XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Proposta de modelo probabilístico para avaliar o conforto ambiental interno de ambientes

Probabilistic model proposal to evaluate the indoor environmental comfort of rooms

Rafaela Bortolini
Universidade Federal de Pelotas | Pelotas | Brasil | rafaela.bortolini@ufpel.edu.br
Luisa Rodrigues Félix Dalla Vecchia
Universidade Federal de Pelotas | Pelotas | Brasil | luisa.vecchia@ufpel.edu.br
Raul Balbinoti Rodrigues
Universidade Federal de Pelotas | Pelotas | Brasil | raulbalbinotirodrigues@gmail.com

Resumo
Este trabalho adapta um modelo probabilístico que tinha o objetivo de avaliar o conforto ambiental interno de uma edificação. A adaptação proposta muda o foco para um ambiente específico, e aprimora o modelo considerando a coleta de dados monitorados por sensores, tornando a entrada de dados mais complexa. Para tanto, as variáveis do modelo e as relações de causalidade entre elas foram revistas. Além disso, intervalos dos possíveis estados de algumas variáveis foram definidos com base em uma revisão de literatura e normatizações. Os resultados incluem o modelo e uma discussão sobre sua aplicabilidade na criação de um Gêmeo Digital.

Palavras-chave: Conforto ambiental interno. Desempenho. Redes bayesianas. Modelo da Informação da Construção. Gêmeo digital.

Abstract
This paper shows the adaptation of a probabilistic model. Originally, the model was meant for evaluating de indoor environmental comfort of entire buildings. This study adapts the model shifting its focus to the evaluation of individual rooms. This study also improves the model by considering the collection of data from sensors, making the data entry more complex. As part of the methodology, we reviewed the variables of the model, and their causal relationships. Furthermore, we defined ranges of possible states of some variables, based on literature review and technical standards. The results include the proposition of the adapted model and a discussion about its applicability in the creation of a Digital Twin.

Keywords: Indoor Environmental Comfort. Performance. Bayesian networks. Building Information Modeling. Digital Twin.

Como citar:
BORTOLINI, R., DALLA VECCHIA, L. R. F., RODRIGUES, R. B. Proposta de modelo probabilístico para avaliar o conforto ambiental interno de ambientes. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

INTRODUÇÃO

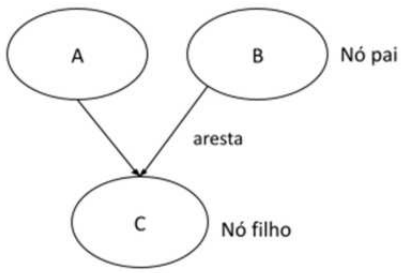
As pessoas passam mais de 90% do seu tempo em ambientes fechados, isso demanda que os ambientes construídos promovam o bem-estar e a saúde dos seus usuários [1]. As intercorrências da pandemia (Covid-19) reforçaram a importância de espaços saudáveis [2]. Além disso, custos elevados na operação dos edifícios e a insatisfação dos usuários com relação ao conforto e bem-estar têm exigido mudanças na gestão das edificações, na promoção de ambientes com melhor desempenho.

O desempenho da edificação com relação ao conforto ambiental interno é influenciado por diversas variáveis, incluindo o estado de conservação dos elementos e sistemas do edifício, como a envoltória da edificação (ex.: isolamento térmico) e estado de conservação do sistema de ar-condicionado [3,4]. A análise das variáveis que interferem no conforto da edificação possuem relações de causalidade e *Bayesian Networks* (redes Bayesianas) podem ser usadas para apoiar esta análise [3].

Uma *Bayesian Network* (BN) consiste em uma estrutura gráfica causal para modelar relações de causa e efeito de problemas do mundo real [5]. BNs têm a capacidade de integrar vários assuntos, interações e investigar *trade-offs* entre as variáveis. Além disso, BNs podem usar dados e conhecimento de diferentes fontes e lidar com falta de dados. Lidar com falta de dados significa lidar com incertezas, e BN lida com este problema por meio da estabelecida teoria de probabilidade [6]. Consequentemente, e neste contexto específico, BNs podem ser usadas para criar as relações e entender o comportamento entre as principais variáveis que influenciam o desempenho com relação ao conforto ambiental interno de um ambiente.

Em uma BN, cada variável é representada por um nó. Quando dois nós são conectados por uma aresta, o nó causal é chamado de pai (A e B) do outro nó, chamado de nó filho (C) (Figura 1). Os nós filhos são condicionalmente dependentes de seus nós pais [7].

Figura 1: Exemplo de BN



Fonte: Autor.

Em suma, uma BN consiste em:

- Um conjunto de variáveis e um conjunto de arcos ligando as variáveis.
- Cada variável possui um conjunto limitado de estados mutuamente exclusivos.
- As variáveis e arcos formam um grafo dirigido acíclico (DAG).
- Para cada variável e seus cruzamentos condicionais, temos uma tabela de probabilidade condicional (CPT) explicando numericamente a chance de cada evento ocorrer.

