MODELO PARA PREVISÃO DE PROGRESSO FÍSICO EM EMPREENDIMENTOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL COM APLICAÇÃO DE ANÁLISE HARMÔNICA POR SÉRIE DE FOURIER E DOS FILTROS DE KALMAN

Model for Predicting Physical Progress in Civil Construction Projects Using Harmonic Analysis with Fourier Series and Kalman Filters

Adriana de Oliveira Santos Weber
Universidade Federal de Alagoas | Maceió, Alagoas | os.adriana@gmail.com

Ariany França Cavalcante
Universidade Federal de Alagoas | Maceió, Alagoas | arianyfranca.al@gmail.com

Roberto Barbosa dos Santos
Universidade Federal de Alagoas | Maceió, Alagoas | rbs@ctec.ufal.br

Ariana Rosella Cervino
Universidade Federal de Alagoas | Maceió, Alagoas | ariana.cervino@ctec.ufal.br

José Antonio da Silva Neto
Universidade Federal de Alagoas | Maceió, Alagoas | jose.antonio@ctec.ufal.br

Ismael Weber
Universidade Federal de Alagoas | Maceió, Alagoas | isma.weber@gmail.com

Juan Lucas Cerqueira Silva
Universidade Federal de Alagoas | Maceió, Alagoas | juan.silva@ctec.ufal.br

Juan Victorio Lima Montenegro da Silva
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | juan-montenegro@ufmg.br

RESUMO

O controle de prazos e custos é um dos principais desafios na gestão de obras da construção civil, exigindo ferramentas que permitam estimativas confiáveis do progresso físico. Este estudo propõe um modelo de previsão baseado na decomposição harmônica por Série de Fourier, combinada ao Filtro de Kalman Estendido (EKF), aplicado a dados reais de empreendimentos residenciais verticais. A metodologia envolveu o ajuste dos dados históricos com diferentes graus de Fourier, seguido pela correção das estimativas por meio do EKF. Os resultados mostraram que, embora o modelo tenha apresentado boa aderência aos dados históricos em séries mais longas, seu desempenho preditivo foi limitado, com erros significativos em cenários com menos medições. A pesquisa reforça o potencial da modelagem matemática na engenharia de produção, destacando a necessidade de melhorias na representação de incertezas e no uso de variáveis complementares.

Palavras-chave: Previsão de dados; Modelagem matemática; Controle de projetos.

ABSTRACT

Controlling time and cost is one of the main challenges in construction project management, requiring tools that allow reliable estimates of physical progress. This study proposes a forecasting model based on harmonic decomposition using the Fourier Series, combined with the Extended Kalman Filter (EKF), applied to real data from vertical residential construction projects. The methodology involved adjusting historical data with varying degrees of Fourier components, followed by estimate correction through the EKF. The results showed that, although the model presented good adherence to historical data in longer time series, its predictive performance was limited, with significant errors in scenarios with fewer measurements. The research reinforces the potential of mathematical modeling in construction engineering, highlighting the need for improvements in uncertainty representation and the incorporation of complementary variables.

Keywords: Data prediction; Mathematical modeling; Project control.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de empreendimentos de construção é uma atividade desafiadora e algumas questões são sempre postas para os gestores, entre estas, duas se destacam em relação às demais: Quando a obra acaba? Quanto a obra vai custar? Responder a essas perguntas é sempre difícil, pois, apesar de sempre ser possível indicar valores, estes são sempre prováveis, não necessariamente reais.

Neste contexto, duração e custo final são variáveis aleatórias, e determinar os valores que elas vão assumir se converte em um processo de previsão que estima valores, tanto para momentos específicos no tempo, quanto para o término do empreendimento. Assim, a dificuldade da previsibilidade é agravada pela grande quantidade de variáveis aleatórias envolvidas na execução das obras, como, por exemplo, condições climáticas, disponibilidade de recursos e qualificação da mão de obra (Santos, 2015).

Todo empreendimento de construção é um sistema dinâmico e tem seu estado variando ao longo do tempo de execução. Neste sentido, é possível caracterizar o estado do sistema através de um conjunto de variáveis, que uma vez definidas, quer seja por medição, quer seja por modelos matemáticos, caracterizam completamente o estado do sistema num dado momento do tempo. Estas variáveis são chamadas de variáveis de estado. Os relatórios mensais de avanço físico são um exemplo de determinação do estado do sistema (empreendimento de construção) num determinado momento da fase de implantação.

