

Uma forma alternativa para o ensino de Amplificadores Operacionais utilizando um kit reconfigurável e expansível

Ricardo Costa, Paulo Portela, Gustavo Alves, Manuel Carlos Felgueiras and Clara Viegas
Politécnico of Porto ISEP/CIETI/LABORIS

Title— An alternative way of teaching Operational Amplifiers using a reconfigurable and expandable kit

Abstract— Early on, students must develop competences by implementing simple or complex electronic circuits with Operational Amplifiers (OpAmps). Traditionally, these skills were mainly developed in laboratory classes, but technology allows us to explore other and complementary ways of aiding students in this achievement. This paper presents a contribution to improve the way OpAmps are included in electronic engineering courses' curricula. A reconfigurable and expandable kit to teach electronic circuits based on the OpAmp uA741 was designed and implemented. This kit comprises a software application locally interfaced with a hardware platform capable of running in a PC. This platform includes a circuit with the OpAmp uA741 able to reconfigure according to a set of parameters defined by a software application. Its reconfiguration capability also enables the establishment of automatic connections for measuring and for applying signals to a reconfigured circuit, plus the ability to simulate the same or other OpAmp-based circuits. This paper provides an overview about the OpAmp uA741 and its relevance in engineering education. After presenting the kit and make some considerations for its improvement, at the end a brief discussion about its implementation in education according to specific educational strategies and methodologies are provided.

Index Terms— OpAmps, Electronic Reconfiguration; Simulation, Engineering education, E-learning, PBL, Flipped-classroom.

I. INTRODUÇÃO

Na literatura existem diversos métodos para o ensino da engenharia, onde a maioria tem como objetivo capturar a motivação dos alunos para o ensino da eletrónica [1][2]. A demonstração de fenómenos através de vídeos e simuladores interativos, são só alguns dos objetos de ensino que têm vindo a ser adotados na educação com sucesso e resultados bastante promissores [3]. Isto é particularmente importante no ensino da eletrónica, em especial no ensino de sensores eletrónicos, uma vez que a maioria destes são essencialmente analógicos, o que obriga à utilização de ferramentas educativas bem desenhadas. Apesar das experiências demonstrarem que o processamento digital tem vantagens relativamente ao processamento

analógico, tais como maior precisão e versatilidade para alterar o comportamento de um dado circuito, o ponto chave reside na questão de que a componente de processamento de qualquer sensor requer sempre conversões analógicas para digitais. Torna-se assim necessário o prévio processamento analógico dos sinais, mesmo que mais tarde estes sejam convertidos para o domínio digital. Esta evidência, aliada à necessária versatilidade no desenho de circuitos eletrónicos, no que se refere à capacidade de alterar o seu comportamento sem que seja necessário a substituição dos componentes, contribuiu para o surgimento de dispositivos analógicos reconfiguráveis, tais como os denominados *Field-Programmable Analog Arrays* (FPAA)¹ e os *Programmable System-on-Chips* (PSoC)². A tendência para a sua larga utilização no desenho de circuitos analógicos pode ter importantes implicações na estratégia do ensino, tal como referido em [4]. Contudo, qualquer que seja o dispositivo adotado para o desenho de circuitos analógicos, internamente eles contêm um ou mais Amplificadores Operacionais (AmpOps), indicando que este tipo de Circuito Integrado (CI) é ainda um dos mais importantes no desenho de circuitos eletrónicos. Torna-se assim importante entender a melhor forma de os ensinar de acordo com os melhores métodos ensino.

Ensinar e aprender eletrónica não se pode limitar à utilização de métodos centrados no professor, suportados pelos tradicionais ambientes em sala de aula. Novas estratégias têm vindo a ser adotadas na captura do interesse dos alunos e no incentivo à sua autonomia para a aprendizagem da eletrónica, como por exemplo a estratégia denominada por *flipped-classroom*. Esta estratégia é basicamente um tipo de ensino híbrido (*blended learning*) que inverte o tradicional ambiente de ensino através da disponibilização de conteúdos educativos fora da sala de aula tradicional, com bons resultados no ensino da engenharia eletrónica [5][6]. Novos e avançados objetos de ensino suportados pela estratégia do *flipped-classroom*, que pode incluir aproximações ao ensino à distância, têm vindo a incentivar à adoção da metodologia denominada por *Problem Based Learning* (PBL), que defende a autonomia dos alunos na resolução de problemas sob a orientação do

¹ *Field-Programmable Analog Array* (FPAA) trata-se de um dispositivo que contém blocos analógicos configuráveis. (e.g. de um conhecido fabricante: <http://www.anadigm.com/fpaa.asp>).

² *Programmable System-on-Chip* (PSoC) é uma família de microcontroladores da Cypress (<http://www.cypress.com/products/psoc-creator-integrated-design-environment-ide>). Estes circuitos integrados incluem uma unidade de processamento central e matrizes de sinais mistos configuráveis, integrando periféricos analógicos e digitais.

professor. Estudos recentes indicam a utilização desta metodologia com sucesso no ensino da eletrônica [7][8], quando utilizada em simultâneo com metodologias de ensino ativo (*active learning*), ou baseadas em experiências e projetos (*experiment and project learning*). Trata-se por isso de uma solução para o ensino de AmpOps, que tradicionalmente são os primeiros CIs a ensinar em todos os cursos de engenharia eletrônica. A simplicidade e utilidade dos AmpOps no desenho de circuitos eletrônicos simples ou complexos, e a sua massiva utilização em dispositivos eletrônicos, tais como FPAAs e PSoC, justifica, conforme já referido, a sua relevância, significando por isso que os alunos deverão adquirir bons conhecimentos sobre o seu funcionamento. A sua adoção por muitos dispositivos e circuitos eletrônicos, justifica a sua inclusão no *Curriculum* de todos os cursos de engenharia eletrônica. Entender a forma como funcionam e as aplicações onde são usualmente utilizados, torna-se por isso fundamental, obrigando o acesso a recursos educativos de boa qualidade e bem desenhados, de forma incentivar a adoção de novas estratégias e metodologias educativas.

Apesar das estratégias e métodos adotados, os investigadores educacionais estão de acordo que a atividade experimental é fundamental em engenharia [9][10][11] e, por isso, obrigatória em cursos de engenharia eletrônica, em particular no ensino e aprendizagem de AmpOps. Geralmente são adotados métodos educativos baseados em atividades teóricas, práticas e experimentais. Enquanto as duas primeiras atividades são facilmente incluídas em qualquer curso, uma vez que o único requisito é a disponibilização de conteúdos baseados em documentos e simulações, a atividade experimental pode ser mais difícil de incluir. Restrições temporais no *Curriculum* para a realização de uma particular atividade experimental, a falta de recursos financeiros para a aquisição de componentes e a falta de recursos para a construção de circuitos, são só algumas das possíveis dificuldades que professores e alunos podem enfrentar nos cursos de eletrônica. Apesar das diversas dificuldades, uma solução baseada num laboratório tradicional é bastante comum, mas na maioria das vezes os alunos têm de simular os circuitos utilizando software comercial, e têm de montar os circuitos numa placa de ligações (*breadboard*). Existem muitas ferramentas informáticas para simular circuitos de eletrônica (e.g. Multisim, Spice, etc.), mas algumas requerem licenças, com as inerentes despesas associadas, e a tarefa de montar um circuito numa placa de ligações pode tornar-se demorada e criar algumas dificuldades aos alunos, devido a ligações mal efetuadas entre os componentes, ruídos que possam aparecer, entre outras. Enquanto em algumas situações a exposição dos alunos às inerentes dificuldades na montagem de circuitos é um objetivo educativo, em muitas outras o principal objetivo é entender o funcionamento do circuito per-si, baseado na redefinição de componentes e parâmetros. Neste contexto, este artigo apresenta um kit reconfigurável e expansível capaz de ser reconfigurado com diferentes circuitos eletrônicos baseados num único AmpOp uA741. Atualmente este kit é acessível localmente e reconfigurado através de um computador. Inclui uma ferramenta para simular alguns circuitos tradicionais com AmpOps e permite a implementação real desses circuitos em hardware, tal

como num laboratório tradicional. A integração de uma ferramenta de simulação com a capacidade de experimentação real, é uma das características a destacar no kit.

Este artigo, que se trata de uma versão estendida e melhorada do artigo publicado na conferência TAEE 2018 [12], apresenta com mais detalhe uma análise estatística de um conjunto de respostas dadas por professores e especialistas em eletrônica sobre a utilidade do kit no ensino da engenharia eletrônica. São ainda apresentadas algumas considerações acerca da sua adoção com as estratégias e metodologias educacionais conhecidas por PBL e *flipped-classroom*.

Para além desta secção introdutória, o artigo é dividido em mais 6 secções. Na secção II é contextualizado os AmpOps na engenharia eletrônica, com a apresentação das suas características principais e de algumas plataformas educativas. A secção III descreve o kit desenvolvido, com uma descrição das suas características e funcionalidades. Com base nessas funcionalidades e na atual tendência da educação em engenharia, a secção IV sugere alguns melhoramentos ao kit, enquanto a secção V apresenta alguns comentários e opiniões fornecidos por professores e especialistas em eletrônica. Antes das conclusões, a secção VI menciona algumas considerações sobre a utilização do kit, de acordo com diferentes estratégias educativas.