As CPTs especificam o grau de crença (expresso como probabilidades) de que o nó estará em um determinado estado, dados os estados dos nós pais (os nós que afetam diretamente esse nó) [8]. As dependências entre as variáveis em uma BN podem ser descritas tanto qualitativamente quanto quantitativamente, sendo adequadas para representação e raciocínio do conhecimento [9]. Na teoria da probabilidade, os pesquisadores estão preocupados não apenas com a presença ou ausência de relações causais, mas também com as forças relativas dessas conexões e com as formas de inferir essas conexões a partir de observações [8].

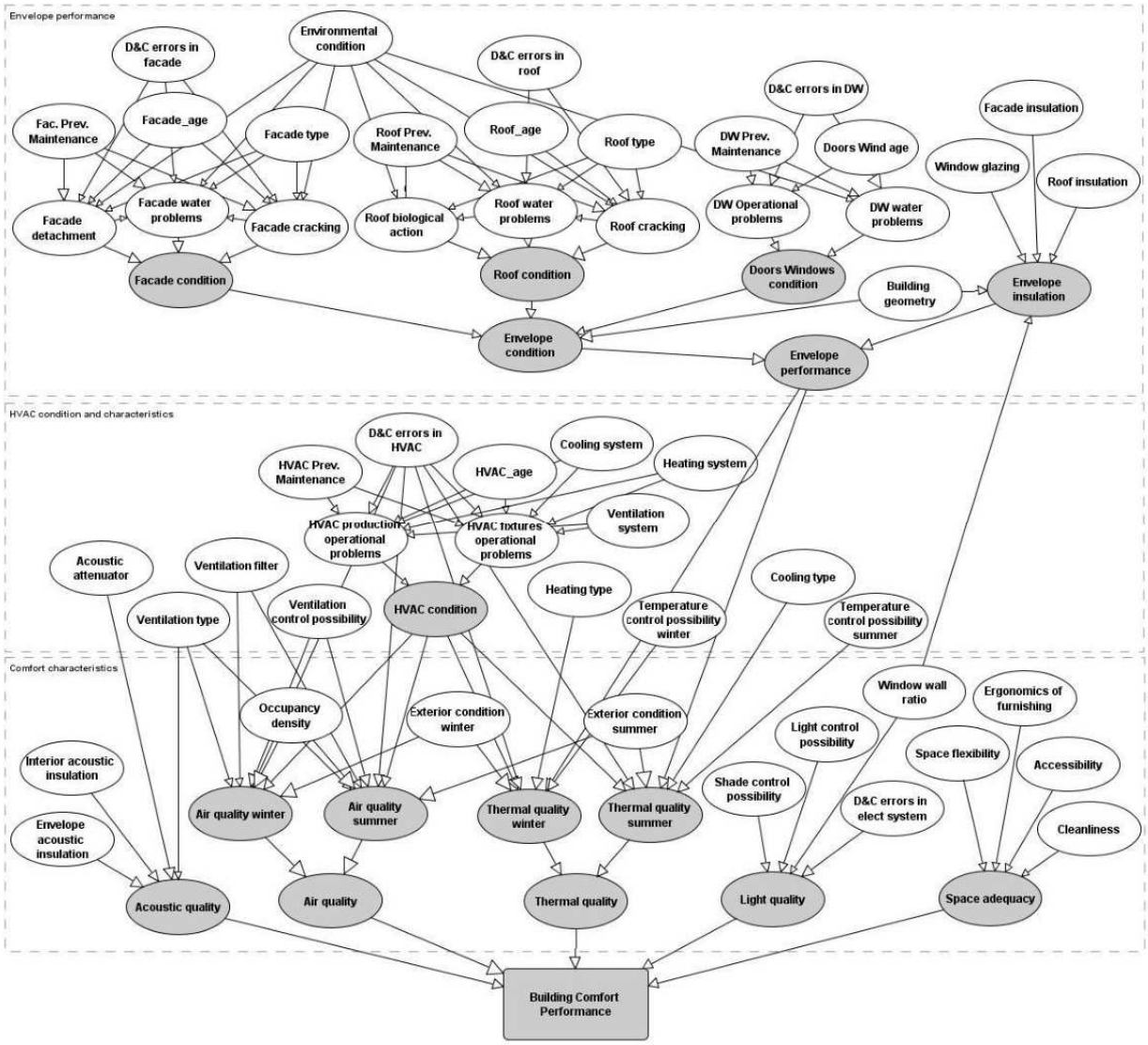
Algumas pesquisas utilizaram BN para analisar a satisfação dos usuários com serviços específicos [10,11] ou para prever preferências térmicas [12,13]. No entanto, o uso de BN para modelar o conforto ambiental interno considerando variáveis em um sistema de causa e efeito não foi investigado até o momento, a não ser a pesquisa de Bortolini [14]. O presente trabalho buscou aprimorar o modelo de BN proposto por Bortolini [14] e adaptá-lo a um ambiente, para analisar as implicações de outras fontes de dados de forma complexa. Este modelo [14] não incluiu a entrada de dados dinâmicos, ou seja, monitorados e coletados através de sensores, apresentando uma lacuna. Esta pesquisa faz parte de um projeto de pesquisa em andamento, cujo objetivo final é a criação de um Gêmeo Digital para apoiar a tomada de decisões com relação ao conforto de ambientes internos. Portando, este trabalho se limita a apresentar a adaptação deste modelo para um ambiente.

