

## Artigo Técnico

# Planejamento multidimensional em projetos de construção típicos

*Multidimensional planning for  
repetitive construction projects*

Arnaldo Massao Shima Júnior<sup>a\*</sup>,  
Eduardo Luiz Machado<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Mestrado em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

<sup>b</sup> Docente do Mestrado em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

\*e-mail: shima@arnaldoshima.com

**Palavras-chave:** Gestão da construção; Planejamento; Otimização; Gestão de projetos; Modelos computacionais.

**Keywords:** *Construction Management; Scheduling; Optimization; Project Management; Computer Models.*

## Resumo

Na indústria da construção civil brasileira, a maioria das organizações ainda recorre a métodos tradicionais de planejamento de projetos. Tais métodos relacionam tarefas e recursos a um determinado período ou duração segundo relações fixas e lineares, comumente *Critical Path Method* (CPM), *Line of Balance* (LoB), *Linear Scheduling Method* (LSM) ou Diagrama de Rede. Nesse cenário, a qualidade do plano depende estritamente do planejador, já que as redes de precedência são construídas a partir de informações previamente conhecidas ou fornecidas especificamente para a elaboração do cronograma. Parte significativa dos fatores de influência considerados na criação de um cronograma de um projeto de construção é dinâmica, e não estática. Dentre os elementos dinâmicos, os fatores meteorológicos e financeiro-econômicos são destacados como sendo os mais relevantes. Foi desenvolvido e implementado um modelo híbrido de previsão meteorológica e um modelo de previsão do custo da construção capaz de estimar a evolução do Índice Nacional de Custos da Construção (INCC). Ambos foram integrados a um módulo de otimização de cronogramas de construção, implementado em linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA) como complemento aos cronogramas desenvolvidos no software Microsoft Project. O módulo de otimização foi aplicado a um projeto típico real, no qual foi observada a manutenção da duração do projeto e o aumento do custo final conforme a taxa estimada para o INCC, mesmo após a perda total de produtividade em 7,62% do período útil e redução da taxa de produtividade em 43,81% do mesmo período, devido à influência de fatores meteorológicos. Ao observar o controle das variáveis custo e prazo, mesmo após a inclusão de fatores degradantes, foi identificada melhoria na previsibilidade de execução nos aspectos de prazo e custo.

## Abstract

*In Brazilian construction industry, most of organizations still resort to traditional project planning methods. These methods link tasks and resources to a specific period or duration according to fixed and linear dependencies, usually Critical Path Method (CPM), Line of Balance (LoB), Linear Scheduling Method (LSM) or Network Diagram. In this scenario, plan's quality depends strictly on the planner's experience while the dependency chains are build based on experience or information inquired specifically for schedule's creation. It is well known that most of the information considered when*

*developing a construction project schedule is dynamic, not static. Among dynamic data, climate factors are highlighted as relevant variables and economic-financial factors accrued from variation in the inferred productivity rate. A hybrid weather forecast model and a construction cost forecast model were developed and implemented. Both modules were integrated into a construction schedule optimization module, implemented in Visual Basic for Applications (VBA) language as a complement to the schedules developed in Microsoft Project software. The optimization module was applied to a real repetitive (or typical) construction project where duration was maintained and cost raised according to the forecasted rate, even though 7.62% of working days were completely lost and other 43.81% had productivity rate reduced, due influence of weather. Having duration and cost variables under control, even after including degrading factors in the analysis indicates that duration and cost predictability were improved after Multidimensional Planning approach, in repetitive construction projects*

## 1 Introdução

Após a popularização de ferramentas e metodologias de gestão de projetos nos anos 60, a indústria da construção civil começou a evoluir em termos de aumento de produtividade, qualidade, desempenho de execução e previsibilidade dos resultados dos projetos.

O *Project Management Institute* (PMI) define um projeto como sendo um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo (PMI, 2017). No entanto, Hyari e el-Rayes (2006) mostram que certos tipos de projetos de construção podem ser considerados como repetitive, em língua inglesa, ou “típicos”, em tradução livre para a língua portuguesa. Alguns exemplos desses tipos de projetos são: rodovias, linhas férreas, centros de processamentos de dados, shopping centers, habitações etc.

Segundo Darrington e Lichtig (2010), não apenas os clientes e investidores, mas também as construtoras já perceberam que os modelos tradicionais de planejamento e execução estão deteriorados, como evidenciado pelas baixas taxas de produtividade, relações contratuais conflituosas, disputas frequentes, falta de inovação e ineficiência.

Cerca de 90% dos projetos de construção foram impactados por alguma forma de problema oriundo da coordenação ou gestão do projeto, e por isso não foram concluídos dentro do prazo (KUENZEL et al., 2016). Mais recentemente, Oppong, Chan e Dansoh

(2017) mostraram que problemas organizacionais e engajamento insuficiente das partes interessadas são causas fundamentais de fracasso dos projetos de construção.

Em 2018, Vermeulen *et al.* (2018) apresentaram a indústria da construção civil como o segmento com segundo maior potencial de automatização das tarefas individuais entre as áreas analisadas, ficando atrás apenas do segmento de transportes e movimentação de materiais e caminha em direção à modernização e à automação de seus processos.

O trabalho de Lia, Ringerike e Kalsaas (2014) mostra que, para projetos complexos, os métodos tradicionais de planejamento - o *Last Planner System* (LPS) ou o *Critical Chain Project Management* (CC) - têm se provado insuficientes para controle e acompanhamento, sendo necessário incluir métodos mais interativos e inclusivos, a fim de aumentar a sua previsibilidade.

Nas duas últimas décadas, surgiu a tendência de implementação de processos industriais dentro da Indústria da Construção Civil. Notadamente no Catálogo de Processos e Sistemas Construtivos para Habitação (1998) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), são mostrados exemplos de aplicação de novos processos e sistemas construtivos. Além disso, Ribeiro e Michalka Júnior (2003) analisaram o processo de industrialização no Brasil e a sua contribuição para o que eles chamam de racionalização da construção e ainda chamam a atenção para a necessidade de adoção de novas tecnologias, principalmente para a criação de mecanismos que tornem possível escalar esse processo de industrialização de modo que o conhecimento e as melhorias não sejam empenhados apenas pontualmente em alguns projetos.