II. AMPOPS NA ENGENHARIA ELETRÓNICA

A. A história

De acordo com a literatura [13], em 1943 um engenheiro americano de nome Loebe Julie desenvolveu o primeiro circuito amplificador operacional. A suas origens datam da era do tubo de vácuo, onde foi criado um retificador baseado num tudo de dois elementos inventado em 1904 por JA.A Fleming. Este dispositivo caracteriza-se por permitir o fluxo de corrente numa única direção, fornecendo a capacidade de retificação, tal como nos díodos. Dois anos mais tarde, em 1906, Lee De Forest melhorou o dispositivo, inventando um elemento baseado em 3 elementos de vácuo denominado por tríodo, que permite o controlo e a amplificação de corrente, tal como nos atuais transístores bipolares. Suportado nestes dois elementos de vácuo, mais tarde, em 1920 e nos inícios dos anos 30, nasceu o primeiro amplificador realimentado nos laboratórios da Bell Telephone (Bells Labs), liderando nos anos 40 a criação do primeiro AmpOp em tubo, que se tratava de uma forma genérica dos AmpOps realimentados baseados num tubo de vácuo. Devido à sua grande dimensão, consumo de potência, e volume, entre os anos 50 e 60 começaram a ser substituídos por AmpOps mais pequenos e de estado sólido, finalizando-se no primeiro AmpOp em CI, tal como o conhecemos nos dias de hoje. O primeiro AmpOp foi desenvolvido nos finais dos anos 60 pela empresa Fairchild com o modelo uA709, mais tarde substituído pelo bem conhecido uA741. Estes são construídos com base em transístores bipolares, mas mais recentemente os AmpOps começaram a ser construídos com base nas tecnologias FET e CMOS, cujos modelos

apresentam melhores desempenhos (e.g. LTC6268³, LTC6244⁴, LTC1052⁵), tais como menor consumo, melhores respostas dinâmicas e mais confiabilidade. Apesar desta evolução, o AmpOp uA741 é provavelmente o mais adotado nos cursos de engenharia para o ensino de AmpOps, essencialmente devido à sua boa confiabilidade e baixos preços, comparados com os restantes⁶.

B. Características e aplicações comuns

Apesar das inerentes diferenças entre os diferentes modelos de AmpOps, todos são classificados como dispositivos lineares internamente contruídos com vários semicondutores, resistências e/ou elementos capacitivos. Tradicionalmente utilizados com outros componentes, tais como resistências, transístores, díodos, condensadores, bobinas, entre outros, as suas características elétricas facilitam a implementação de circuitos simples ou complexos. Eles permitem o desenvolvimento de circuitos lineares e não lineares para implementar relações matemáticas, e para criar outros circuitos, tais como amplificadores, filtros, limitadores, etc.

Algumas das mais importantes características de um AmpOp são o seu elevado ganho em tensão e impedância de entrada, baixa impedância de saída, bem como um ganho em modo comum (*Common Mode Gain*, A_{cm}), usualmente especificado pela denominada Taxa de Rejeição em Modo Comum (*Common-Mode Rejection Ratio*, CMRR), que representa a capacidade do dispositivo em rejeitar sinais em modo comum. Este CI permite o estabelecimento de relações matemáticas específicas entre as tensões de entrada e de saída. Na figura 1 é apresentado o circuito genérico de um AmpOp contruído com base na tecnologia bipolar, bem como algumas importantes relações.

Desta forma, suportado nessas características, a utilização de AmpOps facilita a implementação de diversos circuitos de eletrónica que poderiam ser muito mais complexos de implementar se fossem utilizados componentes discretos. Mesmo assim, a implementação de circuitos com AmpOps requer a utilização desses componentes para a implementação de circuitos, a maioria deles seguindo esquemas em malha fechada. O esquema mais comum no ensino da engenharia eletrónica são os circuitos amplificadores inversores e não inversores, integradores e diferenciadores, uma vez que estes circuitos são básicos, cuja compreensão permitirá a implementação de circuitos bem mais complexos (e.g. filtros ativos).

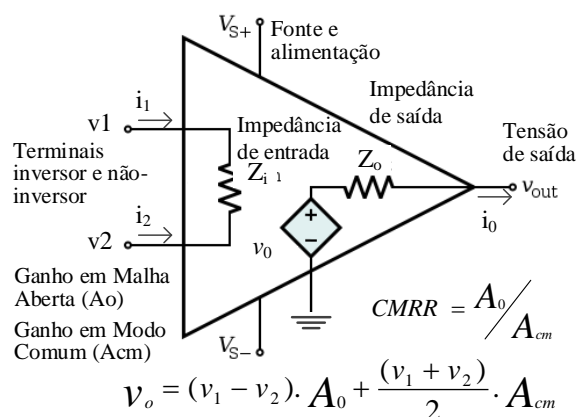


Fig. 1. Esquema de um AmpOp uA741 e algumas relações matemáticas.

C. Os AmpOps na educação

Apesar dos simuladores existentes que adotam modelos de AmpOps para simular circuitos, a sua inerente complexidade e as condições ambientais onde funcionam, podem originar comportamentos surpreendentes e impossíveis de considerar nos melhores e mais bem desenhados simuladores de software. Neste contexto, é muito comum ensinar os AmpOps não só utilizando a apresentação tradicional em sala de aula, realizando exercícios de papel e lápis algumas vezes complementados com simulações, mas também fornecendo atividades experimentais para os alunos, de forma a que estes possam compreender que simular por vezes não apresenta os mesmos resultados que uma experimentação real. A sensibilização para as inerentes dificuldades que a experimentação real pode colocar, deverão por isso ser transmitidas para todos os estudantes de engenharia, pelo que o desenho de circuitos de eletrónica utilizando componentes reais são fundamentais em qualquer bom curso de engenharia. Este requisito educacional justifica a existência no mercado de diversos kits com AmpOps, de forma a facilitar, motivar e aumentar a autonomia dos alunos.

Os kits utilizados para o desenho de circuitos de eletrónica baseados em AmpOps podem ser agrupados em: i) kits reconfiguráveis, que basicamente facilitam a montagem de circuitos através da alteração ou controlo dos valores dos componentes, e ii) kits baseados em cartas para facilitar a montagem de circuitos baseados em AmpOps. A tabela 1 fornece uma listagem de alguns kits, e apresenta dois exemplos. Apesar dos objetivos educativos se concentrarem no ensino dos AmpOps, estes dois grupos de kits têm por objetivo satisfazer distintos requisitos educativos. Torna-se por isso razoável afirmar que a utilização de kits reconfiguráveis facilita a verificação do funcionamento de AmpOps, enquanto kits baseados em cartas permitem um contacto mais direto com os componentes de eletrónica. Estes últimos servem essencialmente como um guia para facilitar a montagem de circuitos, expondo os alunos a um contacto mais direto com os componentes de eletrónica. Só algumas plataformas são exclusivamente dedicadas para o ensino e aprendizagem de AmpOps e a maioria delas não integra qualquer tipo de ferramenta para simulação, o que permitiria aos alunos complementar a componente experimental e prática requerida em todos os cursos de engenharia.


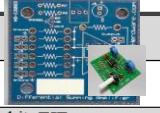
³ O LTC6268/LTC6269 é um AmpOp com frequências de operação na ordem dos 500 MHz baseado na tecnologia FET e caracteriza-se por ter correntes de polarização muito pequenas e baixas capacidades na entrada.

⁴ O LTC6244 é um AmpOp com ganho unitário baseado na tecnologia CMOS com largura de banda na ordem dos 50MHz, um *slew-rate* de 40V/ μ s, correntes de polarização de 1pA, baixas capacidades de entrada e a relação entrada-saída apresenta baixas perdas.

⁵ O LTC1052 e o LTC7652 são AmpOps denominados por apresentar baixíssimos ruídos (low noise zero-drift) e são fabricados usando o processo *Linear Technology's enhanced LTCMOS silicon gate*. A estabilização baseada na estabilização por Chopper (*Chopper-stabilization*) corrige continuamente o erro da tensão de *offset*.

⁶ Por exemplo, o modelo LTC6268 custa cerca de 10 vezes mais que o modelo uA714. Após uma breve pesquisa na Web o preço do LTC6268 é cerca de 5€ enquanto o do uA741 é de 0.50 €.

TABELA 1. ALGUNS KIT EDUCATIVOS COM AMP OPS DISPONÍVEIS NO MERCADO.

