



MENSURAÇÃO DA COMPLEXIDADE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS: UM ESTUDO EDUCACIONAL BASEADO NA ENGENHARIA DE SISTEMAS

MEASURING THE COMPLEXITY OF ELECTRICAL CIRCUITS: AN EDUCATIONAL STUDY BASED ON SYSTEMS ENGINEERING

Alisson Antônio de Oliveira¹

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v45p92-107.2026

RESUMO: No campo dos sistemas eletroeletrônicos, a pesquisa sobre mensuração da complexidade de *hardware* ainda se encontra menos desenvolvida do que a da área de *software*. Para abordar essa lacuna, foi proposto o uso do *framework* Índice Interno de Esforço (IIE) em um conjunto de dados composto por 39 questões do livro *Eletricidade básica*, da Coleção Schaum. Os capítulos do livro seguem uma sequência de aprendizagem que foi utilizada neste artigo como referência para o nível de dificuldade das questões que compõem o *dataset* utilizado nos testes empíricos. As variáveis dos circuitos elétricos foram organizadas segundo a Tipologia de Complexidade (TC) proposta para a Engenharia de Sistemas e, em seguida, aplicadas ao IIE para o cálculo do indicador de complexidade de cada circuito. Por fim, utilizou-se o teste de correlação de Pearson para analisar a relação entre a complexidade observada e a dificuldade das questões. Os resultados demonstram uma correlação positiva e significativa entre o nível de dificuldade dos exercícios em cada capítulo e a mensuração da complexidade realizada por meio do IIE. Este estudo evidencia o potencial do IIE como uma alternativa viável para a mensuração automatizada e em larga escala da complexidade de circuitos elétricos básicos, podendo ser utilizado por professores e avaliadores como um indicador de baixa subjetividade da complexidade de projetos eletroeletrônicos.

PALAVRAS-CHAVE: circuitos; complexidade; indicadores; educação; mensuração.

ABSTRACT: In the realm of electronics systems, research on hardware complexity measurement lags behind that of software. To address this gap, we propose using the Index of Internal Effort (IIE) framework on a dataset comprising 39 questions from the textbook "Basic Electricity" from the Schaum's Outline series. The book's chapters follow a learning sequence, which this paper uses as a reference for the difficulty level of the questions that form the dataset for empirical testing. The variables in the electrical circuits were organized according to the complexity typology proposed for Systems Engineering and then applied to the IIE to calculate the complexity indicator for each circuit. Finally, Pearson's correlation test was used to analyze the relationship between the observed complexity. The results show a positive and significant correlation between the difficulty of the exercises in each chapter and the complexity measurement performed using the IIE. This study demonstrates the potential of the IIE as a viable alternative for large-scale, automated measurement of basic electrical circuit complexity, which can be used by teachers and evaluators as a low-subjectivity indicator of electronic project complexity.

KEYWORDS: circuits; complexity; indicators; education; measurement.

¹ Engenheiro de Controle e Automação, Doutor em Engenharia, Professor no IFPR, campus Curitiba, alisson.oliveira@ifpr.edu.br



INTRODUÇÃO

A Educação em Engenharia tem evoluído de uma abordagem predominantemente técnica para uma abordagem mais abrangente, que incorpora a transdisciplinaridade e integra áreas como *big data*, computação em nuvem e inteligência artificial, exigindo assim habilidades técnicas, metodológicas, habilidades sociais e pessoais. A formação em cursos de Engenharia não se limita à aquisição de conhecimento, mas visa capacitar o estudante a aplicá-lo em contextos complexos (OECD, 2018).

A mensuração da complexidade e da dificuldade de exercícios, problemas, projetos e avaliações no ensino de circuitos elétricos exerce um papel crucial na eficácia do processo de ensino-aprendizagem. Ao quantificar objetivamente esses aspectos, os educadores podem garantir que o conteúdo apresentado seja adequado ao nível de conhecimento e às competências dos alunos, promovendo uma aprendizagem mais eficiente e significativa.

Compreender a complexidade de circuitos eletrônicos é essencial para otimizar o projeto, a produção e a manutenção de sistemas elétricos, desde circuitos de Engenharia Elétrica até sistemas de microeletrônica. Medir essa complexidade de forma precisa pode gerar melhorias significativas na eficiência de desenvolvimento de *hardware*, na previsão de dificuldades durante a implementação e na alocação de recursos. Além disso, pode servir como uma ferramenta acadêmica valiosa, auxiliando os docentes na avaliação da capacidade e do empenho de seus alunos em projetos de circuitos elétricos.