Publicações recentes trazem abordagens com maior ou menor nível de complexidade referentes ao uso de ferramentas computacionais no processo de planejamento de um projeto de construção. Podem ser citadas como exemplos as inferências estatísticas em processos de planejamento (ROGOVENKO; ZAITSEVA, 2017), a aplicação de processos *Building Information Modeling* – BIM para apoio à gestão de suprimentos e contratados (TREBBE; HARTMANN; DORÉE, 2015) ou mesmo a disruptiva proposta de digitalização total do projeto, associada à sua gestão pelo método Ágil (LEICHT *et al.*, 2020).

Sabendo-se que o nível de complexidade da solução é inversamente proporcional à facilidade e rapidez da sua adoção, é notória a oportunidade de apresentar um modelo menos disruptivo de melhoria do planejamento de projetos de construção típicos.

Este trabalho visa expandir os mecanismos tradicionais de planejamento, incluindo o reflexo das variáveis meteorológicas nas taxas de produtividade e a evolução da variável custo como (os principais) fatores de influência no desempenho de execução e resultado desses projetos típicos.

As projeções das taxas de produtividade em função das variáveis meteorológicas e a evolução do custo da construção foram modelados a partir de suas séries históricas, processos estatísticos, estocásticos e incluídos como novas dimensões de análise dentro do cronograma tradicional de um projeto de construção típico real. Este cronograma foi submetido a um processo de otimização multiobjetivos baseado em algoritmos genéticos.

## 2 Procedimento metodológico

### 2.1 Previsão de variáveis climáticas e impacto na taxa de produtividade

Neste trabalho, cada tarefa ou unidade de trabalho de construção a ser executada foi tratado como um evento contínuo, e não como evento discreto, uma vez que a maior parte das atividades de construção não são iniciadas e concluídas em um único dia. Essa definição facilita a análise da relação condição meteorológica versus produção, pois a taxa de produtividade “R” pode ser expressa por meio de uma relação de primeira ordem, como mostrado na Equação 1.

**Equação 1 - Taxa de produtividade (R) para determinada tarefa ou unidade de trabalho de construção**

$$R = \frac{\textit{produtividade atual}}{\textit{produtividade média}}$$

Fonte: Shahin, Abourizk e Mohamed (2011).

Serão consideradas as seguintes variáveis meteorológicas com influência na taxa de produtividade nas atividades de construção:

1. precipitação;
2. temperaturas máximas e mínimas; e
3. média diária da velocidade do vento.

Partindo-se da consideração que a variável meteorológica “precipitação” é do tipo discreta, foi possível utilizar o modelo de previsão de Richardson (1981) utilizando-se um modelo estocástico de primeira ordem e duas variáveis.

Para a modelagem das variáveis “temperatura máxima” e “temperatura mínima” diárias foi utilizado o conceito apresentado em Shahin, Abourizk e Mohamed (2011), no qual a série histórica de cada variável é reduzida a uma série temporal de elementos residuais a partir da retirada da média diária e desvio-padrão da amostra. Os elementos residuais referentes ao dia anterior são somados a um fator aleatório para a determinação das variáveis referentes ao dia atual.

Conforme Shahin, Abourizk e Mohamed (2011), a velocidade do vento é uma variável gerada sem a necessidade de correlação com outras variáveis climáticas. O processo de determinação da velocidade média diária do vento é iniciado com a aquisição da série histórica diária de velocidades do vento para o local em análise.

Em seguida, calculou-se a média diária das medições; as médias diárias foram, então, organizadas em 12 grupos, referentes aos 12 meses do ano. Cada grupo de médias foi ajustado em uma distribuição do tipo Gama (dois parâmetros). Os valores distribuídos foram, então, submetidos a testes qui-quadrado para validação.

Para as quatro variáveis meteorológicas em análise, foram consideradas as séries históricas de dez anos, com amostragem ininterrupta (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2021). A lógica computacional descrita nos trabalhos de Richardson (1981) e Shahin, Abourizk e Mohamed (2011) foi modelada no *software* Microsoft Excel. O resultado foi a previsão meteorológica para um ano completo, na região analisada no exemplo de aplicação.

## 2.2 Estudo da taxa de produtividade “R”

A **TABELA 1** mostra a perda de eficiência estimada para as unidades de trabalho repetitivas consideradas no projeto exemplo.

Tabela 1 - Perda de eficiência estimada para as unidades de trabalho repetitivas

Índice (equação 1)	Condição meteorológica	Perda de eficiência estimada	Unidades de trabalho T aplicáveis
Z	Temperatura abaixo de - 5 °C	50%	1, 2, 3, 4,
Y	Temperatura acima de 30 °C	40%	1, 2, 3, 4
-	Temperatura entre -5 °C e 30 °C	0%	Nenhuma
X	Chuva acima de 20 mm/dia	100%	1, 2, 3, 4
X	Chuva entre 10 e 20 mm/dia	50%	1, 2, 3, 4
X	Chuva entre 5 e 10 mm/dia	25%	1, 2, 3, 4
X	Chuva abaixo de 5 mm/dia	0%	1, 2, 3, 4
W	Influência do Vento	Desconhecida	Nenhuma

Fonte: adaptada de Thomas e Ellis (2017) pelo autor.

As taxas de produtividade de cada tarefa do projeto exemplo, pesquisadas no item anterior, foram submetidas à influência das condições climáticas previstas para cada dia do ano, utilizando-se a equação 2 onde  $K_{a,t}$  é a taxa de produtividade típica esperada para cada tarefa.

Equação 2 - Composição da taxa de produtividade para uma tarefa

$$R_{a,t} = f(X_{a,t}, Y_{a,t}, Z_{a,t}, W_{a,t}) \times K_{a,t}$$

Fonte: adaptada de Hyari e El-Rayes (2006) pelo autor.