REVISÃO TEÓRICA

BAYESIAN NETWORKS, BIM E GÊMEO DIGITAL

O modelo probabilístico proposto por Bortolini [14] buscou avaliar o conforto de uma edificação inteira e o conforto dos usuários em um sentido global (Figura 2). Uma extensa revisão de literatura e avaliação das variáveis e suas relações causais, apoiada pelos resultados de uma pesquisa de satisfação com mais de mil usuários, serviram de base para construção do modelo. A descrição detalhada da construção deste modelo consta em Bortolini e Forcada [3]. Dentre as aplicações práticas deste modelo, destaca-se a possibilidade de apoiar os gestores de *facilities* na tomada de decisão, constituindo-se em uma ferramenta de comunicação que evidencia as relações causais entre as variáveis e possibilita a criação de simulações de cenários de diagnósticos sobre o conforto da edificação.

Figura 2: Modelo probabilístico utilizado como base para adaptação



Fonte: Bortolini [14].

Dada a estrutura gráfica DAG, outra definição importante das BNs é a evidência. A evidência refere-se ao fato de uma variável ser indicada pelo usuário da rede, ou seja, uma variável com valor (estado) conhecido é definida na rede. Basicamente, é possível definir uma evidência com uma observação. Através das evidências são realizadas inferências probabilísticas para a rede em estudo.

Neste modelo de BN em estudo (Figura 2), as evidências são inseridas manualmente pelo usuário da rede. Na proposição da pesquisa de Bortolini [14], a primeira parte do modelo, ou seja, na análise do desempenho da envoltória da edificação, a coleta de dados das variáveis é feita através de inspeções prediais. A segunda parte do modelo, com relação as características e condições do estado de conservação do sistema de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC), dados de reclamações de usuários são coletados e analisados. Por último, os dados referentes a qualidade acústica, qualidade térmica, qualidade do ar, qualidade lumínica e adequação do espaço, são obtidos através da aplicação de uma pesquisa de satisfação com os usuários. Isso

implica na coleta de dados de diferentes plataformas que normalmente não estão vinculadas, onerando a utilização do modelo.

Visando a operacionalização deste modelo, a pesquisa de Alavi *et al.* [15] explorou a conexão do modelo BN com uma plataforma *Building Information Modeling* (BIM). O objetivo foi capturar automaticamente alguns dados da edificação referentes a algumas das variáveis, reduzindo o tempo e o esforço na entrada manual de evidências no modelo BN. No entanto, dados dinâmicos, ou seja, dados coletados por sensores, não foram incorporados nesta pesquisa, apresentando uma lacuna.

Neste contexto, quando dados monitorados por sensores são combinados por um modelo virtual, temos a base para a criação de um sistema *Digital Twin* (DT) - Gêmeo Digital [16]. O conceito de DT existe desde 2002, e foi usado pela primeira vez no campo aeroespacial [17]. A definição de DT é dada por Glaessgen e Stargel [18]:

> *Gêmeo digital é uma simulação multifísica, multe escala e probabilística integrada de um produto complexo e usa os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, etc., para espelhar a vida de seu gêmeo correspondente.* [18] *(tradução nossa)*

Portanto, o DT consiste em três partes: produto físico, produto virtual e dados conectados que unem o produto físico e o virtual [16]. Desta maneira, os modelos BIM, sendo representações digitais semanticamente ricas, podem fornecer uma ótima base para configurar um DT [19]. Embora os sensores a serem empregados sejam significativamente diferentes, alguns pesquisadores sugerem que um DT de uma edificação deve ser baseado na integração do BIM com a tecnologia IoT (*Internet of Things*), para permitir uma integração de vários dispositivos e os dados que eles produzem [19].

MÉTODOS

Este estudo faz parte de uma pesquisa mais ampla que se encontra em andamento. A construção do modelo de base foi baseada em métodos existentes [20] e consistiu em quatro etapas principais: identificação das variáveis, definição da estrutura do modelo, definição das CPTs e avaliação do modelo. A informação detalhada desta etapa pode ser consultada em [3].

