de perseguição pura. O veículo executa movimentos contínuos e suaves para se posicionar corretamente na vaga, seguindo de forma eficiente os caminhos de referência, sem interrupções. Resultados adicionais de estacionamento autônomo, com diferentes algoritmos de planejamento de movimento, podem ser encontrados no link: <https://www.youtube.com/watch?v=3AZmfy57NqA>.

Figura 7 – Estacionamento paralelo; (a) marcha à frente (b) marcha à ré



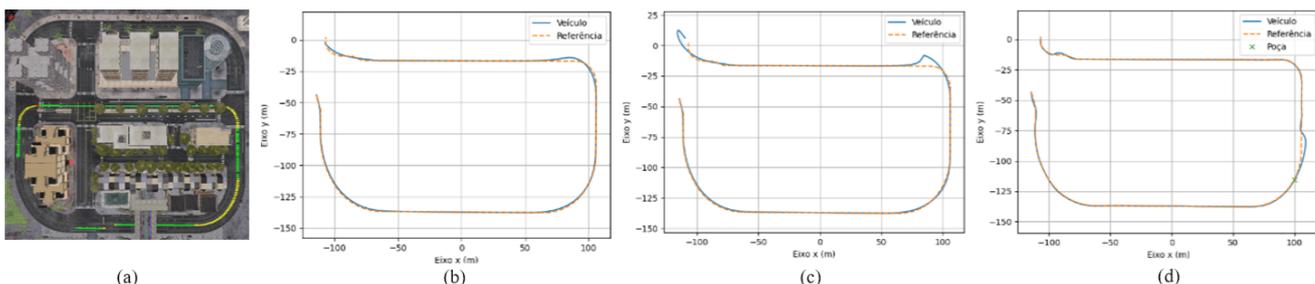
Fonte: elaborada pelo autor.

O simulador CARLA é usado para emular cenários difíceis ou impossíveis de avaliar com pequenos protótipos de baixo custo e quando um carro real não está disponível como plataforma experimental. Por exemplo, pode-se considerar a navegação autônoma em ambientes urbanos populosos, algo especialmente exigente devido à complexa dinâmica multiagente em cruzamentos de tráfego, à obrigação de rastrear e responder a movimentos de várias outras entidades, à necessidade de reconhecer placas de rua, semáforos e marcações rodoviárias entre outros. Construir uma configuração experimental que abrangeria diversos veículos, bem como vários sensores e sistemas de diferentes tipos, requer grande investimento e disponibilidade de espaço que, atualmente, não estão acessíveis

na UERJ. Assim, o CARLA se apresenta como uma alternativa para testar algoritmos de controle e navegação em cenários urbanos complexos encontrados em cidades inteligentes.

Como exemplo, cita-se o algoritmo proposto para guiar um carro autônomo ao longo de trajetórias planejadas em ambiente urbano, navegando em altas velocidades sem derrapar na ausência de tráfego, ou reduzindo a velocidade quando outros veículos estão presentes no caminho. A Figura 8 ilustra uma aplicação do algoritmo, apresentando a emulação de um carro elétrico Tesla Model 3 percorrendo uma rota em ambiente urbano sob diferentes condições climáticas. A Figura 8(a) mostra o caminho de referência dentro do cenário urbano, enquanto as Figuras 8(b) e 8(c) comprovam como o carro o rastreia em condições de pista seca e molhada. A Figura 8(d) evidencia a capacidade do algoritmo de lidar com perturbações: uma poça de óleo é encontrada pelo veículo no meio da segunda curva, fazendo com que ele se desvie temporariamente do caminho de referência, sendo rapidamente reposicionado pelo sistema de controle. Um vídeo demonstrando o carro executando diferentes rotas, tanto em condições secas quanto molhadas e com a presença de tráfego, pode ser acessado em: <https://www.youtube.com/watch?v=te0w5yKwuRs>.

Figura 8 – Carro autônomo em alta velocidade; (a) trajeto de referência (b) piso seco (c) sob chuva (d) óleo em uma curva



Fonte: elaborada pelo autor.