Entretanto, a área de *software* se encontra mais avançada do que a área de *hardware*, especialmente no campo dos circuitos eletrônicos. Por exemplo, na mensuração de *software* apresentada nos trabalhos de Vogel *et al.* (2020) e Ardito *et al.* (2020), foram apresentadas pouco mais do que uma centena de métricas de código, algumas genéricas e outras específicas de determinados paradigmas de programação. Entre elas, destacam-se a Complexidade Ciclomática de McCabe (1976) e a contagem de linhas de código (LoC), amplamente utilizadas.

Germán-Salló (2020) realizou pesquisas sobre métodos de identificação de propriedades ocultas, dinâmicas não lineares e comportamentos em diversos sinais de circuitos eletrônicos. Contudo, para uma mensuração padronizada, ou tão próxima disso quanto possível, as variáveis ou métodos utilizados devem ser determinísticos, garantindo clareza e repetibilidade dos resultados, conforme os princípios da ciência moderna defendidos pelo filósofo da ciência Popper (2001).



Brinzer e Schneider (2020) destacam que os processos de produção industrial apresentam alta e crescente complexidade. A mensuração dessa complexidade é essencial para uma gestão eficiente, auxiliando no controle eficaz da produção. No entanto, as novas funcionalidades dos produtos, aliadas a características desejáveis, como redução de custos, de peso e de consumo de energia, tornam mais desafiadora a criação de sistemas de manutenção simples.

Entre as métricas de circuitos encontradas na literatura, Tocci, Widmer e Moss (2011) indicam que a complexidade de um circuito puramente digital, como um Circuito Integrado (CI ou CHIP), pode ser medida pelo número de portas lógicas presentes no CI. Em uma proposta complementar, Sinha e Weck (2016) sugerem que a complexidade estrutural na Engenharia de Sistemas pode ser medida por métricas que sejam: (i) objetivas, repetíveis e rigorosas, constituindo um construto matemático formal; (ii) correlacionadas com a dificuldade de construção ou reconstrução do sistema; (iii) relacionadas ao esforço ou custo de desenvolvimento ou integração do sistema; e (iv) operacionalmente úteis no desenvolvimento de sistemas de engenharia em larga escala.

Todavia, Sinha e Weck (2016) não esclarecem como determinar, mesmo que aproximadamente, os valores da complexidade de um produto final que contenha várias partes distintas.

A literatura atual revela uma lacuna na aplicação de métricas de complexidade de *hardware* em ferramentas de projeto auxiliado por computador (*Computer Aided Design – CAD*), especialmente para circuitos básicos. Embora existam *frameworks* genéricos de mensuração de complexidade, como o IIE, originalmente publicado por Oliveira e Pilatti (2021) no contexto dos *softwares* da plataforma Arduino, sua aplicação prática em *hardware* ainda não foi amplamente explorada nem validada. Além disso, há uma carência de conjuntos de dados específicos que facilitem análises comparativas de complexidade de circuitos, lacuna que pode ser hipoteticamente suprida ao se utilizar sequências de aprendizagem de livros clássicos como referência.

Ampliando o escopo para além dos estudos de programação, é possível explorar um campo mais abrangente que inclui a programação e outras disciplinas: a Engenharia de Sistemas. Segundo McKay *et al.* (2020) e Anacker *et al.* (2020), essa é uma disciplina ampla e bem estruturada, composta por estruturas internas e externas. As estruturas internas englobam síntese, descrição, análise, simulação e tomada de decisão, integrando o comportamento humano ao sistema. As estruturas externas abrangem a padronização da documentação, o



reuso de conhecimento de soluções e a uniformização de padrões de solução durante o projeto do sistema, de modo a evitar iterações custosas.

Nesse contexto, o Índice Interno de Esforço (IIE) surgiu de uma pesquisa interdisciplinar que combina Engenharia de Controle com Teoria dos Sistemas, com o objetivo de criar indicadores robustos para a administração pública (Pereira, Oliveira e Barbalho, 2025). O IIE foi projetado especificamente para fornecer uma mensuração robusta e objetiva de qualquer Atividade Intelectual Explicitada (AIE) desempenhada por servidores públicos, visando subsidiar sistemas automatizados de avaliação de desempenho em larga escala. O objetivo principal dessa mensuração é melhorar a eficiência, a eficácia e a efetividade dos resultados entregues à sociedade por esses profissionais.

O presente trabalho busca analisar qual é o comportamento do *framework* de mensuração de Atividades Intelectuais Explicitadas (AIE), denominado Índice Interno de Esforço (IIE), quando aplicado à mensuração da complexidade de circuitos elétricos, tomando como referência a sequência didática do livro clássico de ensino *Eletricidade básica*, de Gussow, com tradução de Nascimento (Gussow, 2009).

Esta pesquisa apresenta relevância prática por oferecer uma metodologia estruturada para a mensuração da complexidade de circuitos elétricos, tema ainda pouco explorado empiricamente na literatura.