O desenvolvimento deste estudo de adaptação do modelo para ambientes foi dividido em duas etapas principais:

(1) Adaptação do modelo probabilístico. Nesta etapa o modelo desenvolvido por Bortolini [14], que pode ser visto na Figura 2, foi adaptado para uso em apenas um ambiente. Para tanto se fez necessário revisar cada um dos nós (variáveis) e determinar se o parâmetro considerado tem influência sobre o conforto de um ambiente. Caso sua influência seja apenas para a edificação como um todo o nó foi removido do modelo adaptado. Tendo em vista os objetivos mais amplos da pesquisa como um todo, considerou-se também a possibilidade de entrada de dados dinâmicos que possam ser coletados e monitorados a partir de sensores. Sendo assim, nós que dependem de entrada de dados qualitativos ou demasiadamente subjetivos também

foram retirados do modelo. Este processo de adaptação teve início pela parte inferior do modelo, considerando primeiro as principais variáveis de conforto ambiental. Caso algum nó seja retirado, as variáveis que o influenciam também são retiradas. Para os nós que são mantidos, faz-se então a mesma análise para as variáveis que o influenciam, considerando se esta influência se faz presente no caso de um ambiente. De maneira similar, os fatores que influenciam o conforto de um ambiente foram considerados para determinar a necessidade ou não de acrescentar nós ao modelo. Os nós também foram revisados para ajustar os parâmetros considerados à forma como influenciam um ambiente.

(2) Identificação de intervalos numéricos. Uma vez estabelecido o novo modelo probabilístico cada nó foi revisado para estabelecer intervalos numéricos para a avaliação de seus parâmetros sempre que possível, mas principalmente para as principais variáveis de conforto que serão medidas a partir de sensores: qualidade térmica, lumínica, acústica e qualidade do ar. Tal estabelecimento de intervalos numéricos se faz necessário para permitir que o modelo seja vinculado à leitura dos valores obtidos através de sensores no ambiente e o modelo BIM visando o estabelecimento de um gêmeo digital. Os parâmetros numéricos de conforto para cada nó foram estabelecidos a partir de normas técnicas, padrões internacionais e bibliografia de pesquisas na área de cada um dos nós considerados. Para cada um dos nós foram estabelecidos intervalos de valores ideais, intervalos de desempenho médio e intervalos de valores de desempenho ruim para cada parâmetro que influencia o conforto do ambiente. Cabe salientar que a otimização de tais parâmetros muitas vezes depende do tipo de ambiente que está sendo considerado. Portanto para este estudo os intervalos numéricos foram estabelecidos para uma sala de aula de uma faculdade de arquitetura.

Cabe destacar que a pesquisa como um todo visa também validar o modelo adaptado aplicando-o no formato de gêmeo digital de um ambiente existente. Entretanto, este estudo limita-se à adaptação inicial do modelo a partir de referencial teórico. Portanto, nos resultados são discutidas as mudanças feitas a partir do modelo original adotado. Além disso, os critérios adotados para tais mudanças e estabelecimento dos intervalos numéricos também são discutidos. Os nós que não são discutidos nos resultados mantiveram sua configuração original estabelecida em Bortolini [14].

