

Aprendizagem de máquina aplicada na avaliação de projetos aeroportuários no Brasil baseados em modelos BIM

Ítalo Guedes¹, Max Andrade¹, Cleber Zanchettin², Adriana Rolim³

¹ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Brasil
italo.guedes@ufpe.br; max.andrade@ufpe.br;

² Centro de Informática Universidade Federal de Pernambuco (CIn / UFPE), Recife, Brasil; cz@cin.ufpe.br; ³ Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC), Brasília, Brasil; adriana.rolim@mpor.gov.br

Abstract. In a country with continental dimensions like Brazil, air transport plays a strategic role in the development of the country. In recent years, initiatives have been promoted to boost the development of air transport, among which the BIM BR strategy stands out, instituted by decree nº9.983 (2019), decree nº10.306 (2020) and more recently, the publication of the airport design manual (SAC, 2021). In this context, this work presents partial results of a doctoral research based on the Design Science Research (DSR) method for the application of Machine Learning (ML) techniques in the Artificial Intelligence (AI) subarea, aiming to support SAC airport project analysts in the phase of project evaluation. Based on a set of training and test data corresponding to airport projects, two ML algorithms were trained. Preliminary results indicate that the use of ML algorithms enables a new scenario to be explored by teams of airport design analysts in Brazil.

Keywords: Airports, Artificial intelligence, BIM, Evaluation, Machine learning.

1 Introdução

No Brasil, o desenvolvimento de um projeto aeroportuário é realizado por diferentes empresas e especialistas do setor, tendo em vista a elevada complexidade para elaboração de um projeto de um aeroporto, com base na extensa lista de exigências projetuais e normativas que devem ser atendidas na fase de projeto, faz com que o processo de avaliação e aprovação desses projetos perdurem por meses, em alguns casos, até anos até o projeto ser aprovado. Dentre os órgãos que realizam a avaliação dessa categoria de projetos, estão a Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC), Empresa Pública

Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), dentre outros. Esta pesquisa está sendo desenvolvida junto a equipe da SAC.

O problema desta pesquisa está localizado no ponto de interseção entre a etapa de desenvolvimento do projeto aeroportuário (realizada por empresas e profissionais especialistas) e a etapa de avaliação do projeto (realizada pelos órgãos competentes), a Figura 1 apresenta a localização do problema de pesquisa.

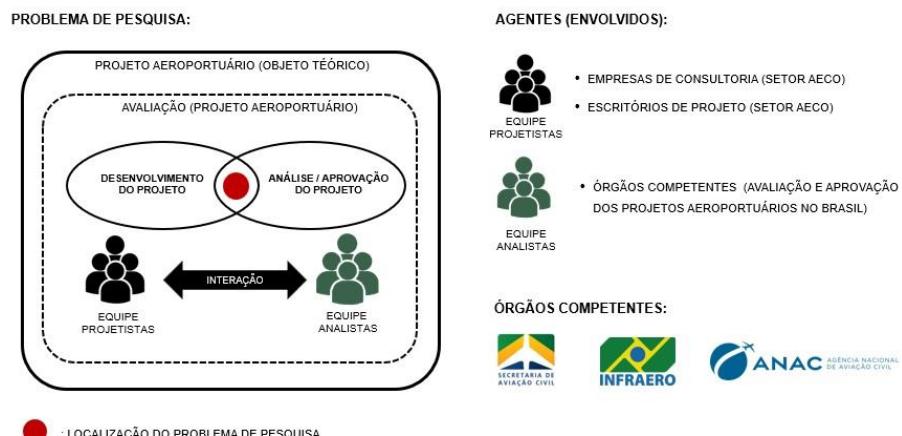


Figura 1. Localização do problema de pesquisa. Fonte: Autores, 2023.

Com base no problema exposto, este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um método que possa subsidiar os analistas de projetos aeroportuários no Brasil com base no paradigma de avaliação de projetos apoiada com a utilização de algoritmos de aprendizagem de máquina baseado nos dados contidos nos modelos digitais (BIM) dos aeroportos brasileiros avaliados pela equipe da Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC).