Este artigo apresenta uma introdução ao tema; a metodologia utilizada para a criação do conjunto de dados e as métricas aplicadas; os resultados estatísticos obtidos e suas características; a discussão dos resultados, destacando as forças e limitações desta pesquisa; e, por último, as recomendações finais e as considerações sobre os resultados alcançados.

MÉTODO

Este estudo é de natureza observacional, pois busca analisar dados coletados sem intervenção experimental direta. O objetivo é avaliar a complexidade de circuitos elétricos a partir de um conjunto de dados construído com base em livros clássicos e mensurado utilizando o *framework* Índice Interno de Esforço (IIE). Esse delineamento permite coletar dados reais de uma fonte já existente, neste caso, o livro *Eletricidade básica*, de Gussow (2009), possibilitando a análise da relação entre a complexidade dos circuitos e a dificuldade percebida conforme o avanço dos capítulos da obra.



O livro é composto por 22 capítulos e é reconhecido por sua abordagem didática, apresentando teoria, exemplos ao longo do texto e uma ampla variedade de exercícios ao final de cada capítulo (denominados "Problemas"). Para a seleção dos circuitos, foram escolhidos, em média, três circuitos por capítulo: um do início, um do meio e um do final da lista de exercícios. Questões sem desenhos elétricos não foram consideradas, exceto nos capítulos puramente teóricos, como o Capítulo 1.

Ao final deste artigo, o conjunto de dados completo (*dataset*) é disponibilizado para facilitar futuras pesquisas e comparações com outras técnicas de mensuração de circuitos elétricos.

As variáveis utilizadas foram inicialmente organizadas conforme a Tipologia de Complexidade (CT) proposta por Sheard e Mostashari (2010). Essa tipologia é multidisciplinar, com aplicações amplas, indo desde a contagem simples de componentes no Nível 1 (N1) até as relações sociopolíticas complexas no Nível 6 (N6). A seguir, apresenta-se a descrição de cada nível (Nx):

N1 – Tamanho: foca no número total de elementos do sistema. Um sistema maior exige mais recursos de gerenciamento, mas isso não implica necessariamente uma mudança no estilo de gestão. A diversidade de tipos de peças e componentes aumenta a complexidade, mas o tamanho é um aspecto fundamental da complexidade sistêmica.

N2 – Conectividade: refere-se ao número e aos tipos de conexões (*links*). A conectividade inclui tanto o número total de conexões quanto a densidade (relação entre conexões reais e possíveis). Diferentes tipos de conexão – por exemplo, sinais e potência – afetam a complexidade do sistema. Em processos industriais de controle, conexões que geram realimentação (*feedback*) aumentam a complexidade do sistema final.

N3 – Arquitetura: diz respeito aos padrões estruturais dentro de um sistema, como camadas, equipes e limites. Trata da "granularidade" ou da ordem interna do sistema. A arquitetura analisa como o sistema não é uniforme em toda a sua extensão, incluindo áreas distintas que influenciam crescimento e fronteiras.

N4 – Dinâmica de curto prazo: relaciona-se à escala temporal operacional, em que mudanças rápidas ou eventos negativos inesperados exigem respostas imediatas. Esses eventos, como efeitos não lineares ou ciclos de realimentação, são difíceis de prever e controlar.

Os dois últimos níveis da TC (N5 e N6) não foram observados no conjunto de dados criado como *dataset* do estudo; em razão disso, não foram apresentados ou discutidos.



Dentro da seção dos resultados, na Tabela 1, são apresentadas as variáveis específicas da área de circuitos elétricos, organizadas conforme os níveis da tipologia de complexidade de Sheard e Mostashari (2010).

Para a mensuração (ou metrificação) da complexidade foi utilizado o *framework* IIE, devido a sua capacidade de estimar a complexidade por aproximação (IIEa).

De acordo com Oliveira, Santos e Pilatti (2024), a aplicação do IIE para mensurar AIE deve seguir diretrizes específicas a fim de evitar erros sistêmicos durante as etapas de projeto ou identificação do sistema. Entre as principais recomendações, destacam-se:

(i) todas as variáveis utilizadas na mensuração devem ser diretamente observáveis, sem subjetividade ou ambiguidade;

(ii) variáveis de mesma magnitude, importância, complexidade ou impacto podem ser agrupadas no mesmo conjunto ou nível, sendo recomendado o uso da TC para a organização das variáveis;

(iii) para calcular de forma eficaz o desempenho ou esforço de trabalho, devem ser consideradas tanto as variáveis de saída (resultados) quanto as variáveis de entrada (recursos);

(iv) considerando que a complexidade de um item está fortemente relacionada ao número de variáveis, recomenda-se que o modelo utilize pelo menos quatro variáveis distintas e não correlacionadas, de modo a garantir que o resultado do IIE se mantenha em uma faixa robusta e aceitável, ainda que essa condição dependa do conjunto de dados e do objeto em análise.