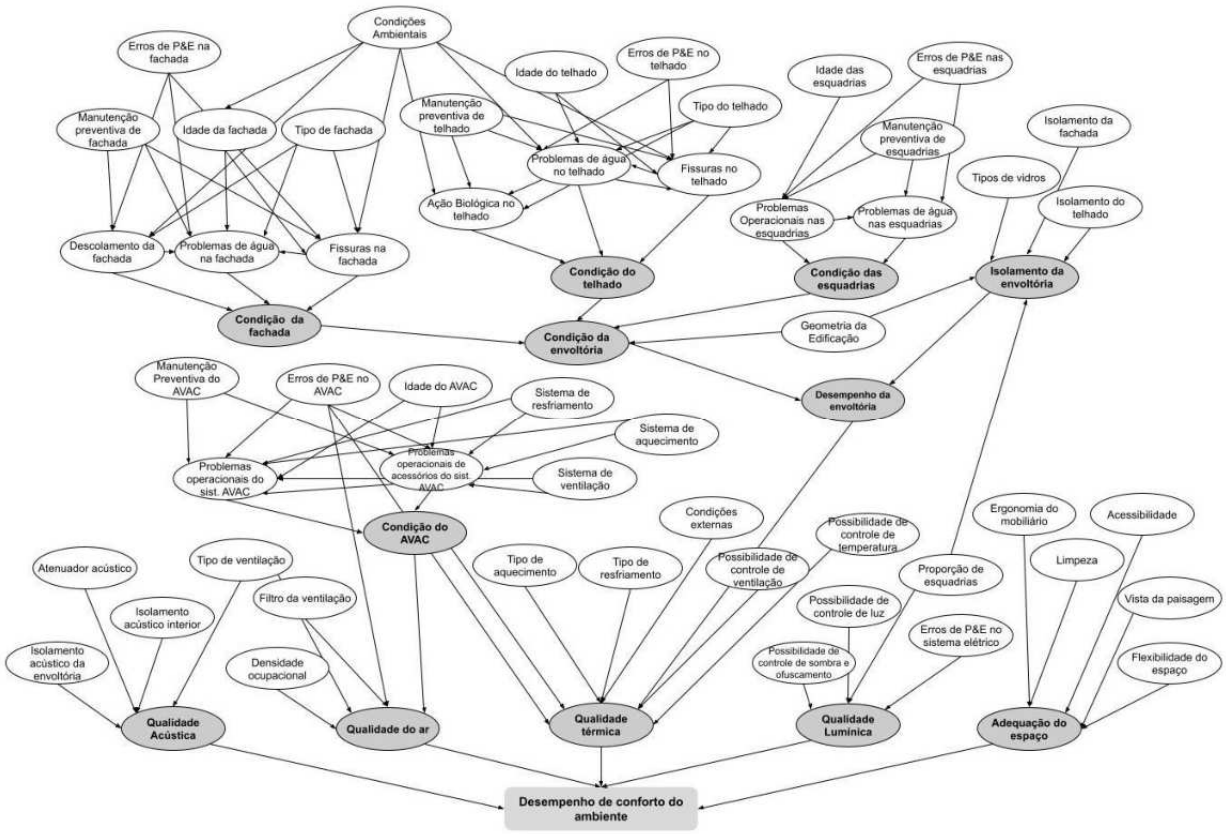
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da análise dos nós realizada na etapa 1 chegou-se ao novo modelo probabilístico, para aplicação em um ambiente, demonstrado na Figura 3.

O modelo se organiza a partir das principais variáveis de conforto ambiental interno, ou seja, qualidade térmica, acústica, lumínica e qualidade do ar. Estas variáveis podem ser vistas como nós na parte inferior da Figura 3. São vinculados a cada um desses nós as variáveis daquilo que os influencia em uma cadeia de causa e efeito. A explanação detalhada da construção do modelo está descrita em [3,4]. Na parte central da figura estão variáveis com relação as principais características dos sistemas AVAC bem como o estado de conservação deles. Bortolini e Forcada [4] explicam que a operação

inadequada ou a falha do sistema AVAC pode levar a uma ventilação deficiente, que por sua vez pode causar uma série de problemas de saúde e uma condição chamada síndrome do edifício doente. Erros de projeto ou na construção (P&E) estão relacionados com o dimensionamento incorreto dos sistemas de condicionamento ou a falha no projeto com relação ao controle de luz natural adequado, por exemplo. Na parte superior da figura, estão as variáveis relacionadas as principais características e ao estado de conservação da envoltória da edificação. Para cada componente da envoltória (fachada, cobertura e aberturas), foram identificadas as principais patologias que afetam cada elemento, pois problemas como umidades nas paredes por exemplo, se mostraram relevantes em pesquisas sobre o conforto dos usuários [21].

Figura 3: Novo modelo probabilístico após adaptação para um ambiente



Fonte: Autor.

Conforme descrito nos métodos, cada uma das variáveis foi avaliada quanto a sua influência em um único ambiente. Algumas variáveis tiveram alteração na forma como são utilizadas no modelo probabilístico. A variável de proporção de vidro nas paredes teve seus parâmetros alterados para considerar a proporção de área de piso em relação a área de janelas. No modelo anterior a relação considerada era área total de aberturas na fachada em relação a área total da fachada. Entretanto, considerou-se que para um ambiente a influência das janelas deve ser considerada em relação a área daquele ambiente tal como aparece nos códigos de obras. As variáveis de condições

da fachada e condições do telhado foram alteradas para permitir que sua influência no restante do modelo seja ou não considerada. A escolha de ativá-las ou não se dá dependendo da posição do ambiente no interior do prédio. Apenas ambientes no pavimento diretamente abaixo do telhado devem ter a variável de condição do telhado ativada. Da mesma forma, ambientes que não possuem interface com a fachada devem ter essa variável desligada. Além disso, essas variáveis devem levar em conta apenas a porção de fachada ou telhado que estão diretamente em interface com o ambiente considerado. A possibilidade de controlar o ofuscamento da luz do sol também foi adicionada junto a variável de controle da sombra. A separação por inverno e verão tanto na qualidade térmica como na qualidade do ar foram retiradas, tendo em vista que o objetivo do gêmeo digital é a realização de uma análise de conforto em um determinado momento, independente da estação do ano.