A primeira seção deste artigo aborda a fundamentação teórica sobre projetos aeroportuários, apresentando uma integração inovadora entre BIM e Inteligência Artificial (IA) evidenciando um novo horizonte para a avaliação de projetos aeroportuários orientadas por dados. A segunda seção apresenta a abordagem metodológica escolhida para desenvolvimento deste trabalho baseado no método Design Science Research (DSR). A terceira seção expõe os resultados alcançados mediante o treinamento de dois algoritmos de aprendizagem de máquina supervisionada baseado em redes neurais artificiais, sendo: i) rede neural multilayer perceptron (MLP) e II) rede neural profunda (Deep Learning) exibindo os resultados alcançados após treinamento e teste dos algoritmos. A quarta e última seção apresenta as considerações finais junto aos possíveis encaminhamentos futuros da pesquisa.

1.1 Processo de projeto

Desde a década de 1950 surgiram investigações relacionadas a metodologia de projeto quando arquitetos e engenheiros, atentos ao cenário científico, passaram a aplicar novas técnicas no desenvolvimento de projeto para melhoria da qualidade do processo e dos seus produtos (SOBRAL et al, 2017). Kalay (2004) expõe que o processo de projeto compreende em três atividades principais que são realizadas de maneira interativa: i) **Analizar** o problema e desenvolver um conjunto de objetivos que a solução proposta deve alcançar, juntamente com uma lista de restrições pelas quais a solução deve obedecer, ii) Sintetizar uma ou mais soluções que, com base na perspectiva do projetista irá atingir os objetivos e respeitar as restrições, iii) Prever e Avaliar os vários desempenhos das soluções propostas para verificar se são consistentes entre si e se, quando concretizadas, atingirão os objetivos.

Lawson (2005), propôs um modelo de processo de projeto considerando: i) análise, ii) síntese, iii) avaliação com o acréscimo do estágio iv) decisão, nesse modelo proposto por Lawson, além da inserção do estágio de decisão há dois pontos a se observar: há uma circularidade entre os estágios de síntese e avaliação, os estágios se repetem à medida que o processo de projeto evolui do geral para o específico. Essas diferentes abordagens do processo de projeto fazem com que cada decisão tomada em uma etapa, gere um impacto direto na etapa sucessora. Este trabalho realiza um aprofundamento teórico na etapa associada a avaliação do projeto.

1.2 Avaliação de projetos

Segundo Kalay (2004), a avaliação é uma consequência direta e derivada da incerteza inerente ao processo de projeto. Como não existem fórmulas ou procedimentos que possam ser seguidos pelos projetistas que garantam que uma determinada solução de projeto atenderá aos objetivos e expectativas do projeto, este projeto é necessariamente um processo de tentativa e erro - as soluções são sintetizadas e seus desempenhos esperados são previstos e julgados comparando-os com os objetivos e restrições do projeto (Kalay, 2004). As interpretações do significado de avaliação vão desde o diagnóstico retrospectivo (no sentido de avaliação pós-ocupação de projetos concluídos), até a avaliação preditiva, com o objetivo de escolher um curso de ação que produzirá os resultados mais benéficos na fase do desenvolvimento e análise de um determinado projeto (Kalay, 2004).

Segundo este autor, a etapa de avaliação é o processo que realiza tais previsões e comparações e determina se as soluções atendem aos objetivos e cumpram os objetivos, que não são cumpridos e fornecem informações sobre o que pode ser feito para melhorar o ajuste, modificando as soluções. Se o fizerem, a busca por uma solução estará encerrada. Caso contrário, a avaliação pode levar em conta as soluções, os objetivos ou ambos. Uma vez que o ajuste nunca é perfeito, sempre há desejos, expressos como características da solução que não foram levados em consideração pelos

objetivos. O objetivo principal da avaliação, no contexto do projeto, é determinar se a solução é adequada (Kalay, 2004). A Figura 2 apresenta a estrutura interativa do processo de avaliação.