Modelar um empreendimento de construção é um processo que envolve muitas variáveis e, consequentemente, um esforço considerável de coleta, tratamento e análise dos dados para que se possa extrair informações úteis para a tomada de decisão, bem como para contribuições técnicas e científicas ao setor. Uma característica do setor que persiste é a ausência de uma teoria consolidada, mesmo com alguns esforços consistentes (Radosavljevic; Bennett, 2012; Koskela, 2000).

A ausência de um modelo matemático consolidado traz uma complicação para a comunidade científica, pois diferentemente de outros setores de estudo que possuem uma teoria consolidada, o setor de Construção possui essencialmente valores observados, que se materializam em pontos marcados num gráfico.

Vale destacar que o desafio de antecipar os valores futuros permanece, e é comum os gestores se depararem com questões como: quanto a obra vai crescer no próximo mês, quanto de recurso financeiro será necessário? Responder perguntas desse tipo passam pelo desenvolvimento e emprego de algum tipo de modelo matemático ajustado a partir dos dados observados e utilizado para prever os valores futuros.

O método tradicional para ajustar uma curva (função matemática) a um conjunto de dados é o método dos mínimos quadrados. Assim, em função de qual variável foi medida, os pontos podem apresentar comportamento oscilatório ou não, dessa maneira, o crescimento físico mensal de uma obra é um exemplo de variável com comportamento oscilatório (ajustado por funções periódicas), pois grosso modo, num mês o avanço é maior, num outro é menor e assim sucessivamente.

É neste contexto de decisão que os filtros de Kalman surgem como um meio de estimar o estado real de um sistema a partir da combinação de previsões obtidas de um modelo matemático com observações do sistema. No caso do presente trabalho, o avanço físico é modelado através de uma série de Fourier, que gera as previsões de avanços futuros. Estas previsões, juntamente com as respectivas medições alimentam o filtro de Kalman, que fornece uma nova estimativa para o estado real do sistema e retroalimenta o processo de ajuste da série de Fourier (Kim; Reinschmidt, 2010).

Apesar da existência de modelos matemáticos voltados à previsão de variáveis em empreendimentos da construção civil, observa-se uma carência de aplicações práticas que integrem análise harmônica e técnicas de filtragem bayesiana para estimar o progresso físico com base em dados reais. São escassos os estudos que testam, em obras concretas, o desempenho preditivo de tais abordagens combinadas, sobretudo em contextos de alta variabilidade e séries temporais incompletas.

Diante disso, em caráter exploratório, este estudo tem como objetivo ajustar e avaliar a acurácia de um modelo de previsão do avanço físico em empreendimentos da construção civil, combinando análise harmônica por Séries de Fourier e Filtro de Kalman Estendido, com base em dados reais de execução.

A proposta contribui para o avanço do conhecimento ao testar a eficácia dessa integração metodológica em situações práticas, ampliando as possibilidades de modelagem preditiva para tomada de decisão em obras com comportamento não linear e verificando se as variáveis estocásticas consideradas como influentes para análise dos dados reais estão efetivamente ajustadas à realidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS DINÂMICOS

O interesse por sistemas tem suas raízes na necessidade de entender e influenciar os fenômenos que acontecem no nosso entorno. A percepção de que o entorno possuía elementos independentes foi o ponto de partida para a definição de sistema.

Para Ogata (2010), “um sistema é a combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo. A ideia de sistema não fica restrita apenas a algo físico”. Nesse sentido, o principal critério de caracterização dos sistemas é o comportamento no tempo. O estado de um sistema é caracterizado por um conjunto específico de variáveis, em termos gerais, é um conjunto de quantidades físicas, cuja especificação determina completamente a evolução do sistema (Friedland, 2005).