O termo “robusto”, no contexto do IIE, possui fundamento técnico baseado nos princípios do Controle Robusto descritos por Cheng *et al.* (2009). Segundo esses princípios, o controle robusto é capaz de lidar com conhecimento incompleto sobre o modelo matemático de um sistema. Em outras palavras, mesmo sem um modelo matemático preciso da atividade, o IIE é capaz de produzir estimativas confiáveis e convergir para valores aceitáveis.

Com base nesses dados, as variáveis utilizadas na equação do IIEa para mensurar a complexidade de uma AIE (por aproximação) devem correlacionar-se com algum parâmetro de entrada ou saída do sistema, como dificuldade, tempo de projeto, custo de projeto ou valor de mercado entre outros.



A Equação 1 expressa como a complexidade das AIE é calculada por meio do IIEa, conforme demonstrado nos trabalhos de Oliveira, Santos e Pilatti (2024) e Pereira, Oliveira e Barbalho (2025).

$$IIEa = 1 + \sum_{n \geq 3} \sqrt[n]{W_n} = 1 + \sqrt{W_1} + \sqrt{W_2} + \sqrt{W_3} + \dots + \sqrt{W_n} \quad \text{Eq. [1]}$$

O valor obtido com o IIEa será comparado ao nível de dificuldade de cada questão, utilizando o capítulo de origem como aproximação desse nível (CP). Essa comparação será realizada mediante o teste de correlação de Pearson (Triola, 2013), empregado para minimizar vieses humanos potenciais.

Existem, contudo, limitações na aplicação dessas condições ao conjunto de dados construído. Alguns capítulos do livro selecionado para compor o *dataset* não se enquadram nas definições estabelecidas. Por exemplo, o Capítulo 6 aborda teoria de baterias, tema específico e distinto dos capítulos 1 e 2, que tratam de fontes de tensão genéricas. Por essa razão, o Capítulo 6 foi excluído do *dataset*.

Exclusão semelhante ocorre com o Capítulo 12, que trata de tensões de corrente alternada (AC) e apresenta exercícios mais voltados à física do que à eletricidade aplicada a circuitos. Assim, esse capítulo também foi excluído da contagem, por ser predominantemente teórico e não prático o suficiente para os objetivos deste estudo. Na caracterização adicional do conjunto de dados, observa-se que o início do Capítulo 2 contém elementos puramente matemáticos, como notação científica. Por esse motivo, os exercícios do início do capítulo não foram incluídos; apenas os do meio e do final foram considerados. Os Capítulos 7 e 8 apresentam métodos diferentes para resolução de malhas de corrente; portanto, o Capítulo 8 foi retirado da amostra. Cabe ressaltar que há diferenças estruturais entre as versões inglesa (original) e brasileira (traduzida) do livro, o que requer cautela em futuras pesquisas e comparações baseadas na edição utilizada.

Por fim, para leitores leigos ou estudantes iniciantes, é importante considerar possíveis ambiguidades presentes no livro. Por exemplo, um resistor é tecnicamente distinto de uma impedância indutiva ou capacitiva; portanto, esses elementos foram tratados separadamente, mesmo compartilhando a mesma unidade física de medida, Ohms (Ω).

Com base na metodologia desta seção, as variáveis observáveis nestes circuitos são apresentadas na Tabela 1, sendo elas tipificadas seguindo a TC de Sheard e Mostashari (2010). A seleção das variáveis mais adequadas para uso no IIEa será dada pelo teste de correlação de Pearson, conforme a Tabela 2.



As análises estatísticas de correlação entre as variáveis da TC encontradas nos circuitos elétricos serão analisadas em separado; com isso, a posição delas na TC (nível) não afeta os resultados finais.

Devido à falta de informações práticas, variáveis importantes foram desconsideradas temporariamente, como, por exemplo, a potência máxima dos componentes. Nessa mesma linha, os circuitos básicos não apresentam padrões de comunicação, o que constitui mais uma variável que não pode ser comparada. De forma resumida, as variáveis dos circuitos elétricos que podem ser claramente observadas nos exercícios são: Número total de componentes elétricos (nc), Número de conexões elétricas, ou *jumpers* (jp), Diversidade de componentes (dv) e Variáveis físicas a serem calculadas (vf).

Tabela 1 – Tipologia da complexidade e sua aplicação em circuitos elétricos básicos

Nível	Nome do nível da TC	Respectivos itens elétricos
1	Tamanho	Número total de componentes elétricos (nc)
2	Conectividade	Número de conexões elétricas, ou <i>jumpers</i> (jp) Potência elétrica, em watts (pt)
3	Arquitetura	Diversidade de componentes (dv) Variáveis físicas a serem calculadas (vf)
4	Mudanças em curto espaço de tempo	Entradas e saídas de sinais elétricos, sensores e atuadores (IO) Sistemas ou padrões de comunicação (sc)
5	Mudanças observadas em longos períodos temporais	Não encontrados neste <i>dataset</i> . Nível da TC desconsiderado momentaneamente.
6	Relações políticas e sociais	Não encontrados neste <i>dataset</i> . Nível da TC desconsiderado momentaneamente.