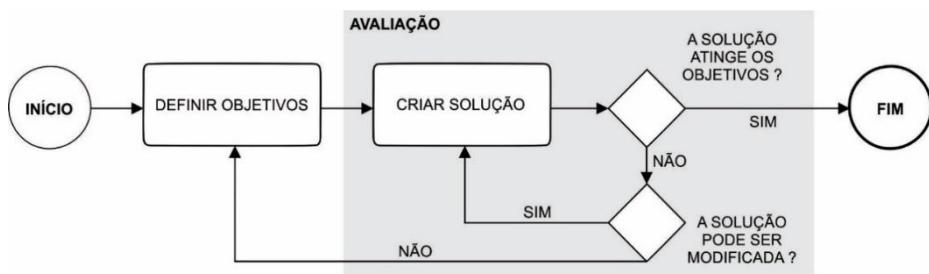


Figura 2. Estrutura iterativa do processo de avaliação. Fonte: Adaptação (Kalay, 2004).

1.3 Avaliação dos projetos aeroportuários

O desenvolvimento de um projeto aeroportuário (PA) demanda uma elevada complexidade devido a série de exigências e requisitos a serem atendidos na fase da concepção do projeto. A natureza desses requisitos a serem contemplados podem ser tanto estéticas quanto funcional (Silvestri, 2015).

O primeiro tipo refere-se ao conjunto e escopos mais significativos do empreendimento, bem como seus parâmetros incluindo elementos físicos, financeiros e cronograma. Já o segundo tipo, trata-se de elementos relacionados aos requisitos operacionais e funcionais dos clientes e agentes para o conjunto da obra (Silvestri, 2015).

No processo atual, os analistas necessitam visualizar todos os documentos submetidos pela equipe de projetistas individualmente visando identificar tanto as conformidades como as não conformidades contidas no projeto. No cenário atual, a equipe de projetistas desenvolve o Projeto Aeroportuário e o submete a um processo de validação manual realizado pela equipe de analistas. Além disso, os processos de avaliação são subjetivos nas análises, devido às diferentes perspectivas e expertises de conhecimento, específicos de cada analista no momento da análise (Guedes e Andrade, 2020).

Uma vez que o projeto aeroportuário é desenvolvido por um escritório especializado, este é submetido para os órgãos competentes como R00 (emissão inicial), através de arquivos abertos (.docx, .dwg,) e arquivos em formatos digitais (.pdf). É necessário que os arquivos em formato (.pdf) sejam todos impressos e assinados pelos respectivos responsáveis técnicos de cada disciplina de projeto (Santos, 2022). Em alguns casos os “Loopings” de avaliação (Ribeiro, 2015) podem ocorrer diversas vezes em uma única fase do projeto, quando um conjunto de documentos não atende os requisitos pré-estabelecidos a equipe de analista envia RAT's no caso da INFRAERO, pareceres de revisão no caso da SAC para equipe de projetistas, até o momento em que a documentação atenda aos requisitos, onde é emitido RAT's

ou pareceres de aprovação sinalizando o atendimento. Esse tipo de avaliação pode ser compreendido como um processo predominantemente analógico e sequencial.

Esse trabalho investiga como tornar esse processo mais automatizado e simultâneo tirando proveito de recursos computacionais associados a simbiose dos dados contidos no modelo BIM combinado IA com base na utilização de algoritmos de aprendizagem de máquina tendo em vista o potencial que os algoritmos de IA possuem para trabalhar com grandes volumes de dados. Ao utilizar a IA para avaliação de projetos aeroportuários, transcendendo a abordagem tradicional (baseada em papéis impressos) passando a explorar um novo paradigma de avaliação baseado em dados. Essa proposta visa promover redução do tempo de avaliação dos projetos, maior padronização (evitando avaliações subjetivas de diferentes perspectivas dos analistas de projetos aeroportuários) potencializando a maneira como os atuais projetos aeroportuários são avaliados no Brasil.

1.4 Modelagem da Informação da Construção (BIM)

Com base em Sacks et al. (2018, p.14), o Building Information Modeling (BIM), em português, Modelagem da Informação da Construção é "...uma tecnologia de modelagem e conjunto associado de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de construção".