Quanto ao padrão de modificação no tempo, os sistemas podem ser discretos, quando seus estados variam em intervalos de tempo e contínuos, quando seus estados variam continuamente com o tempo (Law; Kelton, 1991). Uma classificação mais consistente subdivide os sistemas em cinco tipos distintos, são eles (Morrison, 2008):

- tipo ZERO - congrega os sistemas que não variam com o tempo;
- tipo I - abrange os sistemas que possuem uma solução analítica, ou seja, uma solução exata;
- tipo II - contempla os sistemas que não possuem uma solução analítica, mas podem ser solucionados numericamente, que em essência são aproximações;
- tipo III - congrega os sistemas caóticos, que se comportam com regularidade durante um determinado intervalo de tempo e depois mudam significativamente de estado de modo repentino;
- tipo IV - aborda os sistemas aleatórios ou estocásticos, que é o caso do progresso de obras.

Essa classificação é importante porque nos casos de sistemas estocásticos, conhecer o estado do sistema em um determinado instante de tempo não é suficiente para permitir prever o comportamento futuro (Friedland, 2005).

A modelagem de sistemas dinâmicos é um tema muito amplo e extenso, tanto pela diversidade de sistemas existentes, quanto pela intensidade do tratamento matemático adotado. A fim de facilitar o entendimento, o rigor e o formalismo matemático inerentes à modelagem de sistemas serão em parte sacrificados, mas abordagens formais e rigorosas estão disponíveis para consulta nos trabalhos de Ogata (2010) e Golnaraghi; Kuo (2012).

No geral, a modelagem de sistemas passa por uma formulação matricial, onde as variáveis de estado são agregadas em um vetor de estado, e o conjunto de todas as configurações possíveis que um sistema pode assumir, ou seja o conjunto dos vetores de estado possíveis, é chamado espaço de estados. A equação (1) mostra vetor de estado x_i com n variáveis no instante de tempo i. A transição de um estado para outro é dada pela equação (2) onde x_{i+1} é o vetor de estado no instante de tempo $i+1$ e A é chamada de matriz de transição do sistema. Quando todos os elementos de A são constantes, diz que o sistema é invariante no tempo, quando esses elementos são funções do tempo, $a_{ij} = f(t)$, o sistema é variante no tempo.

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{1i} \\ x_{2i} \\ \vdots \\ x_{ni} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$x_{i+1} = Ax_i \quad (2)$$

Está fora do escopo deste trabalho discutir se os empreendimentos de construção são sistemas dinâmicos ou estacionários, uma vez que estabilizam em 100% do avanço físico e num custo final que é o custo orçado multiplicado por uma constante. Portanto, os casos serão tratados como dinâmicos e deixam de existir quando finalizados. Como pode ser notado, a questão central é determinar a matriz de transição do sistema

2.2 SÉRIES DE FOURIER NA ANÁLISE DE DADOS TEMPORAIS

A Série de Fourier é uma ferramenta matemática que permite decompor sinais ou funções periódicas em somas de senos e cossenos. Esse processo viabiliza a representação de comportamentos complexos por meio da superposição de componentes harmônicas simples. A técnica é amplamente utilizada na engenharia, física e ciência dos dados para análise de sinais, compressão de informações e detecção de padrões (Brigham, 1988).

Nesse viés, a Série de Fourier permite ajustar uma função com a precisão desejada, sendo possível representar funções complexas com a acurácia em função da quantidade de elementos utilizados, equilibrando precisão e eficiência. Assim, no contexto da construção civil, a análise harmônica pode ser aplicada para descrever o comportamento temporal do progresso físico de empreendimentos, especialmente quando os dados históricos apresentam padrões oscilatórios ou semi-periódicos.

A adoção dessa abordagem como etapa inicial do modelo preditivo neste estudo se justifica pela sua capacidade de oferecer uma base matemática contínua e analítica sobre a qual técnicas adicionais de filtragem e correção podem ser aplicadas, mesmo quando a série de dados apresenta comportamentos não lineares ou irregulares.

2.3 FILTROS DE KALMAN

O Filtro de Kalman é um algoritmo recursivo de estimação ótimo em sistemas dinâmicos lineares com ruído gaussiano. Desenvolvido por Kalman (1960), o método combina previsões oriundas de modelos matemáticos com observações ruidosas, ponderando a confiança em cada uma dessas fontes por meio do ganho de Kalman. O resultado é uma estimativa mais precisa e ajustada à realidade observada.