Reconfigurable	OpAmp Circuit Trainer: Ohm Technologies http://www.ohmtechnologies.com/lab-trainer-kits.html	
	OpAmp Training Kit: Delta Technologies http://www.deltatechnologies.co.in/op-amp-training-kit.htm	
	Basic Operational Amplifier: Acumen Labware http://www.acumenlabware.com/electronics-training-kits/basic-operational-amplifier.html	
	OpAmp Trainer Kit: Batra Trading Company http://www.btcinstrument.com/electronics-characteristics-curve-apparatus.html	
PCB-based	LM741 OpAmp IC with Development PCB Kit: NightFire http://vakits.com/op-amp-ic-development-design-kit-lm741	
	Voltage follower Operational Amplifier (buffer) kit: EID http://www.eidusa.com/Electronics_Kits_OP_AMP_BUFFER_1.htm	

Outros, tais como a NI-Elvis, para além de dispendiosas (cerca de 2500 euros) requerem dos alunos algum esforço para construir os circuitos, tal como num comum laboratório. Outro interessante produto comercial são as cartas da Lab Volt FACET⁷, que se tratam de sistemas comerciais preparados para a educação. A sua adoção pode ser considerada para o ensino de AmpOps e outros circuitos de eletrónica, conforme já reportado em [14]. No entanto, este trata-se de um produto comercial, com as inerentes despesas de aquisição e com a impossibilidade de facilmente alterar o seu desenho com vários e distintos componentes, o que poderá limitar a versatilidade requerida numa típica sala de aula. Desta forma, o fornecimento de kits bem desenhados, versáteis e a baixos preços focando-se numa componente particular no ensino, tal como o AmpOp, poderá motivar e facilitar as atividades dos alunos e professores. Adicionalmente, a integração num mesmo kit de uma ferramenta de simulação e de uma plataforma reconfigurável para a experimentação, facilitará a interface entre atividades práticas e experimentais, evitando assim a utilização de ferramentas em separado. Tendo isto em consideração, e com enfoque no ensino e na aprendizagem de AmpOps, foi projetado e desenvolvido um kit reconfigurável e expansível com um AmpOp uA741 possibilitando o desenho e a experimentação diferentes circuitos de eletrónica. O kit é controlado por um computador, que permite a substituição de componentes, e integra uma ferramenta de simulação para uma posterior verificação de alguns desses circuitos, conforme detalhado na próxima seção.

III. KIT DESENVOLVIDO

O kit desenvolvido permite efetuar simulações, configurações e experimentações de circuitos eletrónicos baseados no AmpOp uA741. É suportado por uma arquitetura local integrando uma plataforma de hardware acessível através de uma aplicação de software.

A. Arquitetura e funcionalidades

Conforme representado no diagrama de blocos da figura 2 e na imagem da figura 3, o kit inclui uma plataforma de hardware interligada a um PC através de uma ligação série.

⁷ <https://www.labvolt.com/products/facet-circuit-boards-and-courses>.

A plataforma pode interligar-se a instrumentos externos, e um PC permite correr uma aplicação de software para reconfigurar e simular circuitos de eletrónica configurados na própria plataforma. Esta inclui como principal elemento um AmpOp uA741 que permitirá a criação de diferentes circuitos para teste (e.g. circuito amplificador inversor, entre outros). A capacidade de reconfiguração fornecida pela plataforma é implementada através de um outro conjunto de componentes de eletrónica, tais como *multiplexers* analógicos, resistências digitais, etc.

A plataforma foi projetada e desenvolvida com a capacidade de ser expansível. Ela fornece um conjunto de pontos de conexão para a interligação de componentes externos em ramos específicos do circuito base, significando que a complexidade do circuito a experimentar pode ser maior ou menor consoante os componentes a interligar (e.g. resistências, condensadores, outros CIs, etc.). Através da utilização da ferramenta de software, os utilizadores poderão selecionar quais os circuitos a experimentar, através da integração de diferentes componentes nos diferentes ramos do circuito base. Para a medição ou aplicação de sinais elétricos em diferentes pontos do circuito, a plataforma permite ainda a ligação externa de instrumentos comerciais (e.g. osciloscópio, multímetro, gerador de funções, etc.). Antes de utilizar o kit, o professor deverá interligar alguns instrumentos em pontos particulares da plataforma de hardware. Mais tarde, os alunos deverão utilizar a aplicação de software para interligar as pontas de prova de cada instrumento em diferentes pontos do circuito configurado, de forma semelhante ao que fariam se utilizassem uma placa de ligações. Todas as interligações são efetuadas automaticamente, evitando erros e facilitando as medições.

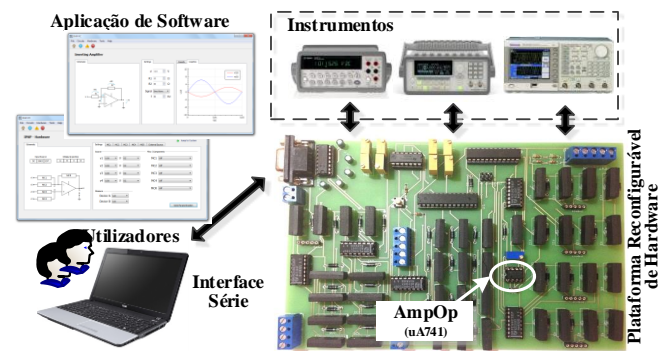


Fig. 2. A arquitetura genérica do kit implementado.

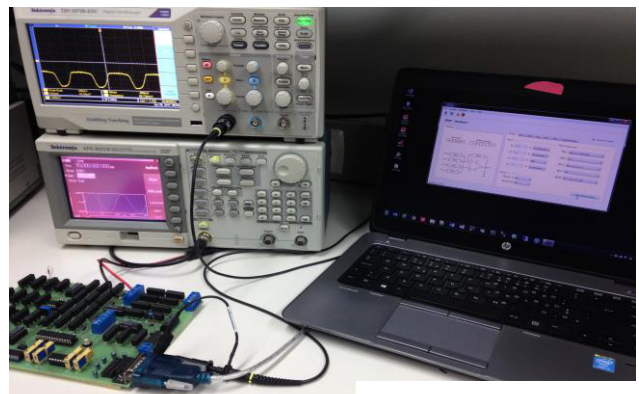


Fig. 3. Imagem do kit exemplificando a utilização de dois instrumentos externos (osciloscópio e gerador de funções).

B. Plataforma de hardware

O principal elemento do kit é a plataforma de hardware reconfigurável, cujo principal componente é o AmpOp uA741 que forma o circuito base capaz de ser interligado a outros componentes externos. Estes componentes podem ser agrupados através dos denominados Módulo de Componentes (MC). Adicionalmente, a plataforma fornece mais 4 terminais para interligar os instrumentos externos de forma a efetuar medições ou aplicar sinais elétricos ao circuito reconfigurado, nomeadamente; uma ligação série RS232 para estabelecer a interface ao PC, e um conjunto de terminais para alimentar a plataforma. Para permitir a reconfiguração automática com diferentes componentes fornecidos por um MC, a plataforma contém um conjunto de relés (9007-05-00 - Coto Technology) controlados através de um μ C (ATmega328/P). Uma resistência digital permite aos utilizadores o controlo de uma fonte interna DC que poderá alimentar o terminal de entrada de um circuito reconfigurado, em detrimento da utilização de uma fonte externa DC. A figura 4 ilustra alguns dos mais importantes interfaces e componentes existentes na plataforma.

Assim, a plataforma é reconfigurável com diferentes circuitos baseados nos MC disponíveis. Conforme ilustrado na figura 5, os utilizadores poderão conectar 2 MC a um terminal inversor, 2 MC ao terminal não-inversor, e 1 MC para estabelecer a ligação para a realimentação negativa do circuito. Os componentes incluídos em cada MC são selecionados com base na posição de um conjunto de relés. O MC conectado aos terminais de entrada forma os ramos MC-n, e estes são controlados por dois grupos distintos de relés (relés 1 - têm 3 relés; e relés 2 - têm 4 relés).

O MC que estabelece a malha de realimentação forma os ramos MC-F, e é controlada por um grupo de 2 relés. Cada MC poderá ser conectado à plataforma, e em particular a cada ramo do circuito principal, usando um ou quatro conjuntos de cinco terminais, como se exemplifica na figura 6. Estes terminais permitem interligar um MC aos terminais inversor ou não-inversor, ou estabelecer a malha de realimentação negativa de um circuito tradicional com AmpOp.

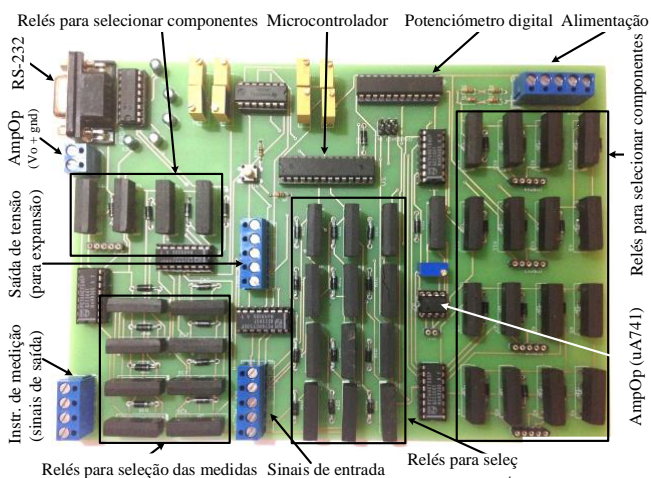


Fig. 4. Fotografia da plataforma de hardware reconfigurável com as diferentes interfaces e os componentes que a constituem.