Segundo Succar (2009), o BIM refere-se a um conjunto de políticas, processos e tecnologias que interagem, gerando uma metodologia para gerenciar os dados essenciais do projeto de construção e do projeto em formato digital ao longo do ciclo de vida do edifício. Até a era pré-BIM, a concepção e desenvolvimento do projeto de arquitetura eram realizados por meio de um exercício mental que gerava várias concepções espaciais e as avaliava de forma intuitiva, baseada no conhecimento do projetista e na experiência acumulada, Eastman (2009).

Com o avanço da maturidade dos projetistas tirando proveitos dos benefícios associados aos diferentes usos BIM (Succar, 2016) pertinente a fase de projeto no Brasil, surge um novo horizonte para que a equipe de analistas de projetos aeroportuários se beneficiem de usos associados a etapa de avaliação, dentre os usos possíveis, tem-se o uso pertinente a verificação automatizada de regras denominado *Code Checking* e *Validation* (Succar, 2016), esse uso segundo Eastman et al. (2009) pode ser utilizado a partir de: i) uma aplicação desenvolvida para funcionar em outra plataforma, ii) como um plug-in, permitindo a verificação em qualquer momento, iii) como um software de computador, paralelo ao software de projeto ou como aplicativo baseado na web, que aceita o projeto derivado de diversas plataformas, porém, esse uso BIM demanda de esforços consideráveis visando a criação de regras paramétricas e ou ajustes específicos para que seja possível realizar a verificação automatizada.

Tendo em vista que os modelos BIM carregam um valioso banco de dados associados aos seus componentes criados, esse trabalho investiga como conceber um método no qual seja possível explorar um novo paradigma de

avaliação de projetos aeroportuários orientados por dados combinado com algoritmos de aprendizagem de máquina, subárea do campo de conhecimento da Inteligência Artificial.

1.5 Inteligência Artificial / Aprendizagem de máquina

A Inteligência Artificial (IA) é um campo de conhecimento que vem sendo explorado por diferentes profissionais desde a segunda guerra mundial. Existem diversas definições sobre o significado da IA, Kurzweil (1990) caracteriza a IA como a arte de criar máquinas que executam funções que requerem inteligência quando executadas por pessoas. Nilsson (1998) propõe o entendimento da IA como o comportamento inteligente de artefatos. Haugeland (1985) caracteriza a IA como um ovo esforço empolgante para fazer os computadores pensarem.

A IA é um dos diversos campos de pesquisa da área da Ciência da Computação, no qual dentro desse campo, existe um subcampo denominado Machine Learning, em português, Aprendizagem de Máquina (AM). Segundo Mitchell (1997), o AM explora o uso de métodos computacionais a fim de adquirir novos conhecimentos, novas habilidades e novos meios de organizar o conhecimento existente, esse mesmo autor afirma que o AM se refere a “capacidade de melhorar o desempenho na realização de alguma tarefa por meio da experiência”.

Em um contexto geral os sistemas de AM são compreendidos em alguns paradigmas, dentre eles: Aprendizado supervisionado (paradigma utilizado neste artigo), Aprendizado Não-Supervisionado e Aprendizado por Reforço.

Em linhas gerais, do ponto de vista de funcionamento dos algoritmos de AM cada componente é subentendido como um vetor de atributos de entrada (x), tendo a variável resposta (y) e uma função desconhecida que visa aproximar x de y conforme apresentado na função (1) apresentada abaixo.

$$f = X \rightarrow Y \quad (1)$$

Essa função visa mapear a relação entre a variável resposta (y) e o vetor que caracteriza os atributos de entradas (x). O processo de treinamento de um algoritmo de aprendizagem de máquina é realizado considerando os exemplos de treinamento $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ para que posteriormente, seja possível que o algoritmo de aprendizagem possa gerar uma hipótese final através da função (2) apresentada a seguir.

$$g = X \rightarrow Y \quad (2)$$

Para este artigo foram selecionados dois algoritmos de aprendizagem de máquina baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA) para serem treinados com dados associados aos projetos aeroportuários. O primeiro algoritmo treinado refere-se a uma rede neural multilayer perceptron (MLP). Segundo

Oliveira (2004), essa arquitetura teve sua origem na década de 50, mais especificamente mediante os esforços desprendidos por Frank Rosenblatt em 1958. O modelo de neurônio MLP funciona calculando a soma ponderada (sinais de entrada), tendo a saída (Y) calculada utilizando uma função de ativação. A arquitetura da MLP foi desenvolvida com intuito de resolver problemas mais complexos não linearmente separáveis, considerando, ao menos, a inserção de uma camada oculta com intuito de construir uma rede multicamadas (Oliveira, 2004). A figura 3 apresenta uma estrutura básica da arquitetura de uma rede MLP.