Além dos trabalhos de simulação, protótipos são projetados e fabricados para validar algoritmos de planejamento e controle de movimento do veículo, processamento de sinais e comunicação remota entre outros, assim como para uso em sala de aula como ferramenta de suporte para disciplinas como Sinais e sistemas e Teoria de controle. A Figura 10(c) apresenta a versão atual mais simples dos protótipos fabricados. O carro possui restrições cinemáticas não holonômicas, sendo, portanto, um bom paralelo, sob essa ótica, a carros convencionais usados em cidades. Ele compreende um chassi impresso em 3D no qual um



microprocessador Arduino, motores DC, servomotores, codificadores, sensores, reguladores de tensão, bateria, unidades inerciais e sistemas de comunicação são instalados.

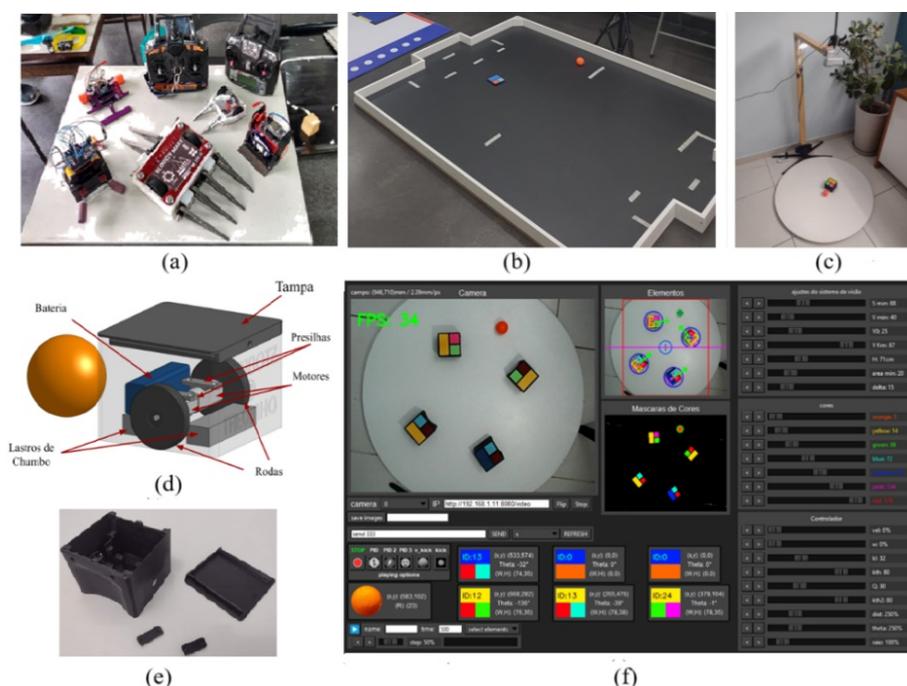
Os movimentos para frente e para trás são obtidos por motores DC acoplados às rodas traseiras, com uma ponte H para reverter o sentido. Sinais de modulação por largura de pulso controlam a velocidade angular das rodas, e codificadores estabelecem uma malha de realimentação. A distância para entidades à frente ou atrás é medida por sensores ultrassônicos. Giroscópio e acelerômetro fornecem medidas da movimentação, e a comunicação com sistemas externos é realizada por *Bluetooth*. O protótipo foi construído por alunos, incluindo modelagem 3D e a impressão de peças, integração de componentes, calibração e programação de sensores e validação experimental.

Em consonância com a proposta de emulação e prototipagem de sistemas de engenharia de baixo custo e código aberto, uma equipe discente focada na participação em competições e no ensino de robótica entre alunos de graduação e do Ensino Médio também atua aplicando a metodologia PBL na fabricação de diversos robôs. A UERJBotz é um agente estimulador de atividades de PD&I, competição e ensino entre alunos das diferentes especialidades de Engenharia da UERJ, promovendo trabalho colaborativo com objetivos técnicos, acadêmicos e sociais. Seus membros são estimulados a interagirem entre si e com os outros alunos de graduação e mestrado, trabalhando em temas afins. Embora a participação em competições tecnológicas de caráter educacional defina a linha mestra de atuação da UERJBotz, seus objetivos transcendem as competições, abrangendo também atividades de ensino e extensão. O sucesso do trabalho pode ser observado por diversos indicadores, tais como boas colocações em competições recentes, avaliações positivas dos alunos do projeto educacional realizado junto a alunos dos Ensino Fundamental e Médio, quantidade de visualização de vídeos e minicursos *on-line* realizados e, especialmente, pelo primeiro lugar no Prêmio de Extensão concedido pela UERJ no âmbito do Centro de Ciências e Tecnologia, em 2023.