Os intervalos numéricos a serem considerados para as variáveis que sofreram alteração durante o desenvolvimento deste estudo, bem como as fontes que foram revisadas para seu estabelecimento, podem ser vistos no Quadro 1. Os intervalos, bem como o método e referências para obtê-los, para as demais variáveis, que não foram alteradas, podem ser vistos em [3].

Para alguns dos nós os intervalos foram utilizados tal qual aparecem nas referências [3,4], tendo em vista que estas já estabelecem valores ideais, intermediários e ruins, como é o caso da variável de transmitância térmica (valor U) da fachada que teve seus intervalos retirados diretamente de [22]. Entretanto, para alguns nós foi necessário utilizar uma combinação de referenciais para estabelecer tais intervalos. Por exemplo, para a qualidade lumínica de uma sala de aula a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 [23] estabelece uma iluminância de 500 lux no plano de referência para salas de aulas noturnas, classes e educação de adultos. Entretanto, para a funcionalidade desejada do modelo probabilístico é necessário o estabelecimento de intervalos além do ideal. Portanto, este parâmetro foi usado em combinação com os parâmetros de outros ambientes desta mesma norma (tal como salas de desenho, visto se tratar de faculdade de arquitetura) e de outras fontes, como a normativa anterior a qual estabelecia intervalos para cada ambiente [24], para se chegar aos intervalos apresentados no Quadro 1. Em relação à qualidade acústica, esta foi definida por meio das diretrizes definida pela Organização Mundial da Saúde e também pela ABNT NBR 10152 [25]. Os intervalos referentes à qualidade do ar foram definidos baseado em um estudo [26] que relacionava o desempenho escolar de alunos com a alta concentração de CO_2 em salas de aula. Ademais, a qualidade térmica foi definida relacionando duas referências na área [27,28], o que permitiu chegar aos intervalos demonstrados no Quadro 1.

Quadro 1: Estabelecimento de intervalos numéricos para as variáveis.

Variável analisada	Intervalos definidos	Classificação	Referência
Qualidade acústica	< 40 dB	Ótimo	[25]
	40 a 50 dB	Aceitável	
	> 50dB	Ruim	
Qualidade do ar	< 800 ppm de CO_2	Ótimo	[26]

		800 a 1600 ppm de CO_2	Aceitável	
		> 1600 ppm de CO_2	Ruim	
Qualidade Lumínica		300 a 500 lux	Ótimo	[23,24]
		200 a 300 ou 500 a 750 lux	Aceitável	
		< 200 ou > 750 lux	Ruim	
Qualidade Térmica	Inverno	21 a 23° C	Ótimo	[27,28]
		18 a 20°C ou 23 a 25°C	Aceitável	
		< 18°C ou > 25°C	Ruim	
	Verão	23 a 25° C	Ótimo	
		20 a 22°C ou 25 a 27°C	Aceitável	
		< 20°C ou > 27°C	Ruim	

Fonte: o autor.

As aplicabilidades do modelo proposto incluem:

- Diagnósticos: Dos efeitos para as causas.
- Causas: De causas para efeitos.
- Intercausais: Entre causas de um efeito comum.

Além de consultas a partir de evidências, redes Bayesianas podem ser utilizadas para informar diversas análises sobre o ambiente e seu conforto. Uma das principais utilidades nesse sentido diz respeito a informar a tomada de decisões baseada em probabilidades. Com o modelo probabilístico implementado como uma rede Bayesiana é possível variar os parâmetros dos diferentes nós sob o qual se tem controle e rapidamente visualizar seus efeitos no desempenho de conforto ambiental. Outro aspecto útil das redes Bayesianas se refere a possibilidade de analisar o sistema a fim de buscar os aspectos do modelo que possuem maior impacto sob as variáveis de consulta. Ou seja, a possibilidade de compreensão de quais fatores mais influenciam determinado aspecto do conforto ambiental, permitindo, assim, agir sobre esses fatores economizando recursos de ação que de outra forma seriam usados em fatores com pouca influência no aspecto que se deseja mudar. Neste sentido, ações de manutenção da edificação podem ser priorizadas levando em consideração as variáveis de conforto ambiental. Como exemplo, a condição da envoltória da edificação e a condição do sistema AVAC tem um impacto na qualidade térmica e podem ser melhoradas potencialmente. Com base no impacto desses fatores causais no desempenho térmico, os proprietários, junto com o gestor de *facilities*, podem priorizar se farão alguma ação para melhorar o isolamento térmico da fachada, ou até mesmo alterar ou atualizar os equipamentos de AVAC, entre outros fatores. Portanto, além de usar o modelo como ferramenta de avaliação de desempenho, os gerentes de *facilities* podem criar cenários hipotéticos e simular resultados antes de finalizar um planejamento de reforma ou *retrofit*.