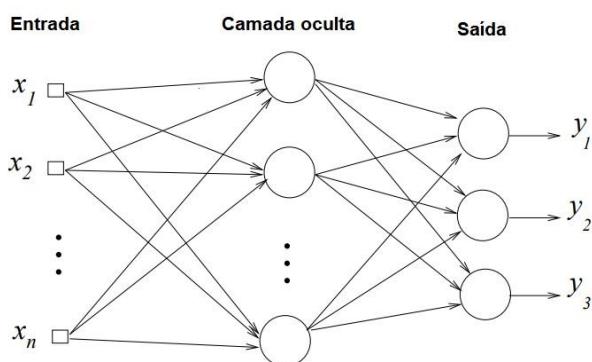


Figura 3. Rede MLP com uma única camada oculta. Adaptação (Oliveira, 2004)

O segundo algoritmo treinado refere-se a uma rede neural profunda denominada TabNet (Arik e Pfister, 2020). As redes neurais profundas, segundo Janiesch et al. (2021) possuem mais de uma camada oculta, além disso, contém um funcionamento aprimorado comparado as redes neurais simples, utilizando recursos avançados de operações, por exemplo convoluções ou múltiplas ativações em um neurônio ao invés de utilizar uma função de ativação simples. Essas características permitem que as redes DL possam ser alimentadas com dados de entradas visando descobrir automaticamente uma representação necessária para a tarefa de aprendizagem correspondente.

2 Metodologia

Esta pesquisa fez uso da abordagem metodológica Design Science Research (DSR), conhecida também como Constructive Research, a DSR trata-se de uma abordagem direcionada à solução de problemas. Segundo Çağdaş e Stubkjær (2011) a DSR refere-se a um processo rigoroso de projetar artefatos para solucionar problemas, avaliar o que foi projetado ou o que está funcionando, e comunicar os resultados obtidos.

Na DSR, a expressão artefato, pode ser entendida como, o cumprimento de um propósito, ou adaptação a um objetivo, envolve a relação de três elementos: propósito ou objetivo, caráter do artefato e ambiente em que este funciona. (Simon, 1996). Segundo Mach e Smith (1995), os artefatos podem ser definidos como: I) Constructos, II) Modelos, III) Métodos e Instanciações.

A justificativa para a escolha dessa abordagem metodológica deu-se em função que, 1) O problema apresentado neste trabalho trata-se de uma situação real referente ao processo de avaliação de Projetos Aeroportuários no Brasil, baseado na singularidade e complexidade de avaliar os projetos aeroportuários em um país com extensa diversidade geográfica, cultural e infraestrutural; 2) O caráter da pesquisa se enquadra na categoria inovação tecnológica, sendo adaptada para superar os desafios inerentes a avaliação dessa categoria de projeto tendo em vista tirar proveito de recursos computacionais de modelos digitais (BIM) com Inteligência Artificial relacionado a aplicação de técnicas de aprendizagem de máquina para avaliação de PA. A adoção da DSR para este trabalho, evidencia também a intenção dos autores em desenvolver uma solução que aproxima a teoria com a prática no contexto de avaliação de projetos aeroportuários, a DSR permite uma abordagem iterativa e reflexiva, possibilitando que a solução proposta por esse trabalho seja teoricamente sólida e aplicável do ponto de vista prático.

Este trabalho investigou de maneira preliminar como propor um método que possibilite que os analistas de projetos aeroportuários consigam realizar a avaliação automatizada com base nos dados contidos nos modelos digitais (BIM) dos projetos aeroportuários com auxílio de algoritmos de aprendizagem de máquina.