Entre os robôs desenvolvidos para competições, cita-se lutadores de sumô radio controlados e autônomos, seguidores de linha, robôs de batalha em configurações com *hardware* e *software* aberto e com kits educacionais, além de robôs jogadores de futebol e veículos aéreos não tripulados. A Figura 9(a) ilustra alguns robôs fabricados pela UERJBotz. Como exemplo particular, as Figuras 9(b) a 9(f) apresentam um robô jogador de futebol, instalações de teste e um sistema de

monitoramento e controle desenvolvido pela equipe, o qual demandou o projeto e a implementação de sistemas mecânicos e eletrônicos, desenho de engenharia e impressão 3D, programação de microprocessadores, processamento de imagens, algoritmos de controle, entre outros aspectos. Esse projeto tem se consolidado como uma ferramenta de apoio para diversas disciplinas dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica da UERJ.

Figura 9 – (a) robôs de combate, seguidor de linha e sumô (b) campo de futebol (c) aparato de teste (d) jogador de futebol (e) jogador impresso (f) tela do software do futebol VSSS



Fonte: elaborada pelo autor.

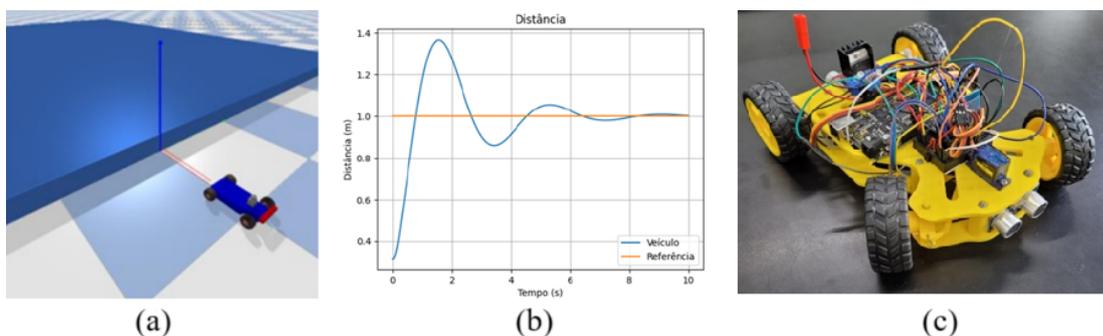
EXEMPLO DE APLICAÇÃO EM SALA DE AULA

Para exemplificar o uso dos sistemas descritos como ferramentas de apoio ao ensino, descreve-se simplificada e algumas tarefas de laboratório propostas na disciplina Controle e Servomecanismos I do curso de Engenharia Elétrica da UERJ. A disciplina é introdutória ao controle linear de sistemas, na qual são introduzidos conceitos tais como projeto de controladores proporcional-integral-derivativos (PID), sensores e atuadores para sistemas dinâmicos. Três tarefas que utilizam o protótipo de veículo autônomo apresentado anteriormente são aqui resumidas.

Em um primeiro momento, demanda-se aos alunos que se familiarizem com o protótipo para que sejam capazes de programá-lo e operá-lo. Nessa tarefa inicial, propõe-se que os alunos apresentem relatório com o seguinte conteúdo: descrição geral do protótipo; descrição dos componentes individuais que compõem o veículo (chassis, sensores de distância, Arduino, disco óptico, motores elétricos entre outros), incluindo considerações sobre calibração de sensores e operação do sistema (faixa de leitura dos sensores, procedimento de calibração entre outros); diagrama de ligação completo do veículo; descrição de procedimentos simples de operação, incluindo código executado e resultados alcançados – exemplo: comando dos motores para que o veículo se movimente para frente por um intervalo de tempo e interrompa movimento ao detectar um anteparo a uma certa distância.