Uma vez conectado o MC à plataforma, os utilizadores poderão selecionar um dado componente (ou conjunto de componentes). Esta seleção é efetuada através dos relés indicados, ligando-os ou desligando-os. Um MC poderá integrar diferentes tipos de componentes. O único requisito é que cada módulo deverá ter 4 terminais de entrada e um único terminal de saída. Internamente poderá ter resistências, condensadores, ou até circuitos eletrónicos específicos. É o utilizador (o professor) que decide qual será o MC disponibilizado no circuito base reconfigurável. Para efetuar as medições de sinais particulares do circuito reconfigurável, os utilizadores podem ainda colocar as pontas de prova dos instrumentos selecionados em diferentes pontos. Para a seleção de um componente, ou de um circuito fornecido por um MC, e para a seleção de cada ponto de medição, os utilizadores deverão utilizar a aplicação de software que permite ainda a simulação de alguns circuitos simples.

C. Funcionalidades da aplicação de software

A aplicação de software pertence ao kit desenvolvido e, conforme representado no diagrama da figura 7, contém duas funcionalidades base para analisar circuitos eletrónicos baseados no AmpOp uA741: i) simulação e ii) experimentação. A simulação de um circuito em particular é suportada por um conjunto de modelos matemáticos especificados na linguagem de software R⁸. Os resultados obtidos dessas simulações podem ser arquivados numa base de dados ou listados num ficheiro cvs (*comma delimited text file*, *.cvs) para futura análise. Para experimentar alguns (ou todos) os circuitos simulados, a aplicação de software permite a reconfiguração da plataforma.

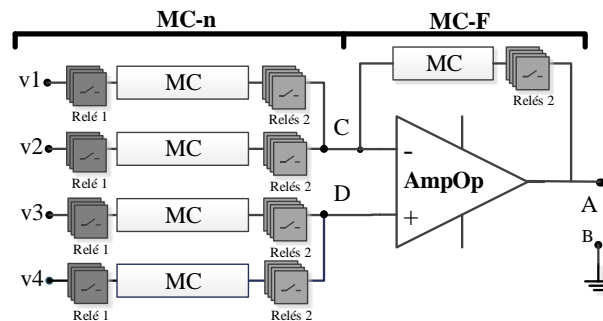


Fig. 5. Esquema da arquitetura do circuito base reconfigurável.

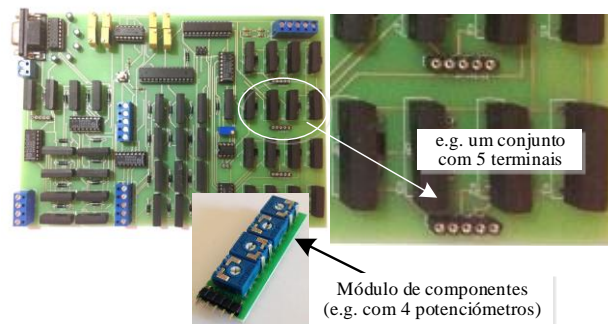


Fig. 6. Módulo de Componentes (MC) utilizado para configurar circuitos com o AmpOp uA741.

⁸ R é uma ferramenta de software grátis para análise estatística computacional e gráfica (<https://www.r-project.org>).

Conforme indicado, este processo envolve a seleção dos componentes fornecidos pelo MC disponível e interligado à plataforma, e a definição de alguns sinais de entrada interligados aos terminais inversores e não-inversor dos circuitos reconfigurados. Uma vez definidos, os utilizadores ficam habilitados a experimentar os circuitos através da especificação dos instrumentos de medição e da colocação das suas pontas de prova em pontos particulares do circuito. As medições são adquiridas através de instrumentos de medição interligados à plataforma.

Durante a realização de uma experiência, a aplicação de software comunica com a plataforma através da porta série, enviando comandos e recebendo respostas. Os comandos enviam informação para a plataforma de forma a ligar/desligar determinados relés, para definir a sinal de entrada, para especificar os pontos onde determinada ponta de prova é colocada, etc. De forma a facilitar a sincronização com a aplicação de software, o μC adotado, que interpreta todos os comandos e gera as respostas associadas, implementa internamente uma memória dividida em diferentes campos que especificam, em cada momento, a forma como a plataforma foi configurada com um circuito em particular. Toda a informação enviada por cada comando é recolhida para esta memória, de forma a que o μC possa ler para saber a atual configuração do circuito principal.

Conforme indicado, para simular um circuito em particular a aplicação de software deverá ter associada em conjunto de modelos matemáticos definidos por scripts escritos na linguagem de programação R. Estes scripts não requerem qualquer tipo de compilação, uma vez que são interpretados pelo módulo de software R já instalado no PC. Os parâmetros associados ao circuito, que permitem a simulação, e os resultados obtidos, são especificados num ficheiro em formato XML, facilitando a forma como estes são apresentados na interface da aplicação de software. Para experimentar um determinado circuito, os professores deverão interligar fisicamente um dado MC. Os alunos poderão configurar um determinado circuito e descrever os componentes disponíveis através de um ficheiro XML (*setting.xml*), de forma a que a aplicação de software o possa ler, e mostrar essa informação nas interfaces.

D. Interfaces da aplicação de software

A aplicação de software, cuja interface principal se encontra ilustrada na figura 8, inclui um conjunto de 4 botões, um menu principal e outras interfaces de painel. O conjunto de 4 botões permitem o controlo das simulações e experimentações (*run*-execução, *reset*-reinicialização, e *status*-estado, mais um menu de *help*-ajuda) e o menu principal tem mais 4 submenus, nomeadamente:

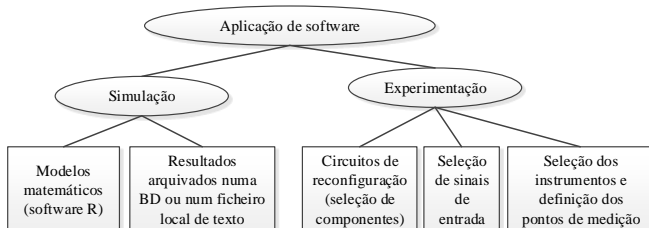


Fig. 7. Funcionalidades fornecidas pela aplicação de software.

- **File** (ficheiro): permite o acesso aos ficheiros R e a seleção de outros ficheiros para guardar os resultados das simulações numa base de dados ou em ficheiros cvs (*comma separated values* - *.cvs -);
- **Circuits** (circuitos): Acesso aos circuitos para a simulação;
- **Hardware**: Acesso à plataforma para a reconfiguração e experimentação de um dado circuito;
- **Tools** (ferramentas): Acesso à interface da webcam interligada ao PC para facilitar a observação das medidas;
- **Help** (ajuda): Informação sobre a aplicação de software.

Os painéis da interface mostram o esquema do circuito para a simulação, fornecem a possibilidade de os utilizadores selecionarem os parâmetros do circuito, e mostram os resultados da simulação. No exemplo ilustra-se a simulação e o layout de um amplificador inversor. A aplicação de software disponibiliza outros circuitos para simulação, em particular o amplificador inversor e o não inversor, o diferenciador, o integrador, o comparador, o seguidor de tensão, e mais um circuito parametrizável. Este último circuito permite que os utilizadores criem diferentes tipos de circuitos de acordo com os módulos R fornecidos pela aplicação de software. Isto significa que a aplicação de software pode ser expansível para outros circuitos, desde que estejam incluídos os modelos matemáticos escritos em R (esta possibilidade de atualização é da responsabilidade do professor ou de um técnico). Adicionalmente, o layout do circuito personalizado é semelhante às possibilidades fornecidas para configurar a plataforma. Isto significa que, após uma simulação, os utilizadores podem experimentar o mesmo circuito usando a plataforma de hardware, uma vez que o MC interligado está de acordo com os módulos R disponibilizados para a especificação de uma simulação. Assim, para realizar uma simulação os utilizadores deverão selecionar o submenu *circuitos* e escolher um circuito pré-definido ou um circuito parametrizável. Após a seleção do submenu *circuitos*, os utilizadores têm acesso ao esquema do circuito e a um painel, onde estes podem selecionar os valores de cada componente. Após realizar a simulação, os resultados serão obtidos e disponibilizados numa forma gráfica. Estes resultados poderão depois ser gravados numa base de dados ou num ficheiro de texto, através da seleção do menu *ficheiro*.

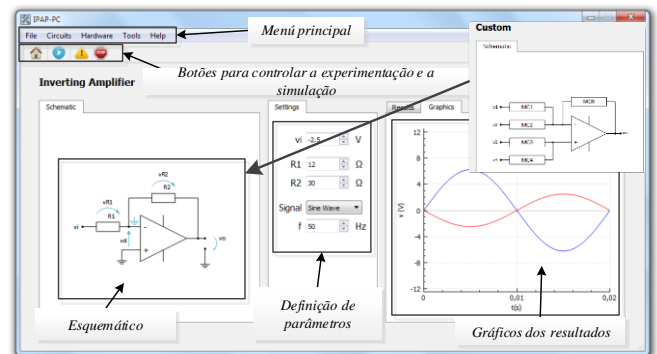


Fig. 8. Exemplo de uma interface para a simulação de circuitos.