Desta maneira, foi elaborado um fluxo (Figura 4) no qual fosse possível capturar dados de projetos aeroportuários desenvolvidos em BIM, posteriormente seguiu para a fase de pré-processamento dos dados nesta etapa foi realizado pelos autores um pré-processamento do conjunto de dados, retirando atributos com valores ausentes nos modelos padrões dos TPS, após essa etapa seguiu-se para a fase de treinamento e teste de dois algoritmos de aprendizagem de máquina. Visando treinar os dois algoritmos, foi criado um conjunto de dados contendo uma variação de 1000 exemplos distribuídos em 30 atributos de projetos aeroportuários com base nos padrões dos terminais de passageiros (TPS) dos aeroportos regionais atualmente construídos no Brasil, sendo eles: tipo TPS-M0 (630m²), TPS-M1 (1.210,00m²), TPS-M2 (1.210,00m²) e TPS-M3 (2.749,00m²) projetos oriundos do Programa de Investimento e Logística (PIL, 2012) do governo brasileiro.

Os 30 atributos selecionados para treinamento dos algoritmos foram baseados em 15 áreas dos TPS conforme apresentadas a seguir: 1) checking, 2) fila de embarque, 3)BVRI, 4) posto de saúde, 5) sala multiuso, 6) backoffice, 7) manutenção, 8) sala do cliente, 9) vistoria, 10) restituição de bagagens, 11) administração, 12) praça de bagagem embarcada, 13) praça de bagagem desembarcada, 14) apoio pátio e 15) passeio acesso, sendo estabelecidos valores de referências pertinentes a largura (L) e profundidade (P) desses

ambientes (totalizando os 30 atributos a serem utilizados). Todas essas áreas estão contidas nos projetos padrões dos TPS regionais (M0, M1, M2 e M3).

No contexto atual, a depender do tipo do TPS a ser construído e da peculiaridade de cada aeroporto (necessidades específicas), essas áreas podem sofrer ajustes (para mais ou menos) respeitando os valores recomendados pelas diferentes diretrizes normativas, isso faz com que cada projeto seja diferente e que a equipe de analistas de projetos aeroportuários dedique um tempo elevado (processo atual de avaliação) verificando cada área em questão.

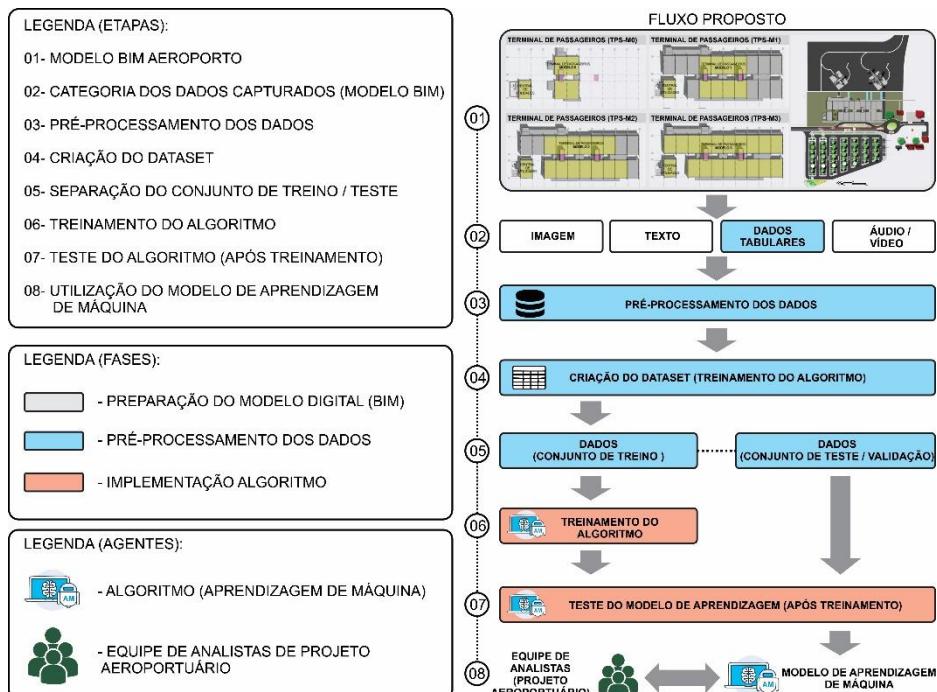


Figura 4. Fluxo proposto com as etapas estabelecidas para treinamento dos algoritmos. Fonte: Autores, 2023.