Fonte: elaborada pelo autor.

RESULTADOS

De acordo com a metodologia apresentada, a Tabela 2 exibe uma matriz de correlação do tipo “todos contra todos” entre as variáveis e as métricas do estudo. Para uma amostra de 39 exercícios, o valor crítico mínimo necessário para identificar uma correlação significativa (ρ) pelo teste de Pearson foi 0,371, considerando um nível de confiança de 99% (alfa = 0,01) (Triola, 2013). Os valores destacados na Tabela 2 correspondem às correlações positivas e estatisticamente significativas.



Tabela 2 – Teste de correlação de Pearson em formato matricial

	CP	nc	jp	dv	vf	C1	C2
CP	1.000	0.410	0.488	0.316	0.533	0.543	0.669
nc		1.000	0.916	0.625	0.037	0.878	0.798
jp			1.000	0.502	0.021	0.804	0.800
dv				1.000	0.315	0.789	0.629
vf					1.000	0.326	0.505
C1						1.000	0.945
C2							1.000

Fonte: elaborada pelo autor.

A variável de referência utilizada nessa prova de conceito com o IIEa foi o nível de dificuldade de cada capítulo, aproximado pela ordem do capítulo (CP). O CP apresentou correlação positiva e significativa com as variáveis nc (número de componentes), jp (número de conexões elétricas) e vf (variáveis físicas). Este resultado orienta o uso dessas variáveis (Vn) no cálculo do IIEa.

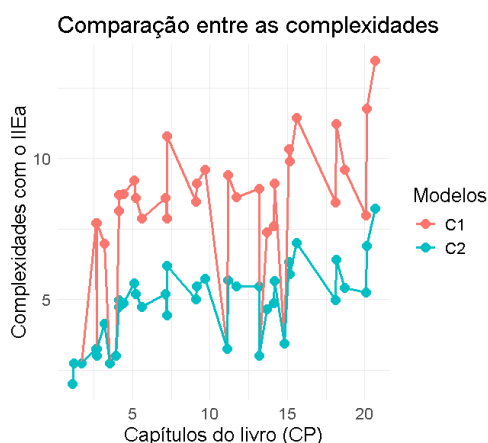
Conforme demonstrado na Tabela 2, as variáveis (nc) número de componentes e (jp) número de conexões elétricas apresentaram as maiores correlações no teste, com valores próximos de 1 (0,916). Esse comportamento sugere que uma dessas variáveis poderia ser removida sem causar impacto significativo nos resultados do IIEa. Além disso, de acordo com a Tipologia de Complexidade (TC), recomenda-se priorizar variáveis de níveis superiores (Nx); portanto, a variável nc possui menor prioridade em comparação à variável jp e, por esse motivo, nc pode ser retirada para simplificar os cálculos finais.

Devido a tal possibilidade de simplificação, o IIEa foi calculado de duas formas, sendo elas: (C1) na configuração padrão com o mínimo de quatro variáveis, sendo elas nc, jp, dv e vf; e (C2) na versão resumida, que considera apenas as duas variáveis mais correlacionadas com CP: o número de conexões elétricas (jp) e o número de variáveis físicas (vf) presentes nos problemas do livro.

Os resultados dos testes de correlação de C1 e C2 também são apresentados na Tabela 2. O IIEa calculado de forma simplificada (C2) apresentou a maior correção com a dificuldade crescente dos capítulos (CP) entre todas as variáveis (0,669).

De forma complementar à Tabela 2, a Figura 1 demonstra a relação progressiva entre as métricas C1 e C2 em comparação com a progressão dos conteúdos (CP) do livro usado como estudo de caso. A distância entre as amplitudes é uma consequência da diferença no número de variáveis; entretanto, as métricas apresentaram uma correlação positiva e significativa.

Figura 1 – Comparação entre CP e as métricas do IIE



Fonte: elaborada pelo autor.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste estudo, circuitos elétricos clássicos retirados de um livro de ensino de circuitos elétricos para cursos técnicos e cursos de Engenharia foram utilizados como base de dados para a realização de uma prova de conceito (PoC) sobre a aplicabilidade do IIEa. Isso possibilitou a comparação desse indicador genérico com a sequência em que os conteúdos são apresentados no livro, uma aproximação do nível de dificuldade ou complexidade definido pelos autores e pela editora na organização pedagógica dos capítulos.