### 2.3 Previsão de ajuste do INCC e impacto no custo do projeto

O modelo para previsão de custos de construção aplicado neste projeto será baseado no trabalho de Touran e Lopez (2006), o qual traz uma abordagem simples e suficientemente eficaz para projetos repetitivos de curta e média duração (até 2 anos) e que estejam inseridos em programa ou estratégia de crescimento de longo prazo.

Assim, este trabalho propõe o uso do INCC como referência de aumento do custo de construção para projetos típicos. Esse índice já é comumente utilizado pela indústria, de forma consistente, há mais de 70 anos. Um ponto interessante e complementar ao objetivo deste trabalho se refere a uma desvantagem do INCC, que não é capaz de refletir a taxa de produtividade de atividades de construção e seu reflexo no prazo do projeto e, conseqüentemente, em seu custo.

O método adotado assemelha-se ao método da média simples da série histórica, porém aqui foi aplicada a distribuição normal. Sabendo-se que eventos recentes da série histórica podem influenciar mais a curva de comportamento do índice em estudo (KRESS, 1985), faz sentido a definição de uma taxa de aumento, conforme a Equação 3, onde  $\Delta_i$  é a variação da taxa de aumento do custo de construção no período em análise,  $I_i$  é o valor do índice no período e  $I_{i-1}$  representa o valor do índice no período anterior ao período em análise.

#### Equação 3 – Taxa de aumento do custo de construção

$$\Delta_i = [(I_i/I_{i-1}) - 1] \times 100\%$$

Fonte: Touran e Lopez (2006).

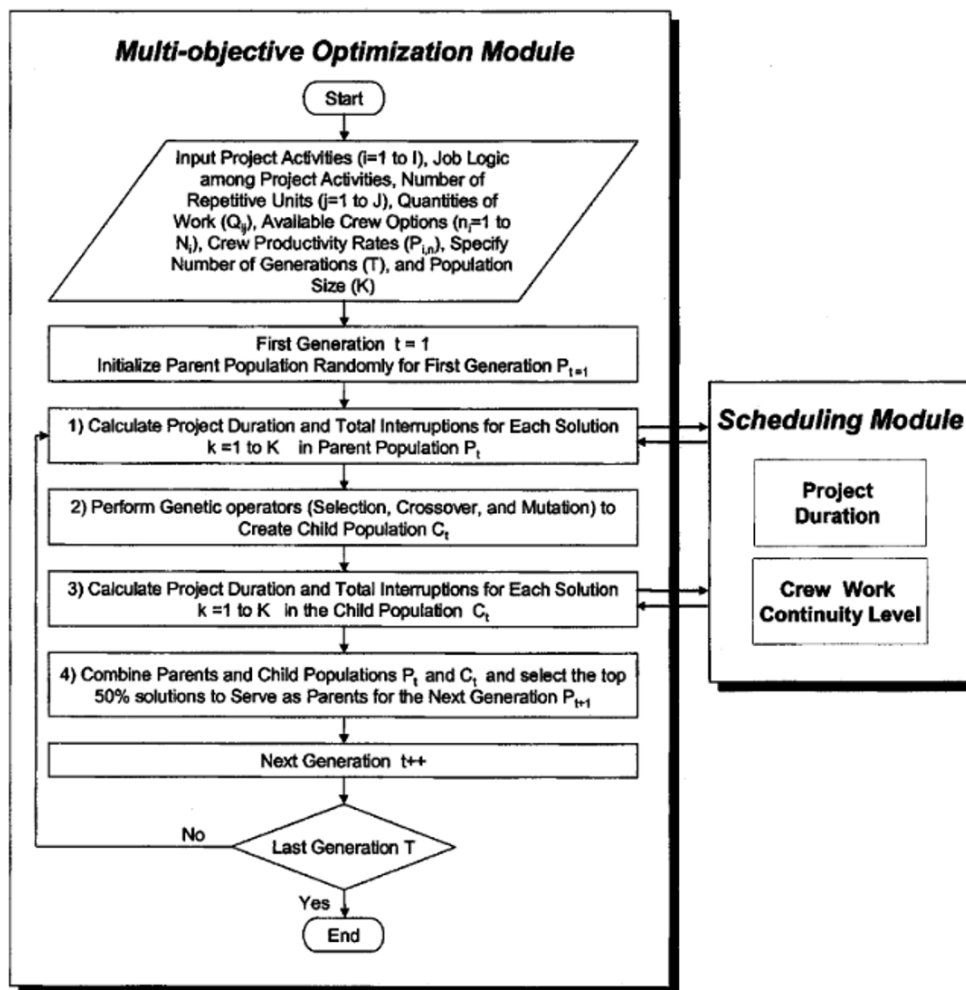
A seguir, foi aplicada a distribuição normal à série das taxas de aumento. Em Touran, Bolster e Thayer (1994), a distribuição normal indicou de maneira realista a variabilidade da taxa de aumento dos custos de construção.

## 2.4 Módulo de otimização multiobjetivos

O objetivo deste módulo é identificar o cenário de execução mais otimizado, em termos de duração e do tempo ocioso dos recursos alocados no projeto, por meio de um processo de otimização multiobjetivos. Em um problema de otimização multiobjetivos não trivial, a solução otimizada (ou não dominante) será aquela que apresenta melhoria simultânea para cada variável em análise (HYARI; EL-RAYES, 2006).

O processo de otimização do plano de trabalho foi baseado no trabalho de Hyari e El-Rayes (2006) e adota o método Ótimo de Pareto para apoiar a otimização e a sobrevivência dos cenários/conjuntos mais aptos a evoluir como soluções ao longo das iterações (gerações) futuras. A FIGURA 1 mostra o fluxograma de otimização do plano de construção de um projeto típico.

Figura 1 - Lógica/Fluxograma do processo de otimização do cronograma de um projeto de construção típico



Fonte: Hyari e El-Rayes (2006).

O processo é iniciado com a geração aleatória de um número de cenários de utilização de recursos ( $k = 1-K$ ), em que cada cenário representa a seleção aleatória de um grupo de trabalho ( $n_i$ ) e um vetor de interrupção de continuidade de trabalho ( $v_i$ ) para cada tarefa ( $i$ ) do projeto. Esses cenários aleatórios formam a população principal ( $P_t$ ) da primeira geração/iteração ( $t=1$ ), que evoluirá para uma solução otimizada após um número definido de gerações/iterações ( $T$ ).