Para a experimentação de um circuito em particular, os utilizadores deverão seleccionar o submenu *hardware* para aceder à interface ilustrada na figura 9. Esta interface fornece o esquema do circuito parametrizável que é basicamente o circuito principal com o AmpOp uA741 passível de ser reconfigurado através da alteração de um conjunto de parâmetros. Os componentes disponíveis na plataforma e a indicação de uma determinada entrada interligada a uma fonte externa, são indicadas em cada um dos restantes submenus selecionáveis através das diferentes barras de tarefas (*tabs*). Estes submenus são automaticamente preenchidos quando um particular MC ou fonte externa são interligados à plataforma, e o ficheiro XML associado (*settings.xml*) é editado. Esta tarefa é da responsabilidade do técnico ou do professor durante a preparação de uma experiência. Para a colocação das pontas de prova dos instrumentos interligados nos pontos acessíveis do circuito base (A, B, C ou D) da plataforma, os utilizadores deverão seleccionar as soluções disponíveis para cada um dos dispositivos. Uma vez definidos todos os parâmetros e as conexões das pontas de prova dos instrumentos, os utilizadores deverão enviar essa informação para a plataforma usando um botão denominado por *send parametrization*. Para possibilitar a comparação entre a simulação e a experimentação de um dado circuito, ambas as interfaces de simulação e de experimentação fornecem um botão para alternar entre elas. Contudo, nem todos os circuitos simulados podem ser testados experimentalmente, e vice-versa, uma vez que a simulação e a experimentação requerem uma preparação independente do kit. A experimentação requer a interligação de um MC e a definição de um ficheiro XML para descrever os componentes eletrónicos adotados. Simular um circuito requer a definição dos módulos matemáticos escritos em R. Obviamente, de forma a permitir que os alunos comparem as simulações com os resultados reais obtidos através das experimentações, é desejável que um circuito possa ser tanto simulado como experimentado.

IV. PERSPETIVAS PARA A SUA ADOÇÃO NO ENSINO

Atualmente o kit oferece algumas vantagens para os cursos de engenharia eletrónica. A possibilidade que este oferece aos alunos para desenhar circuitos usando um PC, ultrapassa algumas das limitações que estes teriam se usassem uma tradicional placa de ligações.

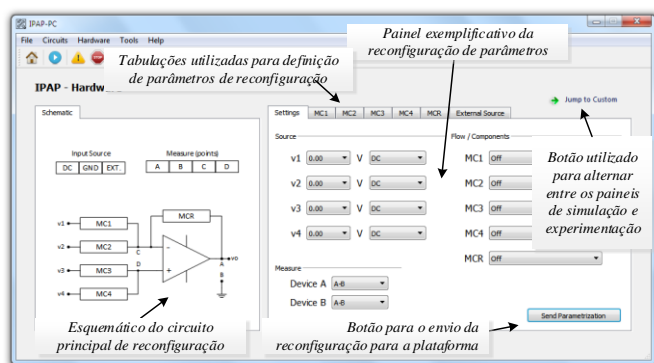


Fig. 9. Interface utilizada para reconfigurar e experimentar circuitos.

Usando um circuito passível de ser reconfigurado e/ou parametrizado com diferentes componentes permitirá ultrapassar problemas de ligações causados por erros humanos ou fios danificados, tradicionalmente são difíceis de detetar. Esta aproximação poderá limitar um relevante objetivo educativo, que se prende com a importância de expor os estudantes a possíveis problemas que possam surgir quando um determinado circuito é montado erradamente numa placa de ligações. No entanto, o kit facilita o desenho e a experimentação de um dado circuito.

A utilização deste kit num contexto educativo real deverá, por isso, ser avaliado com base nos seus objetivos educacionais. A facilidade que o kit fornece para a montagem de circuitos deverá ser considerada em situações onde o principal objetivo educativo reside na avaliação do comportamento do próprio circuito. Os problemas que tradicionalmente um aluno enfrenta quando monta um circuito nunca deverão ser o principal objetivo educativo. Adicionalmente, com este tipo de kit, os professores podem facilmente incluir as atividades experimentais de qualquer laboratório, uma vez que o tempo necessário para um aluno montar um circuito com um AmpOp é drasticamente reduzido, permitindo ainda acelerar as validações de teorias e de cálculos. Os alunos não precisam de se preocupar em recolher e interligar os componentes aos circuitos, atividades que tradicionalmente são muito consumidoras de tempo e em muitas situações não são um objetivo educativo. É ainda importante enfatizar a possibilidade que este kit oferece aos alunos para simular circuitos antes de os experimentar com componentes reais. Com o kit atual os alunos não necessitam de usar simuladores externos que poderiam trazer algumas desvantagens tais como; alguns deles não são grátis, outros requerem uma instalação de várias aplicações de software e de ferramentas específicas, e outros requerem um acesso Web para os utilizar, o que obrigaria à existência de uma ligação Web, que em algumas situações poderá não existir. Outro importante aspecto do kit é a sua expansibilidade. Ele fornece a possibilidade de adicionar MC simples ou complexos em alguns ramos do circuito principal. Os professores podem fornecer esse MC aos alunos, ou inseri-los no kit, expandindo desta forma os circuitos possíveis de experimentar sem que haja a necessidade de solicitar aos alunos a interligação física dos componentes, tal como usualmente fazem numa tradicional placa de ligações.

Apesar da flexibilidade que a atual versão fornece para reconfigurar e expandir circuitos baseados num AmpOp, o kit tem algumas limitações que são importantes considerar em melhoramentos futuros. Atualmente é impossível implementar malhas com realimentações positivas, e é difícil implementar circuitos que requeiram ramos mais complexos (e.g. o denominado filtro passa baixo Sallen-Key requereria imensas ligações externas). Além disso, atualmente o kit só permite simulações / experimentações locais. A sua aplicação numa tradicional aula laboratorial requereria que cada aluno ou grupo de alunos possuíssem um destes kits. Apesar do kit facilitar a simulação de circuitos sem recurso a qualquer simulador comercial de software e a montagem de circuitos com componentes reais, os custos associados para ter diversos kits disponíveis num laboratório podem tornar-se numa solução proibitiva. Isto

significa que a sua adoção num laboratório tradicional não é possível se os custos forem algo a considerar. Assim, para ultrapassar o problema dos custos associados, o acesso remoto ao kit como um laboratório remoto é uma solução a considerar em desenvolvimentos futuros. Um vez que o kit é controlado por um PC, o seu acesso remoto é uma evolução natural que tem sido vista como uma mais valia e como um complemento aos tradicionais laboratórios e às simulações para melhorar os objetivos educativos na engenharia [15][16].

O acesso à plataforma de hardware pode ser implementado de dois modos: i) sincronamente ou assincronamente. No modo síncrono, existe uma reserva de um espaço temporal para os alunos acederem ao laboratório. No modo assíncrono os alunos podem utilizar a plataforma quando entenderem, definindo as configurações e adquirindo os respetivos resultados. Uma publicação descrevendo a solução para experimentar circuitos eletrónicos usando um modo assíncrono já foi efetuada em [17], mas a sua aplicação na educação não teve continuidade. Um típico e bem testado laboratório remoto que utiliza este modo de acesso é o sistema VISIR [18]. Este é atualmente bem aceite na comunidade educativa [19][20] e tem sido adotado em diferentes instituições Europeias (Portugal, Espanha, Suécia, etc.). Adicionalmente, um projeto ERASMUS+, denominado VISIR+, disseminou a sua adoção em países da América latina através da sua integração como uma importante ferramenta educativa nos cursos de engenharia eletrónica [21][22]. Contudo, e apesar da maturidade do sistema VISIR, que o torna numa solução educativa relevante, ele não é exclusivamente dedicado para circuitos com AmpOps, e não fornece nenhuma ferramenta de simulação que poderia facilitar a integração de atividades praticas e experimentais numa única ferramenta. Além disso, é um sistema dispendioso (pode custar cerca de 20.000 €) e requer que os utilizadores criem os circuitos usando uma placa de ligações virtual, o que poderá não ser um dos objetivos educativos de um curso. Apesar de se poder utilizar o kit atual num curso de engenharia para dar suporte às aulas experimentais, o acesso remoto será um importante melhoramento a considerar em futuros desenvolvimentos, uma vez que permitirá reduzir os custos associados que poderão existir se vários kits forem necessários adotar numa aula laboratorial.

Apesar de todas as considerações apresentadas nesta secção serem suportadas na opinião dos autores, foi decidido recolher opiniões de outros investigadores e professores sobre o kit, nomeadamente sobre a sua relevância para o ensino da engenharia eletrotécnica, em particular para o ensino de circuitos baseados no AmpOp uA741.

V. PERCEÇÃO DOS PROFESSORES NA UTILIZAÇÃO DO KIT

Para melhor entender a relevância educativa na utilização do kit na engenharia eletrónica, e a sua possível implementação didática, o kit foi demonstrado numa sessão técnica a um grupo de professores e de especialistas [23]. Durante a demonstração foram preparados alguns circuitos simples com um AmpOp, nomeadamente um inversor e um não inversor, um integrador e um diferenciador. Colocado numa bancada laboratorial, os participantes tiveram oportunidade de verificar o comportamento dos diversos circuitos. Após a

demonstração e a discussão do propósito e características do kit, onde os participantes partilharam as suas opiniões e discutiram as suas dúvidas, foi-lhes pedido para preencherem um questionário endereçando o seu ponto de vista sobre o seu valor educativo, e o potencial interesse para a utilização desta ferramenta. Este questionário, cujas respostas são apresentadas na tabela 2, foi essencialmente dividido em 3 partes: Parte I para entender o background dos participantes; Parte II para avaliar a sua perceção sobre o seu valor educativo; e Parte III para avaliar a sua recetividade na adoção deste kit nas suas aulas. Este questionário foi previamente apresentado a 3 professores-investigadores na área, que o validou após discutirem a relevância e clareza das questões formuladas tendo por base os objetivos propostos a atingir. Apesar do reduzido número de participantes (10 participantes), eles representam um grupo aleatório de diferentes universidades e países. Todos eram investigadores ativos na área, e alguns tinham vários anos de ensino na área da eletrónica. Assim, neste estudo as suas opiniões foram consideradas representativas para validar o valor educativo que o kit representa para o ensino e a aprendizagem da engenharia eletrónica.