Dos 22 capítulos do livro, 13 foram selecionados, pois os demais não continham diversidade de circuitos elétricos na seção de problemas (exercícios), concentrando-se mais em explicações teóricas ou em ferramentas para resolução de problemas específicos. Assim, 39 circuitos foram escolhidos, distribuídos em três posições distintas de cada capítulo: início, meio e fim da seção de problemas resolvidos. Essa estratégia buscou reduzir vieses na coleta de dados. Com exceção dos primeiros capítulos, foram evitados exercícios sem circuitos elétricos, uma vez que o foco da pesquisa estava na mensuração da complexidade dos circuitos – e não nas ferramentas matemáticas utilizadas (como cálculos matriciais, angulares ou com números complexos).

Com base na hipótese de pesquisa, o IIEa apresentou resultados proporcionais ao valor de cada capítulo no livro (CP), interpretado como o nível de dificuldade ou complexidade de cada capítulo.

O antigo ditado “o todo é maior do que a simples soma de suas partes” é demonstrado na prática com a aplicação do IIEa a este conjunto de dados.



Utilizando o número do capítulo como referência de dificuldade, conforme definido pelos autores, pela editora e seus revisores, a variável independente jp apresentou uma correlação de 0,488, enquanto a variável vf apresentou 0,533. No entanto, apenas com a combinação de ambas no IIEa (C2) se obteve a maior correlação entre o CP e qualquer outra variável ou métrica da Tabela 2. Assim, em temas de eletricidade básica, utilizando o número de conexões elétricas (jp) e o número de variáveis físicas (vf) consideradas, é possível estimar com boa precisão a complexidade (IIEa) de cada problema por meio do *framework* IIE.

Segundo Sheard e Mostashari (2010), as consequências do aumento da complexidade dos sistemas não se limitam a um único aspecto, podendo incluir dificuldades de manutenção, aumento dos custos do ciclo de vida do produto e um processo de desenvolvimento mais complexo e oneroso. Essas questões se tornam evidentes em sistemas embarcados, cujos circuitos impressos (PCBs) possuem múltiplas camadas e componentes miniaturizados. Em muitos casos, o custo da mão de obra especializada para manutenção é tão alto que substituir a placa por uma nova, com garantia estendida, torna-se mais vantajoso do que tentar reparar o circuito atual.

De acordo com Álvarez, Mozo e Durán (2021), os principais microcontroladores de placa única (SBMs) disponíveis no mercado incluem Wiring, Adafruit, Arduino, Genuino e Teensy, sendo o Arduino a plataforma mais amplamente adotada e considerada padrão de comparação. Com base nessa constatação, trabalhos futuros poderão testar o IIEa como métrica universal para mensuração da complexidade de *software* e *hardware* em sistemas desenvolvidos na plataforma Arduino. O *hardware* pode ser avaliado pelas variáveis apresentadas neste artigo, enquanto o *software* pode ser analisado com base nos parâmetros identificados no estudo de Oliveira e Pilatti (2021) sobre códigos desenvolvidos nessa plataforma.

Devido à natureza multidisciplinar do IIE, existe também a possibilidade teórica de sua aplicação na mensuração da complexidade de sistemas mecânicos, tanto em contextos industriais quanto educacionais, especialmente em sistemas automatizados que combinam programação, eletrônica e mecânica, conforme apresentado por Oliveira (2025).

O IIE foi desenvolvido para mensurar Atividades Intelectuais Explicitadas (AIE) executadas por servidores públicos, visando aumentar a eficiência, a eficácia e a efetividade dos serviços prestados à sociedade. O *framework* é multidisciplinar e se encontra em fase de testes em diferentes áreas, buscando identificar limitações e não linearidades. Alguns testes bem-sucedidos que podem ser mencionados são:

- (i) na área de programação, Oliveira e Pilatti (2021) e Oliveira (2024);



(ii) em patentes de propriedade industrial, Oliveira *et al.* (2023), Oliveira, Santos e Pilatti (2024), Pereira, Oliveira e Barbalho (2025);

(iii) em livros avaliados pela CAPES, Oliveira (2024);

(iv) em montagens mecânicas, Oliveira (2025).

É importante destacar, para pesquisas futuras, que o conjunto de dados utilizado, extraído do livro *Eletricidade básica* (Gussow, 2009), apresenta limitações. Por exemplo, um livro de eletrônica digital poderia oferecer variáveis adicionais relacionadas ao número de entradas e saídas (I/Os). Seguindo essa linha, uma obra dedicada à análise de circuitos poderia proporcionar novas variáveis específicas, como as mudanças no sinal de saída em diferentes faixas de frequência, observadas no projeto de filtros ativos e passivos. A criação de um conjunto de dados de referência (*benchmark*) poderia contribuir de modo significativo para novas pesquisas sobre mensuração da complexidade de circuitos eletrônicos.