Os passos de 1 a 4 indicados na **FIGURA 1** são descritos a seguir.

1. Calcular a duração ( $D_k$ ) do projeto e o número total de dias de trabalho interrompidos ( $H_k$ ) para cada cenário de utilização de recursos na primeira iteração.
2. Criar uma população secundária por meio de operações genéticas na população principal (algoritmos genéticos). As operações genéticas utilizadas serão seleção, cruzamento e mutação, nessa ordem. Pela ordem, o operador genético de seleção favorece as soluções com melhores valores de ajuste a seguirem em direção à fase de reprodução. A seguir, o operador de cruzamento troca uma parte do material genético entre os pares recombinados (multipontos) na fase de reprodução. Por fim, o operador de mutação é utilizado para alterar aleatoriamente os materiais genéticos na população secundária, a fim de evitar a formação de soluções ótimas locais, já que o objetivo é incentivar a formação de soluções ótimas globais, e não locais.
3. Avaliar as durações de projeto e tempos de interrupção de trabalho para cada solução criada e incluída na população secundária ( $C_t$ ) de forma similar ao passo 1.
4. Combinar as populações principais e secundárias ( $P_t$  e  $C_t$ ), de maneira a criar um conjunto de soluções e, então, selecionar as 50% melhores soluções desta nova população (conjunto) para formar a população principal da próxima iteração (geração).

As etapas de cálculo de 1 a 4 serão repetidas por um número definido de iterações ( $t = 1 - T$ ), a fim de produzir um conjunto ótimo de Pareto de planos de utilização de recursos não dominantes (otimizados) para o projeto de construção repetitivo.

Neste conjunto ótimo de Pareto, cada plano oferece: (1) um plano de construção ideal que fornece a menor duração do projeto ( $D^*$ ) e que pode ser alcançado em um determinado nível de continuidade do trabalho da equipe ( $H^*$ ); e (2) um nível ótimo de utilização de recursos para cada tarefa de construção ( $i$ ) no projeto que especifica a formação da equipe selecionada ( $n_i^*$ ) e no vetor de interrupção de dias de trabalho ( $v_i^*$ ).

## 2.5 Lógica de classificação e seleção das soluções otimizadas

Esta etapa do trabalho tem o objetivo de classificar as soluções otimizadas ( $g = 1-G$ ) pelo módulo de otimização multiobjetivos. A classificação das soluções otimizadas é, na verdade, um processo de tomada de decisão que considera atributos múltiplos e concorrentes.

Dentro de um ambiente de tomada de decisões multicritério, os problemas são representados de forma que o planejador deve levar em consideração as alternativas existentes e tomar uma decisão ótima considerando atributos mais relevantes para o projeto. Segundo Jansen (2011), uma maneira de fazer isso é medir os níveis de satisfação do responsável pela tomada de decisão separadamente para um conjunto de atributos influentes, ponderando-os pela sua importância relativa e conforme percebidos pelo tomador de decisão.

Neste estudo, o critério de classificação (que é uma tomada de decisão multicritério) será dado pelos valores definidos como satisfatórios pelo planejador do projeto quanto à duração do projeto e à taxa continuidade de trabalho dos recursos alocados.

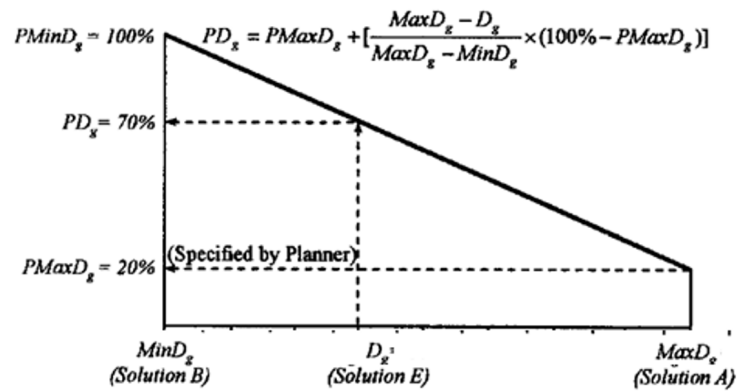
Hyari e El-Rayes (2006) sugerem a utilização de funções lineares para avaliação do desempenho  $PD_g$  de cada duração de projeto  $D_g$  gerada e entregue pelo módulo de otimização discutido anteriormente. Utilizando uma escala de 0 a 100% (vide FIGURA 2), essa função é definida facilmente ao atribuir 100% de desempenho ao valor da duração mínima  $MinD_g$  e um valor de aceitação ao desvio da solução de menor duração, a ser definido pelo planejador do projeto (0 ~ 20% no exemplo da FIGURA 2) e que reflete o grau de satisfação em relação ao cenário de maior duração entregue pelo módulo de otimização ( $MaxD_g$ ), conforme mostrado na Equação 4.

**Equação 4 - Cálculo do desempenho da função duração de projeto**

$$PD_g = PMaxD_g + \left[ \frac{MaxD_g - D_g}{MaxD_g - MinD_g} \times (100\% - PMaxD_g) \right]$$

Fonte: Hyari e El-Rayes (2006).

Figura 2 – Função linear para avaliação do desempenho dos cenários de duração do projeto



Fonte: Hyari e El-Rayes (2006).

O mesmo critério de definição de uma função linear para avaliação do desempenho foi aplicado para a continuidade de trabalho dos recursos alocados (H), conforme Equação 5. O cálculo do índice de desempenho global (classificação multicritério) é mostrado na Equação 6.

Equação 5 – Cálculo do desempenho da função de continuidade dos recursos alocados no projeto

$$PH_g = PMaxH_g + \left[ \frac{MaxH_g - H_g}{MaxH_g - MinH_g} \times (100\% - PMaxH_g) \right]$$

Fonte: adaptada de Hyari e El-Rayes (2006) pelo autor.