Dessa maneira, uma vez criado o dataset (Figura 4) foi possível treinar os dois algoritmos de aprendizagem de máquina escolhidos, visando avaliar a capacidade dos algoritmos auxiliarem os analistas de projetos aeroportuários (situação proposta) realizando a predição de novos dados visando promover maior padronização no processo de avaliação dos projetos, reduzindo o tempo de análise / avaliação.

3 Resultados

Mediante a criação do dataset (**dados tabulares**) com os 30 atributos mencionados anteriormente, sendo estabelecido uma variação de 1000 exemplos de maneira equilibrada (50% exemplos aptos / 50% exemplos não aptos), respeitando as medidas admissíveis mínima e máxima com base no Manual de Critérios e Condicionantes de Planejamento Aeroportuários da INFRAERO (2006). Após a criação do dataset, foi realizado um pré-processamento nos dados **no ambiente de programação visando promover** a redução de dimensionalidade **dos dados** evitando que houvesse menor influência de outliers. Visando rotular a variável resposta para cada exemplo, foi criada uma coluna denominada “status” no dataset contendo o valor 0 para os exemplos não aptos, e o valor 1 para os exemplos aptos.

Para realizar o treinamento dos dois algoritmos (MLP e TabNet), foi adotada a técnica holdout (Raschka, 2020) separando 80% dos exemplos para treino e 20% dos exemplos para teste. Os dois algoritmos escolhidos foram implementados de forma individualizada em linguagem PYTHON na plataforma Google Collab executada on-line em um notebook contendo as seguintes características, processador Intel i7, CPU @2.20GHz e 8GB de memória RAM.

Os resultados alcançados após o treinamento dos dois algoritmos selecionados apontam que ambos conseguiram mapear o espaço de hipótese do problema em questão. O algoritmo baseado em uma arquitetura MLP conseguiu alcançar uma acurácia de 88,25% (treino) e 77,25% (teste). O segundo algoritmo baseado em uma Rede Neural profunda denominada TabNet conseguiu obter uma acurácia de 88,76% (treino) e 93,33% (teste) ambos os códigos e dataset podem ser acessados em Santos, I.G. (2023). Tanto o modelo MLP quanto o TabNet demonstraram que possuem potencial para realização desse tipo de atividade. A busca por um conjunto ideal de hiperparâmetros pode ser crucial para melhorar o desempenho dos modelos, parâmetros como exemplo: taxa de aprendizado, profundidade da rede neural e quantidade de características selecionadas podem influenciar diretamente na capacidade de generalização dos modelos.

4 Considerações Finais

Este trabalho investigou de maneira preliminar o potencial de conceber um método baseado no novo paradigma de avaliação para os projetos aeroportuários no Brasil com base nos dados contidos nos modelos digitais (BIM) apoiado na utilização de algoritmos de aprendizagem de máquina. O avanço no desenvolvimento dos projetos aeroportuários no Brasil utilizando o BIM possibilita que o campo de avaliação de projetos aeroportuários possa se beneficiar dos bancos de dados contidos nos modelos digitais, tirando proveito de novas abordagens visando otimizar o processo de avaliação, promovendo

maior padronização, reduzindo a subjetividade dos processos de avaliação, reduzindo o esforço dos analistas e o tempo de avaliação dos projetos que atualmente ocorrem de maneira analógica baseado em desenhos CAD 2D descritivos (Oxman, 2006). Com a ascensão da Inteligência Artificial no setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AECO), surgem novos paradigmas para que os profissionais do setor AECO possam se beneficiar.

Para desdobramentos futuros, ou autores desejam ampliar o conjunto de dados para treinamentos dos modelos de AM, assim como, mesclar dados quantitativos com dados qualitativos, a fim de analisar quão bem modelos de AM irão se comportar. Os autores também recomendam a utilização de outros algoritmos ou combinações de modelos visando alcançar melhores resultados, tendo em vista a quantidade elevada de modelos de AM e técnicas disponíveis. Este artigo, apresentou desdobramentos iniciais de uma pesquisa de doutorado em andamento que visa criar um método de avaliação para os projetos aeroportuários no Brasil.