Do ponto de vista educacional, uma análise mais precisa da complexidade das questões exigiria dados empíricos obtidos com estudantes de diferentes níveis de cursos técnicos ou superiores em Engenharia Elétrica. Hipoteticamente, as variáveis de saída poderiam incluir as taxas de acerto de cada questão, enquanto as variáveis de entrada corresponderiam à carga horária de ensino, como 100 ou 240 horas dedicadas à eletricidade básica e circuitos elétricos. Contudo, até o momento, tais dados não estão disponíveis, configurando uma oportunidade relevante para trabalhos futuros.

Este estudo pode ter impactos significativos em diferentes domínios. No meio acadêmico, docentes podem utilizar os resultados para demonstrar que as questões de provas possuem complexidade equivalente às apresentadas nas listas de exercícios, reduzindo discussões baseadas em percepções subjetivas de dificuldade. Em competições, maratonas e olimpíadas voltadas ao desenvolvimento de circuitos eletrônicos, o grau de complexidade dos circuitos elaborados pode ser utilizado como critério de desempate em avaliações, auxiliando na redução da subjetividade dos julgamentos e resultados finais.

Outra possível aplicação futura do IIE envolve sua forma primitiva, denominada IIE0. Conforme descrito por Oliveira, Santos e Pilatti (2024), o IIE0 permite mensurar o esforço médio de pesquisadores ou desenvolvedores que registraram uma AIE, como uma patente. Contudo, sua aplicação requer variáveis de entrada adicionais, como número de desenvolvedores, tempo de desenvolvimento e recursos investidos. Pela ausência dessas informações no conjunto de dados utilizado deste *dataset*, o IIE0 não pôde ser calculado, permanecendo como uma



possibilidade para trabalhos futuros, desde que haja complementação dos dados atuais.

CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma proposta de mensuração da complexidade em circuitos elétricos básicos por meio do *framework* Índice Interno de Esforço (IIE), utilizando especificamente sua forma de aproximação da complexidade, denominada IIEa. A metodologia empregada permitiu uma avaliação quantitativa e objetiva da complexidade dos circuitos com base nas variáveis coletadas diretamente dos circuitos.

Os resultados estatísticos demonstram que o IIEa apresenta uma correlação positiva e significativa com a progressão dos capítulos do livro *Eletricidade Básica*, de autoria de Gussow e tradução de Nascimento (Gussow, 2009), utilizado como *dataset*, sugerindo que o *framework* do IIEa é um indicador eficaz para quantificar a complexidade de circuitos elétricos.

As contribuições científicas deste estudo incluem a validação do IIEa como um método robusto para a avaliação da complexidade de circuitos elétricos. Os resultados mais relevantes destacam que as variáveis número de conexões elétricas (j_p) e número de variáveis físicas (v_f) desempenham papel fundamental na mensuração precisa da complexidade, sendo a combinação dessas variáveis (C2) responsável pela maior correlação observada na Tabela 2.

As aplicações práticas potenciais do IIEa são diversificadas, por exemplo:

- (i) docentes podem empregar o IIEa para validar a complexidade de exercícios e avaliações, assegurando que o nível de dificuldade esteja coerente com o material didático;
- (ii) em competições e olimpíadas de circuitos elétricos, o IIEa pode ser adotado como critério objetivo de desempate;
- (iii) Núcleos de Inovação Tecnológica (NITs) podem utilizar o *framework* para avaliar a viabilidade de registros de Topografias de Circuitos Integrados (TCIs), promovendo melhor alocação dos recursos públicos;
- (iv) devido à estrutura matemática do IIE, ele pode ser aplicado dentro de ferramentas didáticas computacionais, com isso automatizando e criando avaliações em larga escala para circuitos de diferentes complexidades.



A relevância teórica e prática dos resultados é promissor. Sob o ponto de vista teórico, o estudo avança na compreensão da mensuração da complexidade em circuitos elétricos, oferecendo um *framework* adaptável a diversas áreas de *hardware*. Além disso, a validação do IIEa pode influenciar mudanças nas práticas pedagógicas e nos critérios de avaliação da complexidade em cursos de Engenharia Elétrica.

Em síntese, este estudo demonstrou a eficácia do IIEa na mensuração da complexidade de circuitos elétricos, ressaltando a importância das variáveis número de conexões elétricas e número de variáveis físicas. A aplicação prática do *framework* pode beneficiar tanto o ensino quanto a inovação tecnológica, contribuindo para uma melhor compreensão e gestão da complexidade em sistemas eletrônicos.

Esta pesquisa abre caminho para novos estudos e aperfeiçoamentos na mensuração da complexidade em diferentes domínios do Ensino de Engenharia e tecnologia eletroeletrônica, reforçando a necessidade de metodologias padronizadas e cientificamente robustas.