Sua aplicação na construção civil tem ganhado relevância nas últimas décadas, principalmente em modelos de controle de prazo e custo. Kim e Reinschmidt (2010) demonstraram a viabilidade do uso do filtro combinado com o método do valor agregado para prever a duração de empreendimentos com maior precisão em cenários incertos.

Entretanto, dada a não linearidade das equações envolvidas na Série de Fourier aplicada ao progresso físico, tornou-se necessário o uso de uma extensão do filtro original: o Filtro de Kalman Estendido (Extended Kalman Filter – EKF). O EKF lineariza o sistema em torno do ponto de operação atual, utilizando a matriz jacobiana das funções de transição e observação (Kalman, 1960). Esta adaptação permite a aplicação do algoritmo a sistemas cujas dinâmicas não podem ser descritas por equações lineares.

A integração entre Fourier e EKF no presente estudo foi adotada visando unir a capacidade de modelar padrões complexos da série temporal (Fourier) com o ajuste adaptativo oferecido pelo EKF, que corrige as previsões à medida que novos dados são incorporados, tornando o modelo mais robusto diante das incertezas operacionais da execução das obras.

3 METODOLOGIA

Este estudo adotou uma abordagem quantitativa, baseada em modelagem matemática, com aplicação de análise harmônica por Série de Fourier seguida de otimização com Filtro de Kalman Estendido (EKF). O objetivo foi testar a acurácia dessa combinação metodológica na previsão do progresso físico de empreendimentos residenciais verticais em execução real.

3.1 SELEÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

Foram analisados dois empreendimentos executados por uma incorporadora do Estado de Alagoas, denominados neste estudo como Caso A e Caso B. Ambos foram selecionados por atenderem aos seguintes critérios:

- Disponibilidade de séries históricas completas de progresso físico mensal, do início até a conclusão da obra, arcabouço difícil de obtenção;
- Padrões distintos de execução, em termos de duração real e variação mensal de produtividade;
- Relevância prática, uma vez que refletem cenários típicos da construção civil brasileira.

O Caso A foi planejado para durar 27 meses, sendo finalizado com 43 meses. O Caso B foi inicialmente projetado para 29 meses, mas sua execução se estendeu até 46 meses. As medições mensais do progresso físico, expressas em percentual acumulado da obra, constituíram a base de dados utilizada nas simulações.

3.2 ESTRUTURA DO MODELO

O processo metodológico foi dividido em quatro etapas principais:

- Coleta e organização dos dados reais;
- Ajuste harmônico via Série de Fourier para identificação de padrões e suavização de flutuações;
- Aplicação do Filtro de Kalman Estendido (EKF) para correção recursiva das previsões;
- Avaliação dos erros, com base em métricas relativas ao progresso físico e à duração da obra.

3.3 AJUSTE COM SÉRIE DE FOURIER

O ajuste inicial das séries foi realizado por meio de análise harmônica com Séries de Fourier. Essa técnica permitiu aproximar os dados históricos por uma função periódica composta por senos e cossenos, facilitando a modelagem das oscilações observadas no progresso físico mensal. A modelagem foi implementada no software MATLAB R2019a, utilizando a função *fit*, que já fornece os termos necessários para a análise de Fourier, com variação no grau de complexidade conforme a quantidade de dados disponíveis. A Tabela 1 apresenta os níveis de complexidade utilizados.

Tabela 1: Níveis de complexidade da função *fit*

Argumentos da Função *fit*	Quantidade de Dados
fourier1	4
fourier2	6
fourier4	10
fourier6	14
fourier8	18 ou mais

Fonte: Autores, 2019

A escolha por iniciar com o ajuste de Fourier antes da aplicação do EKF se justifica pela necessidade de obtenção de uma função determinística contínua sobre a qual o filtro possa operar.

3.4 PREVISÃO COM FILTRO DE KALMAN ESTENDIDO

O EKF foi utilizado para incorporar progressivamente os dados mensais ao modelo, atualizando a estimativa do progresso físico com base na comparação entre os valores observados e os valores previstos. A escolha pelo EKF, em detrimento do filtro de Kalman clássico, deve-se à não linearidade da função obtida com a Série de Fourier.