Referências

- Arik, S. O.; Pfister, T (2020). TabNet: Attentive Interpretable Tabular Learning.
- Brasil. Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modelling. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 163, p. 2-3, 23 ago. 2019.
- Brasil. Lei nº 10.306, de 2 de abril de 2020; 199 da independência e 132º da república. Estabelece a utilização do Building Information Modeling na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal, no âmbito da Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modeling - Estratégia BIM BR. Brasília: Presidência da República, 2020.
- Çağdaş, V.; Stubkjær, E. (2011). Design research for cadastral systems. Computers, Environment and Urban Systems, 35, p. 77-87.
- Eastman, C. et al. (2009). Automatic rule-based checking of building designs. Automation in Construction, v.18, n.8, p.1011-1033.
- INFRAERO (2006). Memorial de Critérios e Condicionantes - Arquitetura / TPS. codificação:GE.01/201.75/00947/02.
- Janiesch F., Zschech P. (2021), and Heinrich K. Machine learning and deep learning. Electronic Markets, 31(3), 685–695. doi: 10.1007/s12525-021-00475-2.
- Kalay, Y. (2004). Architecture's new media The MIT Press, Cambridge.
- Kurzweil, R. (1990). The Age of Intelligent Machines. MIT Press.
- Lawson, B. (2005). How designers think: the design process demystified. 4 ed. Oxford: Elsevier / Architectural.
- Rosenblatt F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychol. 65, 386-408.

- Sobral, R.; Azevedo, G.; Guimarães, M. (2017). Design Methods Movement: as origens das pesquisas sobre métodos de projeto, 27-42.
- Guedes, Í.; Andrade, M. (2020). Standardization of Airport Architectural Design Projects BIM-based for Code Checking. p. 490-498. In: Congreso SIGraDi 2020. São Paulo: Blucher.
- Haugeland, J. (1985). Artificial Intelligence: The Very Idea. MIT Press.
- March, S. T.; Smith, G. F. (1995). Design and natural science research in Information Technology. Decision Suport Systems, v. 15, p. 251-266
- Mitchell, T. M. (1997). Machine Learning. McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA, 1 edition.
- Nilsson, N. J. (1998). Artificial Intelligence: A New Synthesis. Morgan Kaufmann.
- Oliveira, A. L. I. (2004). Neural networks forecasting and classification-based techniques for novety detection in time series. Tese de doutorado – Universidade Federal de Pernambuco. Cln. Ciência da Computação.
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first age. Design Studies, v. 27, n. 3, p. 229-265
- Ribeiro, J. Matriz semântica para projetos aeroportuários no Brasil (2015). Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília.
- R. Sacks, C. Eastman, G. Lee, and P. Teicholz (2018). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. (Third ed.). John Wiley & Sons Inc.
- SAC. Manual de projetos aeroportuários (2021). [livro eletrônico]: volume único - 1. ed. - Brasília, DF: Secretaria Nacional de Aviação Civil.
- Santos, I. G. (2022). Verificação automatizada de regras em projetos de arquitetura de terminais de passageiros aeroportuários com base em BIM. Recife / PE. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento Urbano, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Santos, I. G. (2023). Códigos criado pelos autores (treinamento dos algoritmos). Disponível em: https://github.com/igsufpe/SIGraDi_2023.
- Simon, H. A. (1996). The Sciences of the Artificial. 3.ed. Cambridge, MA: MIT Press.
- Silvestri, A. L. S. (2015). Termo de referência para a Gestão de Projetos Arquitetônicos de Terminais Aeroportuários regionais de passageiros. Tese de doutorado – Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
- Succar, B. (2009). Building Information Modelling Framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in Construction, v. 18, n. 3, p. 357-375.
- Succar, B., Saleeb, N., Sher, W. (2016), Model Uses: Foundations for Modular Requirements Clarification Language, Australasian Universities Building Education (AUBEA2016), Cairns, Australia, July 6-8.