REFERÊNCIAS

- ÁLVAREZ, J. L.; MOZO, J. D.; DURÁN, E. Analysis of single board architectures integrating sensors technologies. **Sensors**, v. 21, p. 6303, 2021.
- ANACKER, H. *et al.* Pattern-based systems engineering: application of the solution patterns in the design of intelligent technical systems. **Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference**, v. 1, p. 1195-1204, 2020.
- ARDITO, L. *et al.* A tool-based perspective on software code maintainability metrics: a systematic literature review. **Scientific Programming**, p. 1-26, 2020.
- BRINZER, B.; SCHNEIDER, K. Complexity assessment in production: linking complexity drivers and effects. **Procedia CIRP**, v. 93, p. 694-699, 2020.
- CHENG, B. H. C. *et al.* **Software engineering for self-adaptive systems**. Springer, 2009.
- GERMÁN-SALLÓ, Z. Measuring the complexity of discrete signals. **Procedia Manufacturing**, v. 46, p. 555-561, 2020.
- GUSSOW, M. **Eletricidade básica**. 2. ed. atual. e ampl. Coleção Schaum. Trad. NASCIMENTO, J. L. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- MCCABE, T. J. A complexity measure. **IEEE Transactions on Software Engineering**, v. SE-2, n. 4, p. 308-320, dez. 1976.
- MCKAY, A. *et al.* Designing socio-technical systems. In: **Handbook of Systems Sciences**. 2020.



- OLIVEIRA, A. A. Assessing programming difficulty and effort: statistical correlations with the Index of Internal Effort. **Anais...** Escola Regional de Informática de Goiás. (ERI-GO), 12., 2024, Ceres/GO. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2024. p. 21-30. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/erigo/article/view/32208/32008>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- OLIVEIRA, A. A. **Índice interno de esforço: uma proposta para a mensuração robusta de artefatos intelectuais desenvolvidos por servidores públicos**. 2024. 103 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2024.
- OLIVEIRA, A. A. Measuring complexity in mechanical assemblies: a study with the Lego Mindstorms NXT platform. **Anais...** International Congress of Mechanical Engineering - COBEM2025, 28., 2025, Curitiba, Brazil. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – ABCM, p. 1-8, 2025.
- OLIVEIRA, A. A. *et al.* Metrificação de patentes: uma análise entre qualidade, complexidade e esforço. **Anais...** Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP, 43. 2023, Ceará. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_ST_404_1989_45333.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.
- OLIVEIRA, A. A.; PILATTI, L. A. Mensuração da complexidade de códigos em C com o método do Índice Interno de Esforço. **Anais...** Encontro Anual de Tecnologia da Informação – EATI, 12., 2021, ano 10, n. 2, nov. 2021. Disponível em: <http://anais.eati.info:8080/index.php/2019/article/view/64/61>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- OLIVEIRA, A. A.; SANTOS, C. B.; PILATTI, L. A. Bridging the gap in patent assessment: The Index of Internal Effort framework for pharma innovations. **Journal of Pharmacy & Pharmacognosy Research**, v. 12, n. 5, p. 852-869, 2024. Disponível em: https://jppres.com/jppres/pdf/vol12/jppres23.1859_12.5.852.pdf. Acesso em: 10 set. 2025.
- OECD. ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **The future of education and skills: Education 2030**. Paris: OECD, 2018. Disponível em: <https://www.oecd.org/education/2030-project/>. Acesso em: 15 out. 2025.
- PEREIRA, S. A.; OLIVEIRA, A. A.; BARBALHO, C. R. S. Gestão estratégica de patentes em instituições públicas: avaliando o Índice Interno de Esforço como ferramenta para otimizar o portfólio. **P2P e Inovação**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 2, 2025. Disponível em: <https://revista.ibict.br/p2p/article/view/7458>. Acesso em: 10 set. 2025.
- POPPER, K. R. **A lógica da pesquisa científica**. 9. ed. São Paulo: Cultrix, 2001.
- SHEARD, S. A.; MOSTASHARI, A. A complexity typology for systems engineering. **INCOSE International Symposium**, v. 20, n. 1, p. 933-945, 2010.
- SINHA, K.; WECK, O. L. Empirical validation of structural complexity metric and complexity management for engineering systems. **Systems Engineering**, v. 19, n. 3, p. 193-206, 2016.
- TOCCI, R. J.; WIDMER, N. S.; MOSS, G. L. **Sistemas digitais: princípios e aplicações**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2011.
- TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística: atualização da tecnologia**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- VOGEL, M. *et al.* Metrics in automotive software development: a systematic literature review. **Journal of Software: Evolution and Process**, v. 33, n. 2, 2020.



Material complementar

Os dados usados neste artigo podem ser baixados no endereço abaixo:
<https://drive.google.com/file/d/1IHxwMF3WdOuU8zzxSdKnOXEPCDemPNmi/view?usp=sharing>