Observando globalmente os resultados apresentados na tabela 2, torna-se evidente que o kit promoveu o interesse dos participantes, uma vez que uma grande maioria indicou que gostaria de utilizá-lo nas suas aulas, mesmo que não estivessem a ensinar a temática associada. É de notar também que o acesso remoto é um requisito para dois dos participantes, enquanto os restantes não colocam qualquer entrave na sua utilização tal como está (só com acesso local). É notório que os professores com mais anos de ensino consideram esta ferramenta mais útil para dar suporte aos alunos nas suas atividades académicas - uma correlação positiva é encontrada entre estas duas variáveis (correlação Spearman's Rank, $p=0,043$).

TABELA 2: QUESTIONÁRIO SOBRE A PERCEÇÃO DOS PROFESSORES NA UTILIZAÇÃO DO KIT.

Participant #:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Years of expertise in the area	1	18	6	20	2	2	26	11	25	5
Did you teach the contents supported by the educational kit ?	Y	Y	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y
If yes: Is it usual doing laboratorial experiments with the students about the thematic supported by the kit?	Y	Y					Y	Y	Y	Y
If yes: Did you already use similar tools in your classes?	N	N					Y*	Y*	Y	N
If you adopt this kit in the classes (select the best options):										
What would be the benefits?										
i. Contribution to consolidate the knowledge in the thematic.	✓		✓						✓	✓
ii. Contribution to integrate the knowledge						✓				✓
iii. Contribution to contextualize the theoretical part of classes.	✓			✓	✓		✓			✓
iv. Promote experimental competences.				✓	✓		✓	✓	✓	✓
v. Support students during their learning.							✓	✓	✓	
vi. Reduce the required time to explore the thematic.								✓		
vii. Improve the teaching methodologies.	✓					✓	✓		✓	✓
viii. Expand the adopted resources.		✓								
ix. Improve the students' motivation and enthusiasm.						✓				✓
What difficulties do you preview?	*1									
i. Lack of time.				✓						
ii. Lack of technical means.						✓		✓		✓
iii. Lack of effort by the students.		✓	✓	✓						
iv. Lack of colleagues' support.					✓		✓			
v. Lack of relevance for the learning outcomes.										
vi. Lack of know-how facing problems or students' feedback.							✓		✓	Y
Would you like to have this resource available to support your classes?	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y
.... and if it was remotely accessible?	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

*1 - "Had to implement a couple of circuits";

*2 - "Oscilloscope, wave-generator, bread-board circuits"

*3 - "Custom design"

O facto de ensinarem (ou não) estes conteúdos, não parece influenciar na perceção, mas a sua experiência com ferramentas similares já é importante. De facto, a perceção de professores que já tenham ensinado com ferramentas similares, em relação aos outros, já parece ter influência na sua perceção sobre o mais valia que esta ferramenta terá para o ensino (Chi-square test, $p=0,014$). É também interessante observar que os participantes selecionaram vários benefícios na utilização deste kit na educação, em particular a promoção de competências experimentais que pode trazer para os utilizadores (os alunos), e muitos deles veem a sua adoção como um contributo para contextualizar a parte teórica nas aulas. Foi encontrada uma correlação (correlação Spearman's Rank correlation, $p=0,009$) entre o grupo de respostas sobre a perceção dos benefícios do kit para o ensino, e o grupo de respostas sobre a perceção das vantagens para aprendizagem dos alunos. Esta evidência indica que os professores consideram esta ferramenta importante para o ensino e aprendizagem. Outro curioso resultado é que quanto mais os professores identificam limitações ao kit, mais o consideram útil para a promoção de competências experimentais (correlação Spearman's Rank, $p=0,046$). Este resultado particular poderá indicar que os professores estão sensibilizados para as dificuldades e para a importância de colocar em prática novas metodologias e recursos na educação. As dificuldades particulares na utilização do kit não foram identificadas com unanimidade. A falta de esforço dos alunos, falta de meios técnicos e know-how para enfrentar problemas, ou o feedback dos alunos, foram apontados como as mais prováveis. Complementando a nossa análise com comentários informais dos participantes realizados durante a apresentação, indica que do ponto de vista dos professores, o kit seria interessante, mas iria requerer uma apresentação prévia aos alunos, de forma a que eles pudessem entender a versatilidade oferecida para simplificar e facilitar o desenho de circuitos eletrónicos baseados no AmpOp uA741. Adicionalmente, de acordo com os comentários obtidos, é razoável afirmar que os professores veem o suporte técnico como fundamental para a utilização do kit, de forma a ultrapassar possíveis problemas. É ainda interessante notar que os constrangimentos para ensinar usando o kit não afetam a vontade dos professores em usá-lo (não foi encontrada qualquer relação). No fim, e por unanimidade, todos os participantes indicaram que o acesso remoto ao kit iria incentivar à sua adoção, apesar da maioria deles já ter indicado o seu interesse em utilizá-lo, tal como se encontra, nas suas aulas. Estes resultados justificam e incentivam alguns melhoramentos ao kit, em particular o desenvolvimento do acesso remoto. Em paralelo, endereçando algumas preocupações dos professores e as mais valias da ferramenta, uma implementação didática poderá ser mais tarde desenhada num cenário educativo real, que poderá seguir a metodologia PBL e a estratégia *flipped-classroom*.

VI. ADOÇÃO NA EDUCAÇÃO

Com base nos resultados e sugestões obtidos, a ideia de transformar o kit numa implementação didática foi consolidada. Esta pode ser conseguida utilizando diferentes metodologias, como um módulo educacional ou como um

recurso para complementar os métodos tradicionais de ensino e aprendizagem adotados nos cursos de engenharia eletrónica [24]. Este kit simplifica a forma como os circuitos com AmpOps podem ser desenhados, uma vez que os alunos não precisam de interligar os componentes com fios. Uma vez que se reduz o risco de se efetuarem ligações erradas, o que iria dispersar a atenção dos alunos do objetivo principal, estes poderão concentrar-se no circuito em estudo. Simplificando o processo de montagem de circuitos, a autonomia dos alunos aumentará, bem como o seu processo ativo na aprendizagem, contribuindo para um aumento da sua motivação para o trabalho experimental.

Este kit pode ainda ser um importante recurso para usar no ensino tradicional centrado nas aulas teóricas. Atualmente o tempo curricular nos cursos de engenharia eletrónica não permite explorar todos os circuitos importantes com AmpOps. É muito comum que a maioria dos circuitos sejam apresentados teoricamente sem qualquer verificação ou validação, originando a que na maioria do tempo os alunos não deem a devida importância a alguns conceitos teóricos. Através da utilização deste kit, os professores têm um recurso educativo adicional para usar nas suas aulas. Para além de uma apresentação teórica de circuitos com uma análise matemática do seu comportamento, os professores podem demonstrar o seu funcionamento. Tal como os alunos, eles podem simular e montar diferentes circuitos sem que seja necessário interligar os componentes com fios, demonstrando o seu funcionamento e as diferenças entre a realidade e a simulação. De facto, o kit fornece ainda a possibilidade dos professores verificarem a operação real dos circuitos, em detrimento de só simulá-los. Uma vez que o kit fornece a possibilidade de simulação e experimentação, os professores poderão usar esta facilidade para enfatizar a importância da experimentação real. As diferenças comuns entre simular e experimentar um circuito é, por si só, um aspeto motivacional para os alunos. É muito comum que os alunos não confiem totalmente em simulações cujos resultados não estão de acordo com cálculos efetuados previamente. Se existirem diferenças entre a análise matemática e a simulação, os alunos tendem a apontar problemas ao software de simulação, mesmo que este seja um produto muito bem testado. Com o kit atual, esta falta de confiança poderá ser facilmente ultrapassada. Os alunos têm ambas as possibilidades no mesmo kit, permitindo a verificação e a validação dos circuitos de eletrónica em análise. Por outro lado, a utilização do kit como um recurso complementar no processo educativo usado para o ensino e a aprendizagem de AmpOps, poderá ser importante para implementar a metodologia PBL onde, sob a coordenação do professor, os alunos deverão desenvolver competências enquanto resolvem, de forma autónoma, problemas particulares. O fornecimento de um recurso educativo semelhante ao kit poderá facilitar a resolução das atividades dos alunos. Eles não terão a necessidade de ir a um laboratório tradicional para criar um circuito com AmpOps que idealizaram para resolver um dado problema. Em vez disso, nas suas casas, e usando um computador tradicional interligado ao kit, os alunos poderão simular, implementar e verificar circuitos reais. Não necessitarão de solicitar componentes de eletrónica para montar um determinado circuito, permitindo desta forma a resolução de problemas

colocados pelo professor. Adicionalmente, poderão ganhar um incentivo para verificar e validar o correto funcionamento de outros circuitos com AmpOps, tradicionalmente apresentados durante um curso.