Equação 6 – Cálculo do índice de desempenho global das variáveis duração e continuidade dos recursos alocados no projeto

$$C_g = PD_g \times Wt_D + PH_g \times Wt_H$$

Fonte: adaptada de Hyari e El-Rayes (2006) pelo autor.

## 3 Resultados e discussão

### 3.1 Exemplo de aplicação

Dentre os diversos tipos de projetos de construção típicos apresentados, foi desenvolvido o estudo de planejamento multidimensional focado em habitações populares destinadas a famílias de baixa renda.

Segundo Leonardo e Teixeira (2019), o déficit habitacional no Brasil é calculado em 7,2 milhões de moradias, sendo que 80% estão concentrados nas faixas de renda menor que 3 salários-mínimos. Em 1995, Leibfreid e Pierson (1995) mostraram que os municípios, por terem o status de unidade política autônoma, têm capacidade e autonomia para implementar estratégias e políticas públicas de habitação popular — modelo comumente desenvolvido no Brasil.

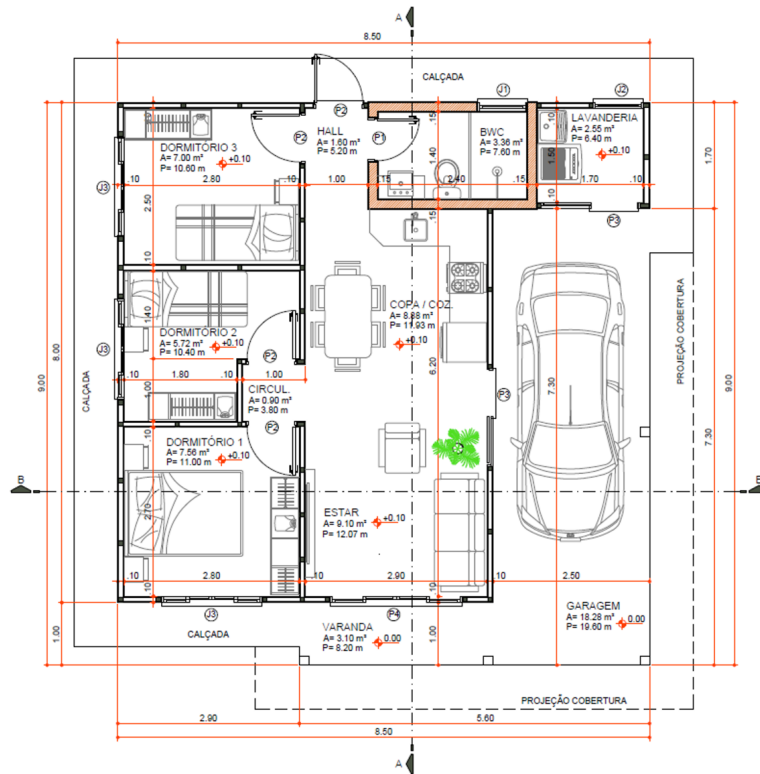
Independentemente da região do Brasil, esse tipo de habitação normalmente é construído pela iniciativa privada, por meio de um edital de concorrência pública que oferece um contrato de empreitada global mediante recebimento do projeto executivo e cronograma de execução da contratante. A nomenclatura da modalidade de contratação pode variar conforme entendimento do autor ou influência cultural, porém os formatos de contratação de projetos no Brasil estão definidos no Código Civil Brasileiro (2008). O desenvolvimento de cada modalidade de contratação de projetos pode ser aprofundado no trabalho de Ferrari (2011).

Para este estudo, foi escolhido o Edital no 061/2019 da Prefeitura Municipal de Vargem Bonita, no estado de Santa Catarina, por se tratar da construção de casas térreas em terreno uniforme, com bom detalhamento do projeto executivo e cronograma. O clima mesotérmico úmido com chuvas bem distribuídas, verões brandos e invernos rigorosos, segundo a classificação de Köppen-Geiger (GRIESER et al., 2006), contribui com variações relevantes nas taxas de produtividade para cada grupo de atividades repetitivas, conforme desenvolvimento do trabalho.

Foi realizada a modelagem do cronograma multidimensional otimizado para as 50 “Casas Populares – Modelo Normal”, conforme desenhos apresentados nas Figuras 3, 4 e 5.

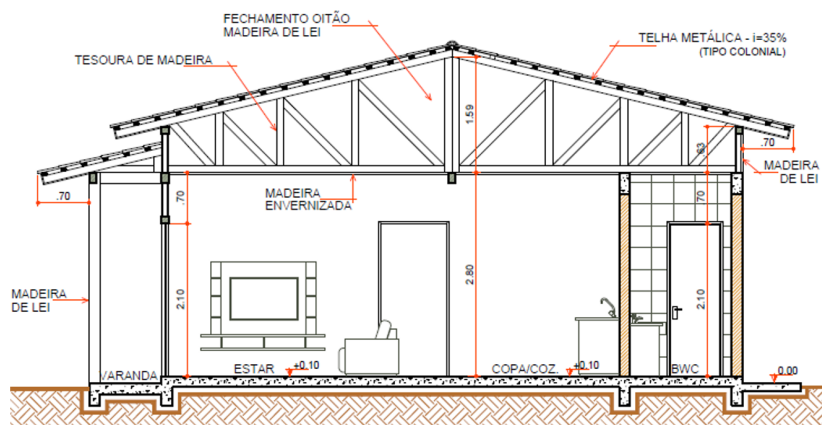
O cronograma executivo sugerido pela prefeitura de Vargem Bonita será considerado como a linha de base para análise e confrontada com a bibliografia existente e com os resultados obtidos. As divisões por área/disciplina da planilha orçamentária do edital foram utilizadas na análise para as unidades de trabalho repetitivas.