O vetor de estado adotado incluiu duas variáveis principais: o progresso físico acumulado e sua variação mensal (derivada discreta). A cada nova medição, o EKF recalculou o estado estimado ponderando os erros do modelo e os desvios observados.

As incertezas do sistema foram representadas por duas matrizes:

- Matriz Q (erro do modelo): calculada com base na variância histórica dos dados;
- Matriz R (erro da medição): estimada a partir das flutuações reais entre meses consecutivos.

Devido à complexidade da derivação analítica da Jacobiana da função de previsão, assumiu-se localmente que a função possui comportamento aproximadamente linear em pequenos intervalos (linearidade local).

3.5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

As previsões foram avaliadas com base em dois indicadores de erro:

- Erro relativo no progresso físico mensal (Empf): razão entre a diferença da previsão e o valor real, dividido pelo valor real;
- Erro relativo na duração da obra (Ed): diferença entre o tempo estimado para atingir 100% de avanço físico e o tempo real de execução.

As simulações foram repetidas com diferentes quantidades de dados iniciais (6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 medições) para verificar o comportamento do modelo em diferentes cenários de informação disponível. Para cada um dos cenários, realizou-se a análise harmônica com a quantidade de dados estipulados e calculou-se os erros relativos supracitados a fim de analisar se a modelagem ajustada possuía uma tendência de convergência aos valores reais.

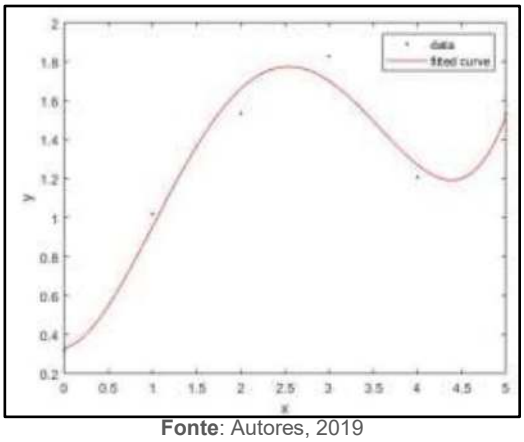
4 RESULTADOS

Os dados dos empreendimentos Caso A e Caso B foram analisados a partir das medições mensais de progresso físico, expressas em percentual acumulado. A seguir, apresentam-se os resultados em duas etapas principais: (i) ajuste inicial dos dados com Séries de Fourier e (ii) previsão com Filtro de Kalman Estendido (EKF), com posterior avaliação dos erros.

4.1 AJUSTE INICIAL COM SÉRIES DE FOURIER

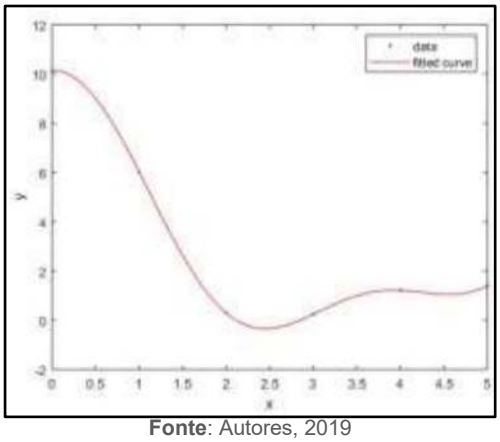
Nos gráficos do Caso A e Caso B, observou-se que com poucas medições (Figura 1 e 2), o modelo suaviza excessivamente o comportamento da obra, resultando em ajustes com baixa aderência à realidade. À medida que os dados aumentam (Figura 3 e 4), a função ajustada passa a acompanhar melhor as oscilações do progresso físico, embora ainda não consiga prever eventos não periódicos, como estagnações ou retomadas abruptas da obra. Devido ao tamanho reduzido deste trabalho, explicitou-se unicamente as análise com 6 dados (menor quantidade) e 40 dados (maior quantidade).