Este recurso educativo poderá ainda facilitar a implementação da estratégia de *flipped-classroom* para o ensino de circuitos com AmpOps. Poderá contribuir para alterar o tradicional processo de ensino e aprendizagem, permitindo, numa fase inicial, o acesso a conteúdos educativos específicos e depois, na sala de aula, a exploração do kit, para o desenvolvimento prático e para a consolidação da aprendizagem. Isto pressupõe uma alteração do típico modelo centrado do professor, para um modelo centrado no aluno, onde o tempo na sala de aula (ou no laboratório) permitirá a exploração de tópicos em maior profundidade com a criação de significativas oportunidades de aprendizagem.

Através de qualquer uma destas metodologias (ou estratégias), cada aluno, ou grupo de alunos, poderá usar o kit ao seu ritmo para resolver problemas propostos pelo professor, em qualquer lado, e a qualquer altura, e utilizar o laboratório tradicional ou a sala de aula para discutir as soluções encontradas. Estas vantagens foram já estabelecidas na literatura como facilitadoras para o ensino [24][25]. É por isso previsível que os alunos possam aumentar o seu envolvimento no processo de ensino e aprendizagem, uma vez que terão a possibilidade de resolver problemas de forma autónoma, procurando o professor quando, e só quando, já pensaram no problema. Através deste processo os alunos irão construir e consolidar o seu conhecimento. Além disso, durante uma discussão na sala de aula ou no laboratório, eles têm a possibilidade de mostrar as suas soluções que, com certeza, irá motivar a sua aprendizagem e promover uma saudável competição académica.

A utilização do kit na educação pode ser sumarizada através da figura 10. Um possível exemplo é um típico problema de condicionamento de sinal onde uma função matemática particular pode ser implementada através de um circuito com um AmpOp. Este poderá ser um problema proposto por um professor que deverá ser resolvido pelos alunos usando o kit em suas casas para verificar e validar as possíveis soluções dos circuitos idealizados. Através deste processo, poderão ser agendadas um conjunto de reuniões em sala de aula, com a supervisão do professor para orientar os alunos durante o processo de resolução do problema em análise. Na aula, ou fora da aula, a interação pode ser repetida várias vezes até que seja encontrada uma solução final. Esta interação é típica de da estratégia *flipped-classroom* para a resolução de um problema baseado na metodologia PBL. É por isso previsível que um ensino ativo, experimental e baseado em projetos (*active-learning, experiment-based and project-based learning*) venha ser promovido, contribuindo para motivar os atores envolvidos no processo de ensino e aprendizagem durante a resolução de problemas com AmpOps.

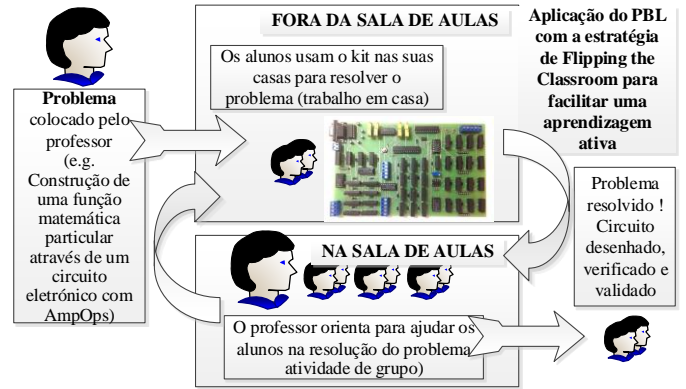


Fig. 10. Aplicação da metodologia PBL através da estratégia de *flipped-classroom* para o desenho, verificação e validação de circuitos com AmpOps.

VII. CONCLUSÕES

Os AmpOps são provavelmente o CI mais conhecido na engenharia eletrónica. A simplicidade que fornecem para o desenho de circuitos eletrónicos (amplificadores, filtros, limitadores, etc.) justifica a sua larga utilização, e o conseqüente requisito em ensiná-los em todos os cursos de engenharia eletrónica. Tal como em qualquer temática da engenharia, o ensino e aprendizagem de AmpOps requer o compromisso entre 3 atividades educativas: teórica, prática e experimental. Enquanto as primeiras atividades são facilmente incluídas em qualquer currículo, uma vez que são basicamente implementadas através da disponibilização de documentação e/ou simulações, a atividade experimental requer uma particular atenção, uma vez que os recursos pedagógicos são mais difíceis de implementar e o seu desenho e funcionalidades deverão se bem aceites por alunos e professores.

Neste contexto, este artigo descreveu o desenho e a implementação de um kit educacional para dar suporte ao ensino e à aprendizagem de AmpOps. Atualmente o kit é acessível localmente através de uma aplicação de software que permite simular e experimentar circuitos reais baseados no AmpOp uA741. Apesar da sua validação ainda não ter sido efetuada, as suas funcionalidades e a flexibilidade que fornece para simular e criar diferentes circuitos baseados num AmpOp, perspectiva a sua boa aceitação na educação para suportar a componente experimental obrigatória em qualquer curriculum, conforme perspectivado por alguns professores e investigadores da área. Apesar disso, pequenos melhoramentos técnicos ao kit são ainda necessários, sendo um dos mais relevantes a possibilidade do mesmo ficar acessível remotamente. É previsível que só com o acesso remoto à plataforma esta seja considerada uma solução viável para uso num curso de engenharia. Atualmente o kit fornece algumas vantagens para facilitar e acelerar a implementação de circuitos de eletrónica sem que haja a necessidade de utilizar a tradicional placa de ligações, componentes e fios. Se o objetivo educativo residir na compreensão do próprio circuito, a utilização deste kit é uma solução (completar ou não) ao laboratório tradicional. Contudo, uma vez que este é acessível localmente, a sua utilização na educação requereria que cada aluno ou grupo de alunos tivesse um kit, o que irá aumentar bastante os custos associados (o kit desenvolvido tem um preço na

ordem dos 300 €, considerando os componentes e a construção do PCB). Uma vez que as despesas são tradicionalmente um ponto chave que tem vindo a justificar a adoção de diferentes ferramentas educativas, nomeadamente a utilização de laboratórios remotos, é razoável dizer que possibilitar o acesso remoto ao kit iria garantir a sua boa aceitação e relevância na educação em engenharia eletrónica. Finalmente, é ainda razoável afirmar que o kit pode ser um importante recurso educativo para implementar a metodologia PBL usando a estratégia de *flipped-classroom*. O kit pode ser utilizado pelos alunos nas suas casas ou em reuniões de grupo para demonstrar desenvolvimentos de forma simples, sem a necessidade de se deslocarem ao tradicional laboratório.

AGRADECIMENTOS

Este artigo descreve parcialmente um projeto de fim de curso do 3º ano em engenharia eletrotécnica e de computadores concluído pelo segundo autor no Politécnico do Porto, no Instituto Superior de Engenharia do Porto do (ISEP-P.Porto) – Portugal. Foi parcialmente financiado pela *Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT-UID-EQU-04730-2013)*.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Amiel, D. Abboud, and M. Trocan, 'A project oriented learning experience for teaching electronics fundamentals', IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 12, pp. 98–100, Dec. 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6979959.
- [2] I. Ugarte, V. Fernández, and P. Sánchez, 'Motivation of students in the learning of digital electronics through the double integration: Remote/presential work and theoretical/laboratory classes', in 2012 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), 2012, pp. 63–67, doi: 10.1109/TAEE.2012.6235408.
- [3] A. D. Ritzhaupt, 'Learning Object Systems and Strategy: A Description and Discussion', Interdiscip. J. E-Ski. Lifelong Learn., vol. 6, pp. 217–238, 2010, doi: 10.28945/1306.
- [4] C. Felgueiras, D. Areias, J. Macedo, A. Fidalgo, and G. Alves, 'Reshaping digital methodologies to the analog world', in 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2016, pp. 366–370, doi: 10.1109/REV.2016.7444504.
- [5] Dr Hayrettin B Karayaka, W. C. University, Dr Robert D Adams, and W. C. University, 'A Hybrid Flipped Classroom Approach to Teaching Power Electronics Course to Electrical Engineering Students', vol. 6, p. 16, 2010.
- [6] L. Li, 'Project-based learning in electronic technology: a case study', Eur. J. Eng. Educ., vol. 40, pp. 1–7, May 2014, doi: 10.1080/03043797.2014.987650.
- [7] J. P. Becker, C. Plumb, and R. A. Revia, 'Project Circuits in a Basic Electric Circuits Course', IEEE Trans. Educ., vol. 57, no. 2, pp. 75–82, May 2014, doi: 10.1109/TE.2013.2273311.
- [8] J. P. Mendoza, J. M. V. Carrizo, and F. J. R. Sanchez, 'Project based learning experiences for embedded systems design', in 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Seville, Spain, 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/TAEE.2016.7528370.
- [9] N. S. Edward, 'The Role of Laboratory Work in Engineering Education: Student and Staff Perceptions', Int. J. Electr. Eng. Educ., vol. 39, no. 1, pp. 11–19, Jan. 2002, doi: 10.7227/IJEEE.39.1.2.
- [10] R. V. and J. K. Krivickas, 'Laboratory Instruction in Engineering Education', Glob. J Engng Educ, vol. 11, no. 2, p. 6, 2007.
- [11] J. Ma and J. V. Nickerson, 'Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review', ACM Comput. Surv., vol. 38, no. 3, pp. 7-es, Sep. 2006, doi: 10.1145/1132960.1132961.
- [12] R. Costa, P. Portela, G. Alves, M. C. Felgueiras, and C. Viegas, 'A reconfigurable and expandable kit to teach electronic circuits based on Operational Amplifiers', in 2018 XIII Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEE), 2018, pp. 1–10, doi: 10.1109/TAEE.2018.8476096.
- [13] W. G. Jung, Ed., 'Chapter 8: Op Amp History', in Op Amp applications handbook, Burlington, MA: Newnes, 2006, pp. 765–830.