Figura 3 – Planta baixa: Casa típica sem acessibilidade



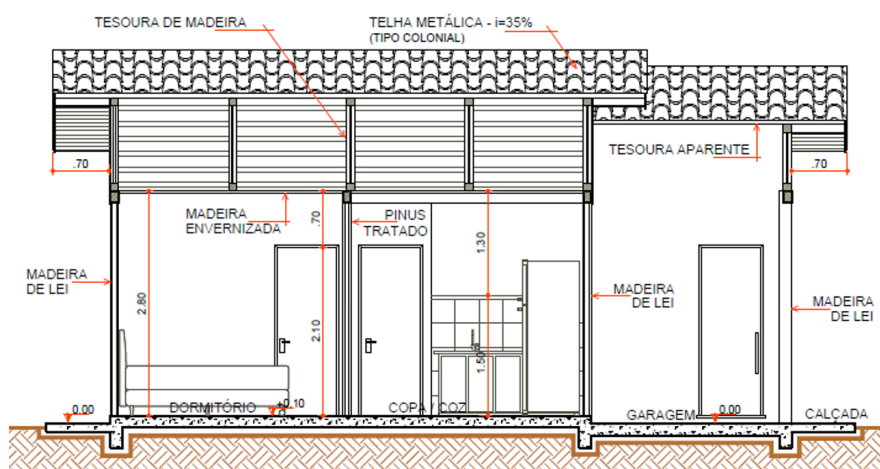
Fonte: Município de Vargem Bonita (2019).

Figura 4 – Corte A-A: Casa típica sem acessibilidade



Fonte: Município de Vargem Bonita (2019).

Figura 5 - Corte B-B: Casa típica sem acessibilidade



Fonte: Município de Vargem Bonita (2019).

## 3.2 Definição dos parâmetros do módulo de otimização multiobjetivos

Para cada unidade de trabalho foi designado um ou mais grupos de trabalho (equipes), que poderão ser compostos por trabalhadores, maquinário e ferramentas, ou pela combinação dos três componentes em qualquer proporção. A cada grupo de trabalho designado a uma unidade de trabalho foi definida uma taxa de produtividade média típica, conforme cronograma. As taxas de produtividade típicas foram corrigidas pela influência das variáveis meteorológicas estudadas (precipitação, temperaturas máximas e mínimas e velocidade média do vento), conforme valores previstos em 2.1.

### 3.2.1 Unidades de trabalho repetitivas (T)

Foram definidas onze unidades, conforme a divisão de trabalho sugerida pela planilha de orçamento e cronograma do edital utilizado como exemplo de aplicação, conforme mostrado na TABELA 2.

Tabela 2 – Unidades de trabalho repetitivas

Item (T)	Descrição
1	Serviços Iniciais
2	Fundação
3.	Paredes e Revestimentos
4.	Cobertura
5.	Pavimentação
6.	Esquadrias
7.	Forro
8.	Louças e Metais
9.	Instalações Hidráulicas
10.	Instalações Sanitárias
11.	Instalações Elétricas

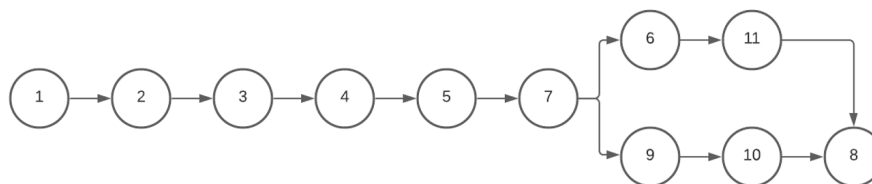
Fonte: Município de Vargem Bonita (2019).

### 3.2.2 Relações lógicas ou de interdependência entre as tarefas

Segundo Kerzner (2011), dependências lógicas (ou obrigatórias) são relações que não podem mudar — por exemplo, erguer a estrutura de suporte ao telhado de uma casa antes de instalá-lo.

Serão utilizadas as premissas e dependências lógicas do cronograma executivo sugerido no edital como linha de base (ou referência) para comparação com os resultados obtidos neste estudo. Lá é previsto que a construção de cada casa deve levar até 3 meses, seguindo a rede mostrada na **FIGURA 6**, e que o contrato (construção de 50 casas) deve ser encerrado ao fim do sétimo mês.

Figura 6 – Rede de precedência sugerida para o cronograma executivo de uma casa



Fonte: adaptada de Município de Vargem Bonita (2019) pelo autor.

O edital mostra que, como premissa básica de planejamento, é indicado iniciar a construção de um grupo de casas até o quinto mês do projeto, como forma imediata de reduzir o efetivo mobilizado. Desta forma, é razoável considerar que o cronograma base de análise avalia a construção simultânea de um conjunto de 10 casas, com início de outro grupo de 10 casas no mês seguinte até o quinto mês.

O cronograma contratual e o otimizado foram criados no aplicativo Microsoft Project Professional. As lógicas de otimização, seleção e exposição aos fatores de influência estudadas foram implementadas e simuladas em linguagem VBA, dentro do aplicativo Microsoft Project.

### 3.2.3 Alocação de recursos e custos ao projeto

Uma vez definidas as tarefas e as relação de lógicas, fez-se a alocação dos recursos. Conforme descrito anteriormente, os recursos trabalhadores, maquinário e ferramentas, ou a combinação dos três componentes em qualquer proporção. Neste exemplo de aplicação, os recursos necessários para a execução de cada tarefa foram pesquisados no cronograma completo do projeto, sendo possível fazer a alocação de recursos e dos seus respectivos custos.

Os custos referentes às quantidades indicadas no edital foram obtidos por meio da base de dados do Sistema Nacional de Custos, Preços e Índices de Construção Civil (SINAPI) para o estado de Santa Catarina, atualizada em julho de 2021 e convertidos em dólar americano à cotação comercial de R\$ 5,4965 retroativa à data de 21 de janeiro de 2022 (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2021).

As taxas de produtividade típicas foram pesquisadas no próprio SINAPI e no Manual Básico de Indicadores de Produtividade na Construção Civil (CBIC, 2017).

O cronograma do projeto exemplo foi exposto à diminuição da taxa de produtividade, causada pela influência das variáveis meteorológicas, e ao aumento do custo de execução em função do tempo, dado pela projeção do INCC. A abordagem multidimensional foi submetida à simulação computacional (módulos de otimização multi-objetivos e classificação) por dez ciclos completos de interações. Os resultados são mostrados no item 3.3, onde também são feitas a comparação com o cenário base (edital) e a discussão.