Figura 1: Ajuste harmônico de 6 dados com fourier2 no Caso A



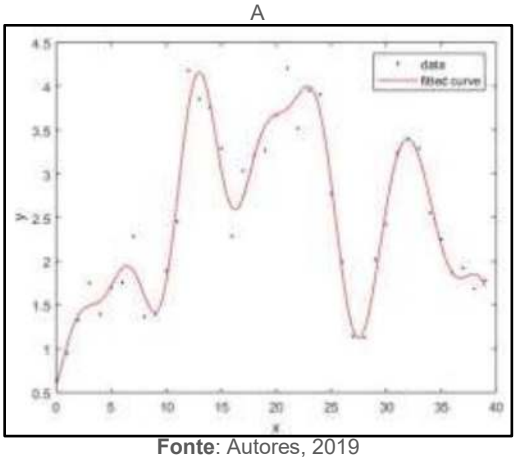
Fonte: Autores, 2019

Figura 2: Ajuste harmônico de 6 dados com fourier2 no Caso B



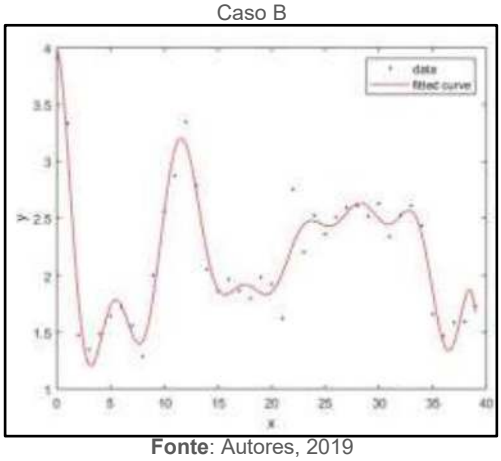
Fonte: Autores, 2019

Figura 3: Ajuste harmônico de 40 dados com fourier8 no Caso A



Fonte: Autores, 2019

Figura 4: Ajuste harmônico de 40 medições com fourier8 no Caso B



Fonte: Autores, 2019

4.2 PREVISÃO COM EKF

A partir do ajuste inicial, os erros obtidos em ambos os casos são resumidos nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 4: Erros de estimativa do Caso A.

Quantidade de dados (meses)	Empf	Ed
6	2151%	76%
10	44%	103%
15	>10000%	>250%
20	73%	96%
25	2477%	178%
30	>10000%	>600%
35	56%	363%
40	46%	1367%

Fonte: Autores, 2019

Tabela 5: Erros de estimativa do Caso B.

Quantidade de dados (meses)	Empf	Ed
6	158%	39%
10	>10000%	>200%
15	>10000%	>250%
20	523%	26%
25	>10000%	389%
30	>10000%	>600%
35	6103%	67%
40	853%	250%

Fonte: Autores, 2019

4.3 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados demonstram que a performance do modelo é altamente sensível à quantidade e qualidade dos dados históricos utilizados:

- Séries curtas (menos de 15 medições) resultaram em previsões altamente imprecisas;
- Séries médias (20–30 dados) apresentaram desempenho ligeiramente melhor, mas ainda insuficiente para uso operacional;
- Séries longas (acima de 35 dados) permitiram erros de Empf abaixo de 60%, mas os erros na duração (Ed) ainda foram elevados.

Devido à elevada magnitude dos erros observados nos dois casos, ambos serão analisados e discutidos conjuntamente. A avaliação dos erros foi realizada conforme os ajustes do modelo eram aprimorados com a inclusão progressiva de novos dados de medição, contudo, contrariando as expectativas iniciais, a modelagem não apresentou desempenho satisfatório frente aos dados analisados. Além disso, a aplicação do EKF não foi efetiva no tratamento da análise, pois as flutuações obtidas na modelagem foram muito descontínuas, não permitindo um refino adequado.

Ademais, a imposição de limitação de 100 iterações ao programa (valor limite considerado bem acima de obras para a construção civil) ocasionou, devido à alta flutuação dos resultados, a não obtenção da estimativa do tempo total da obra em algumas modelagens, estas foram indicadas com o símbolo de “maior que” (>).

Esses achados indicam que, embora a estrutura do modelo seja coerente, sua aplicação prática ainda requer ajustes, sobretudo na forma de incorporar a variabilidade real das obras no processo de modelagem e previsão.