Estas redes permitem ainda decidir quais evidências adicionais devem ser observadas a fim de se obter informações úteis do sistema. Além disso, a possibilidade de explicar os resultados de uma inferência probabilística aos usuários é uma vantagem

significativa de tais redes. O nível de conforto do ambiente poderá ser estimado quando as características da edificação e as condições ambientais são conhecidas. No entanto, quando são incluídas evidências sobre as variáveis de conforto ambiental interno (sensores), o modelo também fornecerá as causas mais prováveis de insatisfação. Portanto, o modelo proposto ajuda os gestores de *facilities* a tomar decisões para aumentar o conforto dos ambientes e, consequentemente, a satisfação dos ocupantes.

Inúmeros estudos têm desenvolvido métodos e ferramentas para avaliar o desempenho de uma edificação, levando em consideração o ambiente interno e quais condições são consideradas confortáveis [1]. Muitos destes métodos propostos são baseados em modelos determinísticos [29,30] e não consideram o efeito da variabilidade dos fatores que influenciam o conforto do ambiente interno, como o microclima da edificação, propriedades da construção e padrões de uso [31]. O conforto ambiental interno de uma edificação é muito mais do que a média das respostas percebidas da qualidade do ar interior, ruído, iluminação e qualidade térmica [32]. Neste sentido, esta pesquisa avança em considerar as relações entre as variáveis que afetam o desempenho ambiental interno de um ambiente, com uma abordagem probabilística.

CONCLUSÕES

A avaliação de desempenho de conforto de ambientes internos envolve a análise de múltiplas variáveis que possuem relações de causalidade. Este trabalho apresentou a adaptação de um modelo probabilístico existente que foi fundamentado no método de redes Bayesianas. Ao contrário de modelos determinísticos, o modelo proposto poderá simular o conforto de um ambiente como um processo probabilístico, fornecendo níveis de desempenho de conforto usando distribuições de probabilidade. A principal vantagem das redes Bayesianas é a possibilidade de lidar com incertezas e ser flexível o suficiente para incluir diferentes fontes de dados.

Esta pesquisa encontra-se em andamento e as próximas etapas incluem a conexão do modelo proposto com dados coletados por sensores (ex.: sensor de temperatura de ambiente), bem como a sua conexão com modelos BIM para criação de um Gêmeo Digital. Isso envolverá a criação de uma plataforma baseada em nuvem para coletar dados BIM e desenvolvimento de *scripts* para integração de dados. Uma vez criadas as conexões, a aplicação do modelo se dará em determinados ambientes (salas de aula) em edifícios reais, tratados como estudos de caso. O objetivo final da criação deste Gêmeo Digital é possibilitar a realização de testes virtuais antes de serem realizados no mundo real através da integração de sistemas e da representação virtual de entidades e processos do mundo real.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), número 22/2551-0000574-8.

REFERÊNCIAS

[1] FRONTCZAK, M.; WARGOCKI, P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments, **Building and Environment**. 46 (2011) 922–937. doi:10.1016/j.buildenv.2010.10.021.

[2] MARTÍNEZ, I.; ZALBA, B.; TRILLO-LADO, R.; BLANCO, T.; CAMBRA, R. Casas, Internet of things (Iot) as sustainable development goals (sdg) enabling technology towards smart readiness indicators (sri) for university buildings, **Sustainability (Switzerland)**. 13 (2021). doi:10.3390/su13147647.

[3] BORTOLINI, R.; FORCADA, N. A probabilistic-based approach to support the comfort performance assessment of existing buildings, **Journal of Cleaner Production**. 237 (2019) 117720. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117720.

[4] BORTOLINI, R.; FORCADA, N. A probabilistic performance evaluation for buildings and constructed assets, **Building Research and Information**. 0 (2019) 1–18. doi:10.1080/09613218.2019.1704208.

[5] UUSITALO, L. Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling, **Ecological Modelling**. 203 (2007) 312–318. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.11.033.

[6] PEARL, J; VERMA, T. **A theory of inferred causation**, (1994). Disponível em: http://ftp.cs.ucla.edu/pub/stat_ser/r156-reprint.pdf. Acesso em: 12 março 2022.

[7] NGUYEN, L.D.; TRAN, D.Q.; CHANDRAWINATA, M.P. Predicting Safety Risk of Working at Heights Using Bayesian Networks, **Journal of Construction Engineering and Management**. 142 (2016) 04016041. doi:10.1061/(asce)co.1943-7862.0001154.

[8] PEARL, J. **Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference**, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1991. doi:10.1016/0020-7101(91)90056-K.

[9] HOLICKÝ, M.; MARKOVÁ, J.; SÝKORA, M. Forensic assessment of a bridge downfall using Bayesian networks, **Engineering Failure Analysis**. 30 (2013) 1–9. doi:10.1016/j.engfailanal.2012.12.014.