### 3.3 Previsão do impacto do custo do projeto com base na previsão do INCC

Os valores do índice INCC dos últimos 10 anos (VALOR CONSULTING, 2021) foram tabelados e tratados conforme item 2.3 deste trabalho. Adicionalmente, foi calculada a regressão linear com grau de confiança superior a 95% dos 12 últimos valores da série normalmente distribuída. A equação de crescimento do valor previsto para a taxa do INCC ( $i_x$ ) em função do mês ( $m$ ) foi implementada nos cronogramas base e otimizável, conforme a Equação 7.

**Equação 7 - Cálculo da taxa de crescimento/evolução do INCC-DI estimado**

$$i_x = (0,018059 \times m) + 0,43063$$

Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.4 Análise dos resultados e discussão

Para fins de comparação entre o cenário base e o projeto otimizado, foram considerados a duração total do projeto em dias e o custo total do projeto em Dólares estadunidenses. A TABELA 3 traz a comparação quantitativa entre os valores encontrados:

Tabela 3 – Comparativo entre os dados do cenário base e o resultado do projeto otimizado

	Cenário base	Projeto Otimizado	Diferença
Duração total	208 dias	210 dias	+2 dias
Custo total (USD)	\$1.666.997,18	\$ 1.724.541,41	+ \$ 57.544,23

Fonte: elaborada pelo autor.

Em ambos os casos, foi considerado o início das obras em 6 de janeiro de 2022 (com custo base ajustado até janeiro de 2022). Apesar de originalmente a data de início do contrato do cenário base ter sido dia 3 de janeiro de 2020 (o edital 061/2019 da Prefeitura Municipal de Vargem Bonita considera o início das obras até o quinto dia útil após a homologação), a decisão de mover os cenários base e otimizado para o início de 2022 foi tomada pela influência da pandemia de Covid-19, principalmente com o objetivo de se trabalhar com a menor volatilidade de preços e disponibilidade de mão de obra.

Uma vez que a duração do projeto e o custo de execução são os principais resultados estudados, o deslocamento temporal para janeiro de 2022 fica justificado, sem prejuízo ao mérito da análise.

É importante observar que, apesar de não haver relatórios públicos sobre o progresso real do edital considerado como cenário base deste estudo, foi possível verificar o atraso nas obras — previstas para conclusão em até 7 meses após a data de início — por meio da fotografia de satélite disponibilizada em outubro de 2020 na plataforma Google Earth Professional (FIGURA 7). Nela é possível observar que menos de 40% das casas estão cobertas, concluídas ou em processo de acabamento. Também foi possível verificar junto à Prefeitura de Vargem Bonita (SC) que o edital para distribuição das casas populares foi homologado apenas em setembro de 2021.

Figura 7 - Andamento das obras do loteamento Bom Jesus em outubro de 2020 - cenário base deste estudo



Fonte: Google Earth Pro (2021).

O modelo de previsão meteorológica baseado nos trabalhos de Richardson (1981) e Shahin Abourizk e Mohamed (2011) foi implementado e alimentado pela série histórica dos últimos 10 anos de dados obtidos da estação meteorológica de Joaçaba-SC (código A841), localizada a 35 km do local das obras. A estação meteorológica mais próxima é a da cidade de Irani (SC), porém os dados dessa estação não foram utilizados, por conterem informações de velocidade de vento e pela inconsistência nos registros das temperaturas máximas e mínimas, nos últimos 10 anos.

Apesar de a previsão/modelagem da variável meteorológica velocidade média diária do vento ter sido estudada e modelada, não foram encontradas referências bibliográficas recentes sobre a influência do vento nas taxas de produtividade de atividades de construção residenciais ou de pequeno porte. O fator vento é comumente considerado quando existe a necessidade de içamentos de grandes volumes, conforme observado em Thomas e Ellis (2017).

No horizonte de um ano completo, gerado pelo módulo de previsão de variáveis meteorológicas, é importante observar que 16 dias foram completamente perdidos (7,62% dos dias úteis) e outros 92 tiveram a taxa de produtividade reduzida (43,81% dos dias úteis), observando-se os critérios da **TABELA 1**.

Mesmo com a taxa de produção prejudicada pelos fatores de influência meteorológica, foi observada a manutenção do prazo total do projeto (desvio de 2 dias) e a redução da taxa de ociosidade da mão de obra empregada, validando o modelo de otimização proposto por Hyari e El-Rayes (2006).

Pela característica de ser um esforço temporário, empreendido para criar-se um produto ou solução única (PMI, 2017), a dificuldade de obter suficiente previsibilidade em um projeto de construção típico foi mitigada, considerando o impacto dos principais fatores de influência nas tarefas, sequência de execução (LIA; RINGERIKE; KALSAAS, 2014) e nivelamento correto dos recursos empregados no projeto otimizado (HYARI; EL-RAYES, 2006).

A manutenção da duração do projeto otimizado traz benefício imediato ao custo final, uma vez que o aumento do custo da construção é observado mensalmente e descrito pela variação do INCC. A projeção da variação mensal do INCC foi calculada em 0,448689% de acréscimo mensal, utilizando o modelo de Touran e Lopez (2006) em Santa Catarina e a base de dados dos últimos 10 anos para o referido estado.

## 4 Conclusões

Foi desenvolvido e implementado um modelo híbrido de previsão meteorológica baseado nos trabalhos de Richardson (1981) e Shahin, Abourizk e Mohamed (2011) e um modelo de previsão da evolução do custo de construção, baseado no trabalho de Touran e Lopez (2006), capaz de estimar a evolução do Índice de Nacional de Custos da Construção (INCC).

Ambos os módulos foram integrados ao modelo de otimização multiobjetivos e classificação de cronogramas de construção proposto por Hyari e El-Rayes em 2006 e implementado em linguagem Visual Basic for Applications (VBA) como complemento aos cronogramas desenvolvidos dentro do *software* Microsoft Project. Dessa forma, foi possível estabelecer relações entre cada tarefa e as novas variáveis aquisitadas (fatores de influência no desempenho de execução de projetos típicos), e não mais somente em relação ao tempo ou a um recurso específico. Cada uma das novas relações criadas é passível de análise dentro do contexto dinâmico, caracterizando, assim, a abordagem multidimensional de planejamento.