- [14] Horan, Ben, Joordens, Matthew, Hall, Robynne and Stojcevski, Alex, 'The old and the new: student perceived efficacy of electronics laboratory equipment - DRO', in AAEE 2013: Proceedings of the 24th Australasian Association for Engineering Education Conference 2013, 2013, p. 12.
- [15] B. Balamuralithara and P. C. Woods, 'Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab', Comput. Appl. Eng. Educ., vol. 17, no. 1, pp. 108–118, Mar. 2009, doi: 10.1002/cae.20186.
- [16] J. R. Brinson, 'Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research', Comput. Educ., vol. 87, pp. 218–237, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.compedu.2015.07.003.
- [17] N. Sousa, G. R. Alves, and M. G. Gericota, 'An Integrated Reusable Remote Laboratory to Complement Electronics Teaching', IEEE Trans. Learn. Technol., vol. 3, no. 3, pp. 265–271, Jul. 2010, doi: 10.1109/TLT.2009.51.
- [18] [M. Tawfik et al., 'Virtual Instrument Systems in Reality (VISIR) for Remote Wiring and Measurement of Electronic Circuits on Breadboard', IEEE Trans. Learn. Technol., vol. 6, no. 1, pp. 60–72, Jan. 2013, doi: 10.1109/TLT.2012.20.
- [19] A. V. Fidalgo et al., 'Using remote labs to serve different teacher's needs A case study with VISIR and RemotElectLab', in 2012 9th Int. Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2012, pp. 1–6, doi: 10.1109/REV.2012.6293149.
- [20] J. Garcia-Zubia et al., 'Empirical Analysis of the Use of the VISIR Remote Lab in Teaching Analog Electronics', IEEE Trans. Educ., vol. PP, pp. 1–8, Oct. 2016, doi: 10.1109/TE.2016.2608790.
- [21] M. C. Viegas et al., 'The VISIR+ Project – Preliminary Results of the Training Actions', in Online Engineering & Internet of Things, Cham, 2018, pp. 375–391, doi: 10.1007/978-3-319-64352-6_36.
- [22] N. Lima et al., 'The VISIR+ project-helping contextualize math in an engineering course', in 2017 4th Expt@International Conference (exp.at'17), 2017, pp. 7–12, doi: 10.1109/EXPAT.2017.7984369.
- [23] R. J. Costa, P. Portela, and G. R. Alves, 'An educational kit to teach and learn Operational Amplifiers', in 2017 4th Experiment@International Conference (exp.at'17), Faro, Portugal, 2017, pp. 137–138, doi: 10.1109/EXPAT.2017.7984353.
- [24] Marcela Hernández-de-Menéndez, et al., 'Active learning in engineering education. A review of fundamentals, best practices and experiences.', in International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), vol. 13, 2019, pp. 909–922, doi: https://doi.org/10.1007/s12008-019-00557-8.
- [25] D. Kanteti, S. S, and R. K, 'Active Learning Techniques and Impacts', in Conference: 2017 5th IEEE Int. Conference on MOOCs, Innovation and Technology in Education (MITE), 2017, pp. 131–134, doi: 10.1109/MITE.2017.00029.



Ricardo Costa recebeu o diploma de Licenciatura (1999) e de Mestrado pré-Bolonha (2004) em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores pela Faculdade de Engenharia do Porto – Universidade do Porto. Em 2014 recebeu o diploma de Doutoramento em Ciências e Tecnologias da Educação pela Universidade de Coimbra. Atualmente é investigador ativo com diversas publicações científicas na área dos laboratórios remotos para a educação. Com anteriores colaborações na indústria, atualmente é professor no departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores no Instituto Superior de Engenharia (ISEP), Politécnico do Porto (P.Porto) – Portugal, onde leciona disciplinas de eletrónica/eletricidade e de informática, coordena projetos de fim de curso de alunos de licenciatura e de mestrado, e participa em projetos nacionais e internacionais. (e-mail: rjc@isep.ipp.pt)



Nascido em 1978, pai e especialista sénior no desenvolvimento de software na empresa Adidas GBS, **Paulo Portela** vive no Porto, Portugal. Iniciou-se no mundo da programação em 1992 com um clássico Macintosh. Em 2016 obteve o diploma de licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores no Instituto Superior de Engenharia (ISEP), Politécnico do Porto (P.Porto) – Portugal. Durante a sua graduação, trabalhou na empresa Sonae integrado no centro responsável pela implementação de processos de automação e robótica (PAR) e esteve envolvido em diferentes projetos que originaram o seu reconhecimento com diversos prémios atribuídos internamente pela Sonae. É coorganizador da comunidade Phyton do Porto, onde se envolveu

na organização de reuniões, workshops e debates na comunidade de programação. Nos seus tempos livres adora fotografar a natureza, caminhadas e dispensar o seu tempo para estar com a família. (email: portela.paulo@gmail.com)



Gustavo R. Alves graduou-se em 1991 e obteve o Mestrado e Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores em 1995 e 1999, respetivamente, pela Universidade do Porto, Portugal. É professor no Politécnico do Porto – Instituto Superior de Engenharia do Porto, desde 1994. É autor ou co-autor de mais de 250 publicações, incluindo capítulos de livros e de conferências e revistas com processos de revisão, e ainda co-editou 2 livros. Esteve envolvido em 19 projetos de investigação nacionais e internacionais. Os seus interesses na área da investigação concentram-se na educação em engenharia, experimentação remota, laboratórios remotos, e no desenho para depuração e teste. O Doutor Gustavo Alves foi *co-chair* da 1ª e da 2ª Conferência Internacional da Sociedade Portuguesa para a Educação e Engenharia (Conferences of the Portuguese Society for Engineering Education, CISPEE2013 e CISPEE2016), da 3ª Conferência Internacional de Experimentação (Experiment@ International Conference), como *chair principal* da 11ª Conferência Internacional de Instrumentação Virtual (11th Remote Engineering and Virtual Instrumentation, REV2014), e da 3ª Conferência de Tecnologia de Ecossistemas para melhoramento da Multiculturalidade (Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality, TEEM2015). É atualmente *co-chair principal* das conferências EDUCON2020, TAEE2020, e CISPEE2020. O Doutor Gustavo Alves é presidente da Sociedade Portuguesa para a Educação em Engenharia (SPEE), Vice-presidente da Associação Internacional da Engenharia Online (International Association of Online Engineering (IAOE)), e membro sénior do IEEE. Atualmente é Editor associado para a revista IEEE Transactions on Learning Technologies e para a revista IEEE Journal of Latin-American Learning Technologies (IEEE-RITA). (e-mail: gca@isep.ipp.pt)



Manuel Carlos Felgueiras recebeu o grau de Licenciado e Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores pela Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, em 1987 e 2008, respetivamente. Em 1987 iniciou a sua carreira profissional como projetista de sistemas de automação. Mais tarde foi convidado para supervisionar um laboratório de teste para verificação de eletrodomésticos segundo normas europeias. Em 1994 iniciou-se como Professor Assistente e mais tarde como Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto – Politécnico do Porto (P.Porto) – Portugal. Os seus interesses de investigação residem no desenho, depuração e teste em sistemas de sinais mistos, experimentação remota, e-learning, energias renováveis e edifícios inteligentes. É também membro da Associação Portuguesa de Engenheiros e membro do Consórcio de Laboratórios Remotos (Global Online Laboratory Consortium, GOLC). O Professor Manuel Carlos Felgueiras publicou cerca de 80 artigos e esteve envolvido em vários comités científicos de conferências. (e-mail: mcf@isep.ipp.pt)



Clara Viegas possui o Doutoramento em Ciência e Tecnologia (Didática da Física), o Mestrado em Engenharia Mecânica e a Licenciatura em Física aplicada à Matemática. É professora no Instituto Superior de Engenharia do Porto – Politécnico do Porto (P.Porto), Portugal, desde 1994, e investigadora do Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia

Industrial (Centre for Innovation in Engineering and Industrial Technology, CIETI-LABORIS). Participou em vários projetos nacionais e internacionais. Foi *chair* convidada em conferências internacionais com arbitragem (JCR – journals). Autora de mais de 80 artigos em revistas, livros e conferências internacionais sujeitas a revisões, co-editou dois livros e uma edição especial numa revista internacional. Os seus interesses de investigação centram-se na educação em engenharia, didática da física, mediação do professor, desenvolvimento profissional e experimentação remota para o ensino. (e-mail: mcm@isep.ipp.pt)