Uma vez familiarizados com o protótipo, os alunos começam a utilizá-lo como ferramenta experimental para validar propostas de controle. Em um experimento específico, propõe-se o projeto de um controlador PID para que o veículo se mantenha a uma distância especificada de um anteparo móvel à frente. Antes do experimento, os alunos devem realizar uma simulação da aplicação em PyBullet, utilizando o modelo *racecar*, devidamente parametrizado com valores semelhantes aos do protótipo de pequena escala. As Figuras 10(a) e 10(b) exemplificam um ambiente de simulação criado por alunos e um gráfico da resposta a um anteparo fixo.

Figura 10 – simulação (a) veículo e ambiente (b) distância até o anteparo (c) protótipo



Fonte: elaborada pelo autor.

Após a simulação, os alunos devem validar experimentalmente o controlador proposto utilizando o protótipo de pequena escala. Os resultados medidos são comparados com os simulados, e as semelhanças e as diferenças são discutidas.



Nesse momento, exige-se a entrega de um relatório completo, formatado como artigo científico, discutindo teoria, simulação e resultados experimentais.

O protótipo de carro foi utilizado como plataforma experimental para a disciplina de Controle nos últimos dois semestres. A maioria dos alunos matriculados eram alunos da ênfase de Computação e praticamente todos avaliaram os experimentos realizados como uma ótima experiência. Cerca de 80% dos alunos afirmaram nunca ter utilizado programação de microcontroladores, impressão 3D ou protótipo de pequena escala de um sistema conhecido como suporte para experimentação durante os anos de faculdade. Integração de sistemas, noção de “projeto completo” de uma aplicação de engenharia e paralelo claro com um sistema prático foram os conhecimentos valiosos mais citados obtidos com o uso do protótipo durante as horas de laboratório.

CONCLUSÃO

Este trabalho resume resultados obtidos com uso de *hardware* e *software* de código aberto no desenvolvimento de protótipos de pequena escala e simulações realistas de baixo custo, utilizados como ferramentas de apoio ao Ensino de Engenharia. Os sistemas são construídos como parte de um cenário mais amplo de PD&I em temas convergentes associados às cidades inteligentes. São descritos uma planta de microgeração fotovoltaica monitorada remotamente, um carro autônomo e um sistema de gerenciamento e otimização de energia residencial, além de desenvolvimentos em curso de um sistema de microgeração solar-eólica, um manipulador robótico, um robô autônomo para atividades de assistência ou serviço e robôs de competição. Os principais atores na fabricação de todos os protótipos e nas emulações computacionais são alunos de graduação que colaboram em projetos com temas convergentes. Em sala de aula, os protótipos são usados para demonstrações e plataformas experimentais. Este último uso é exemplificado com uma breve descrição de experimentos usando o carro autônomo em uma disciplina de introdução à teoria de controle, na qual praticamente todos os alunos matriculados avaliaram os experimentos como ótima experiência. A relevância dos trabalhos também pode ser verificada pelo número de publicações a eles relacionadas, a maioria delas com estudantes de graduação. Apesar de as atividades descritas terem objetivo de auxiliar o Ensino



de Engenharia, já resultaram em sete artigos em periódicos e oito em conferências entre 2019 e 2023.