O modelo de operação e otimização foi aplicado a um projeto típico real, no qual observou-se a manutenção da duração do projeto (desvio de 2 dias ou 0,96%) e o acréscimo do custo estimado em \$ 57.544,23 (ou 3,34%) em relação ao edital de venda do projeto exemplo. Ao verificar pequenos desvios em termos de custo e prazo na execução de projetos típicos, mesmo após a inclusão de fatores degradantes, ficou caracterizada a melhoria na previsibilidade de execução nos aspectos de prazo e custo.

## 5 Referências

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **SINAPI - Sistema Nacional de Custos, Preços e Índices da Construção Civil**. Disponível em: <<https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 1 set. 2021.

CBIC. **MANUAL BÁSICO DE INDICADORES DE PRODUTIVIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. v. 1, n. Maio, p. 202, 2017.

DARRINGTON, A. J. W.; LICHTIG, W. A. Rethinking the “G” in GMP : why estimated maximum price contracts make sense on collaborative projects. **Construction Lawyer**, v. 30, n. 2, p. 1–2, 2010.

FERRARI, O. **Fatores de influência na definição de modalidades de contratação em projetos**. p. 218, 2011.

GRIESER, J. *et al.* **New gridded maps of Koeppen’s climate classification**. Disponível em: <[http://www.fao.org/nr/climpag/globgrids/KC\\_classification\\_en.asp](http://www.fao.org/nr/climpag/globgrids/KC_classification_en.asp)>. Acesso em: 17 maio. 2021.

HYARI, K.; EL-RAYES, K. Optimal Planning and Scheduling for Repetitive Construction Projects. **Journal of Management in Engineering**, v. 22, n. 1, p. 11–19, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Bancos de dados meteorológicos**. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

IPT. **Catálogo de Processos e Sistemas Construtivos para Habitação**. 1. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1998.

JANSEN, S. J. T. **The Measurement and Analysis of Housing Preference and Choice**. In: SPRINGER (Ed.). . *The Measurement and Analysis of Housing Preference and Choice*. 1. ed. Dordrecht: [s.n.]. p. 101–109.

KERZNER, H. **Gerenciamento de projetos - Uma abordagem Sistêmica para Planejamento, Programação e Controle**. 10 ed. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

KRESS, G. **Practical techniques of business forecasting**. 1. ed. Westport, Connecticut: Books, Quorum, 1985.

KUENZEL, R. *et al.* SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects. **Automation in Construction**, v. 71, p. 21–33, 2016.

LEIBFRIED, S.; PIERSON, P. **European Social Policy - Between Fragmentation and Integration**. 1. ed. Washington DC: [s.n.].

LEICHT, D. *et al.* Multidimensional construction planning and agile organized project execution-The 5D-PROMPT method. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 16, 2020.

LEONARDO, V. S.; TEIXEIRA, M. A. C. Vol. 3, n. 1, Abril/2019. **Revista Estudos e Pesquisas em Administração**, v. 3, n. 1, p. 16–32, 2019.

LIA, K. A.; RINGERIKE, H.; KALSAAS, B. T. Increase predictability in complex engineering and fabrication projects. **22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Understanding and Improving Project Based Production, IGLC**, p. 437–449, 2014.

MUNICÍPIO\_DE\_VARGEM\_BONITA. **Concorrência Pública N.o PROCESSO 061/2019 CC 002/2019**. Disponível em: <<https://www.vargembonita.sc.gov.br/licitacoes/index/detalhes/codMapaltem/54055/codLicitacao/153392>>. Acesso em: 6 set. 2021.

OPPONG, G. D.; CHAN, A. P. C.; DANSOH, A. A review of stakeholder management performance attributes in construction projects. **International Journal of Project Management**, v. 35, n. 6, p. 1037–1051, 2017.

PMI. **Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK)/Project Management Institute**. 6. ed. Newtown Square: Project Management Institute, Inc., 2017.

RIBEIRO, M. S.; MICHALKA JÚNIOR., C. A contribuição dos processos industriais de construção para adoção de novas tecnologias na construção civil no Brasil. **Revista Vértices**, v. 5, n. 3, p. 89–107, 2003.

RICHARDSON, C. W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. **Water Resources Research**, v. 17, n. 1, p. 182–190, 1981.

ROGOVENKO, T.; ZAITSEVA, M. Use of statistical simulation in construction planning. **MATEC Web of Conferences**, v. 106, p. 1–6, 2017.

SENADO\_FEDERAL. **Código Civil Brasileiro**, 2002. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/2002/L10406.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/2002/L10406.htm)

SHAHIN, A.; ABOURIZK, S. M.; MOHAMED, Y. Modeling Weather-Sensitive Construction Activity Using Simulation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 137, n. 3, p. 238–246, 2011.

THOMAS, H. R.; ELLIS, R. D. Fundamental Principles of Weather Mitigation. **Construction Site Management and Labor Productivity Improvement**, n. February, p. 91–115, 2017.

TOURAN, A.; BOLSTER, P. J.; THAYER, S. W. **Risk assessment in fixed guideway construction**. 1. ed. Boston: Northeastern University, 1994.

TOURAN, A.; LOPEZ, R. Modeling Cost Escalation in Large Infrastructure Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 132, n. 8, p. 853–860, 2006.

TREBBE, M.; HARTMANN, T.; DORÉE, A. 4D CAD models to support the coordination of construction activities between contractors. **Automation in Construction**, v. 49, n. PA, p. 83–91, 2015.

VALOR CONSULTING. **Índice Nacional de Custo da Construção - Disponibilidade Interna (INCC-DI)**. Disponível em: <https://www.valor.srv.br/indices/incc-di.php?pagina=4>. Acesso em: 12 set. 2021.

VERMEULEN, B. *et al.* The Impact of Automation on Employment: Just the Usual Structural Change? **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 5, p. 1–27, 2018.

10.29327/2202814.7.24-2