[10] SALINI, S.; KENNET, R.S. Bayesian networks of customer satisfaction survey data, J**ournal of Applied Statistics**. 36 (2009) 1177–1189. doi:10.1080/02664760802587982.

[11] CHAKRABORTY, S.; MENGERSEN, K.; FIDGE, C.; MA, L.; LASSEN, D. A Bayesian Network-based customer satisfaction model: a tool for management decisions in railway transport, **Decision Analytics**. 3 (2016). doi:10.1186/s40165-016-0021-2.

[12] LANGEVIN, J.; WEN, J.; GURIAN, P.L. Modeling thermal comfort holistically: Bayesian estimation of thermal sensation, acceptability, and preference distributions for office building occupants, **Building and Environment.** 69 (2013) 206–226. doi:10.1016/j.buildenv.2013.07.017.

[13] AUFFENBERG, F.; SNOW, S.; STEIN, S.; ROGERS, A. A comfort-based approach to smart heating and air conditioning, **ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology.** 9 (2017). doi:10.1145/3057730.

[14] BORTOLINI, R. **Enhancing building performance: a Bayesian network model to support facility management**. Tese (Doutorado em Construction Engineering. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona, Espanha, 2019.

[15] ALAVI, H.; FORCADA, N.; BORTOLINI, R.; EDWARDS, D.J. Enhancing occupants' comfort through BIM-based probabilistic approach, **Automation in Construction**. 123 (2021) 103528. doi:10.1016/j.autcon.2020.103528.

[16] TAO, F.; CHENG, J.; QI, Q.; ZHANG, M.; ZHANG, H.; SUI, F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 94 (2018) 3563–3576. doi:10.1007/s00170-017-0233-1.

[17] KAN, C.; ANUMBA, C.J. Digital Twins as the Next Phase of Cyber-Physical Systems in Construction, in: Computing in Civil Engineering 2019, **American Society of Civil Engineers**, Reston, VA, 2019: pp. 256–264. doi:10.1061/9780784482438.033.

[18] GLAESSGEN, E.H.; STARGEL, D.S. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air force vehicles, Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, **Structural Dynamics and Materials Conference**. (2012) 1–14.

doi:10.2514/6.2012-1818.
[19] BRILAKIS, I.; PAN, Y.; BORRMAN, A.; MAYER, H.-G. **Built Environment Digital Twinning**, 2019.
[20] S.H. Chen, C.A. Pollino, Good practice in Bayesian network modelling, **Environmental Modelling & Software**. 37 (2012) 134–145. doi:10.1016/j.envsoft.2012.03.012.
[21] ABISUGA, A.O.; FAMAKIN, I.O.; OSHODI, O.S. Educational building conditions and the health of users, **Construction Economics and Building**. 16 (2016) 19–34. doi:10.5130/ajceb.v16i4.4979.
[22] BORDBARI, M.J.; SEIFI, A.R.; RASTEGAR, M. Probabilistic energy consumption analysis in buildings using point estimate method, **Energy**. 142 (2018) 716–722. doi:10.1016/j.energy.2017.10.091.
[23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR ISO/CIE 8995-1**: Iluminação de ambientes de trabalho - Parte 1: Interior, 2013.
[24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5413:1992**: Iluminância de Interiores, 1992.
[25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 10152:2017** - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações, 2017.
[26] WARGOKI, P.; PORRAS-SALAZAR, J.A.; CONTRERAS-ESPINOSA, S.; BAHNFLETH,W. The relationships between classroom air quality and children's performance in school, **Building and Environment**. 173 (2020) 106749. doi:10.1016/j.buildenv.2020.106749.
[27] GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**, John Wiley & Sons, 1998.
[28] AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, Thermal environmental conditions for human occupancy, **ANSI/ASHRAE Standard - 55**. 7 (2017) 6.
[29] PREISER, Wolfgang; VISCHER, Jacqueline (Ed.). **Assessing building performance**. Routledge, 2005.
[30] AGHA-HOSSEIN, M.M.; EL-JOUZI, S.; ELMUALIM, A.A.; ELLIS, J.; WILLIAMS, M. Post-occupancy studies of an office environment: Energy performance and occupants' satisfaction, **Building and Environment.** 69 (2013) 121–130. doi:10.1016/j.buildenv.2013.08.003.
[31] CHEN, J.; AUGENBROE, G.; WANG, Q.; SONG, X. Uncertainty analysis of thermal comfort in a prototypical naturally ventilated office building and its implications compared to deterministic simulation, **Energy and Buildings**. 146 (2017) 283–294. doi:10.1016/j.enbuild.2017.04.068.
[32] BLUYSSEN, P.M.; ARIES, M.; VAN DOMMELEN, P. Comfort of workers in office buildings: The European HOPE project, **Building and Environment.** 46 (2011) 280–288. doi:10.1016/j.buildenv.2010.07.024.