Agradecimentos

O autor agradece à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e à Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelo apoio na realização deste trabalho. A FAPERJ financiou a compra de equipamentos e peças com os projetos E-26/211.910/2021 e E-26/290.046/2023, e parte dos trabalhos descritos foram realizados no âmbito de um projeto Prodocência, por meio do qual a UERJ apoiou alunos e o coordenador com bolsas de estudo.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO. **What is Arduino?** arduino.cc, 05 fev. 2018. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 05 mai. 2024.
- AZAMBUJA, H. T.; REVOREDO, T. C. A low cost open-source energy monitoring and control system for smart homes. **Proceedings...** Symposium on the Internet of Things (SIoT), São Paulo, 2023.
- COUMANS, E. **Bullet 2.83 Physics SDK Manual**. [S.l.]: [s.n.], 2015.
- DIAS, P. V. *et al.* Fall detection monitoring system with position detection for elderly at indoor environments under supervision. **Proceedings...** 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), 2016.
- DOSOVITSKIY, A. *et al.* CARLA: An open urban driving simulator. **Proceedings...** 1st Conference on Robot Learning (CoRL), 2017.
- EUROPEAN COMMISSION. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast). [S.l.]: [s.n.], 2023.
- EXPRESSIF SYSTEMS. **ESP32**. Expressif, 2024. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 05 maio 2024.
- FERREIRA, J. P. B. **Árvores aleatórias de exploração rápida com técnicas de aprendizado de máquinas aplicadas à navegação de carros autônomos**. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2022.
- FERREIRA, J. P. B.; VIEIRA, R. P.; REVOREDO, T. C. Planejamento e seguimento de caminhos com árvores de exploração rápida e controle preditivo não-linear. **Anais...** Congresso Brasileiro de Automática, v. 24, p. 3139-3143, Fortaleza, 2022.



- GOOGLE. Google for Education. Google Classroom, 2024. Disponível em: <https://edu.google.com.br/workspace-for-education/classroom/>. Acesso em: 05 mai. 2024.
- GUERRERO-IBANEZ, J. A.; ZEADALLY, S.; CONTRERAS-CASTILLO, J. Integration challenges of intelligent transportation systems with connected vehicle, cloud computing, and internet of things technologies. **Proceedings...** IEEE Wireless Communications, v. 22, dec. 2015.
- INMETRO. **Portaria INMETRO/MDIC nº 23**. [S.l.]: [s.n.], 2024.
- LI, S.; ZHAO, S. The internet of things: A survey. **Information Systems Frontiers**, v. 17, 2014. p. 243-259.
- LIM, H. S. M.; TAEIHAGH, A. Autonomous vehicles for smart and sustainable cities: An in-depth exploration of privacy and cybersecurity implications. **Energies**, v. 11, 2018. p. 1-23.
- MATHWORKS. **The open IoT platform with MATLAB Analytics**. [S.l.]: [s.n.], 2018.
- MOREIRA, R. I. P. **Avaliação do potencial eólico em regime de microgeração**. Porto: Universidade do Porto, 2010.
- NETTO, G. A. *et al.* Implementação de um sistema fotovoltaico de rastreamento solar monitorado remotamente. **Anais...** Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), Manaus, 2023.
- NVIDIA CORPORATION. **NVIDIA Omniverse Documentation**. NVIDIA Omniverse, 2024. Disponível em: <https://docs.omniverse.nvidia.com/>. Acesso em: 05 mai. 2024.
- OLIVEIRA, P. H.; REVOREDO, T. C. Modeling and maximum power tracking of a solar-wind microgeneration system. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 144, abr. 2022.
- REVOREDO, T. C.; RIBEIRO, M. V.; LEITÃO, P. L. Especificação e prototipagem de um sistema de microgeração fotovoltaica com rastreamento solar. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 10, 2019.
- TANASIEV, V. *et al.* Enhancing environmental and energy monitoring of residential buildings through IoT. **Automation in Construction**, v. 126, 2021.
- TRIVODALIEV, K.; STOJKOSKA, B. R. A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, 2017.
- UNITED NATIONS. World Population Prospects 2019 Highlights ST/ESA/SER.A/423. Department of Economic and Social Affairs. [S.l.]: [s.n.], 2019.
- VIEIRA, R. P.; ARGENTO, E. V.; REVOREDO, T. C. Trajectory planning for car-like robots through curve parametrization and genetic algorithm optimization with applications to autonomous parking. **IEEE Latin America Transactions**, v. 20, 2021.
- VIEIRA, R. P.; REVOREDO, T. C. Path planning for automobile urban parking through curve parametrization and genetic algorithm optimization. **Proceedings...** 26th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2022.
- WEISS, M. C.; BERNARDES, R. C.; CONSONI, F. L. Cidades inteligentes como nova prática para o gerenciamento dos serviços e infraestruturas urbanas: a experiência da cidade de Porto Alegre. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 7, n. 3, 2015.