5 DISCUSSÃO

O modelo proposto, que integra ajuste harmônico por Série de Fourier com o Filtro de Kalman Estendido, demonstrou potencial como ferramenta exploratória para análise do progresso físico em obras civis. No entanto, os resultados evidenciaram fragilidades importantes em sua capacidade preditiva, especialmente quando aplicado a séries temporais curtas ou com comportamentos irregulares.

A elevada sensibilidade aos ruídos e à variabilidade dos dados reais reforça uma limitação já conhecida das Séries de Fourier: a pressuposição de periodicidade nos dados. Como obras de construção civil geralmente não apresentam padrões regulares ao longo do tempo, os modelos harmônicos tendem a suavizar comportamentos abruptos, o que compromete a acurácia das estimativas. O EKF, por sua vez, embora útil para incorporar medições sucessivas, depende fortemente da definição adequada das matrizes de covariância (Q e R). No presente estudo, essas matrizes foram estimadas com base na variância média dos dados, o que pode ter contribuído para os altos erros observados.

Comparando com estudos como o de Kim e Reinschmidt (2010), que aplicam o EKF em conjunto com métodos de valor agregado, observa-se que a combinação com análise harmônica é promissora, mas requer refinamentos. A ausência de variáveis externas no modelo — como produtividade, atrasos por clima ou logística — limita sua capacidade de antecipar desvios reais no cronograma.

Apesar dessas limitações, a pesquisa oferece uma contribuição relevante ao aplicar a metodologia em dados empíricos, ampliando os testes realizados em estudos anteriores (SANTOS, 2015). Como caminhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de modelos híbridos que combinem abordagens determinísticas e probabilísticas, bem como o uso de redes neurais ou séries autoregressivas (ARIMA) para complementar a previsão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a aplicação de uma abordagem integrada entre Série de Fourier e Filtro de Kalman Estendido na previsão do progresso físico de obras civis. Foram utilizados dois estudos de caso com dados reais, permitindo observar as limitações e o potencial da proposta.

Conclui-se que o modelo oferece bons ajustes aos dados históricos, mas ainda não é suficiente para previsões confiáveis em ambientes operacionais, especialmente em fases iniciais da obra.

Entre as limitações, destaca-se o número reduzido de estudos de caso e a ausência de variáveis explicativas no modelo. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a ampliação da base de dados, o uso de modelos híbridos e o aperfeiçoamento dos parâmetros do EKF. A pesquisa reforça a importância de integrar engenharia, estatística e ciência de dados para avançar na previsão de desempenho em empreendimentos da construção civil.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam gratidão ao Programa de Educação Tutorial de Engenharia Civil, aos discentes e docentes do Centro de Tecnologia que contribuíram com este trabalho e à Universidade Federal de Alagoas por seu apoio essencial para o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

BOLTON, W. **Controle de sistemas**. São Paulo: Makron Books, 1993.

BRIGHAM, E. O. ***The fast Fourier transform and its applications***. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1988.

CAVALCANTE, A. F. **Análise de erros de um modelo para previsão de progresso físico em empreendimentos de construção civil com aplicação de análise harmônica por série de Fourier e dos filtros de Kalman**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

FRIEDLAND, L. ***Decision support systems: A knowledge-based approach***. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.

GOLNARAGHI, M.; KUO, Y.-F. ***Decision support systems: an integrated approach***. New York: Wiley, 2012.

KALMAN, R. E. ***A new approach to linear filtering and prediction problems***. Journal of Basic Engineering, v. 82, n. 1, p. 35–45, 1960.

KIM, B. C.; REINSCHMIDT, K. F. ***Probabilistic forecasting of project duration using Kalman filter and the earned value method. Journal of Construction Engineering and Management***, v. 136, n. 8, p. 834–843, 2010.

KOSKELA, L. ***Application of the new production philosophy to constructio***n. CIB W65, 7th International Group for Lean Construction Symposium, 2000.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. ***Simulation modeling and analysis***. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

MORRISON, D. G. ***Marketing research: an integrated approach***. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

RADOSAVLJEVIC, M.; BENNETT, J. ***Building procurement***. 1. ed. London: Routledge, 2012.

SANTOS, R. B. **Um modelo para previsão de prazo e custo em empreendimentos de construção civil com aplicação dos filtros de Kalman**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.