

MODELAGEM DE UM SISTEMA DE ABANDONO FASEADO PARA EVACUAÇÃO PREDIAL

Renata Carolina Barreiro Rodrigues, Edson Felipe Capovilla Trevisan

Departamento de Engenharia de Sistemas Logísticos – EPUSP

Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, 128- Cidade Universitária – 05508-900 – São Paulo – SP

recarol@gmail.com, edsontrevisan21@gmail.com

Marco Antonio Brinati, André Bergsten Mendes, Rui Carlos Botter

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica – EPUSP

Av. Prof. Mello Moraes, 2231- Cidade Universitária – 05508-030 – São Paulo – SP

mabrinat@usp.br, andbergs@usp.br, rcbotter@usp.br

RESUMO

Este artigo descreve o desenvolvimento de um modelo de otimização que visa determinar o sequenciamento ótimo da liberação faseada de andares de um prédio em caso de incêndio, a fim de minimizar o tempo total de evacuação. Trata-se de um problema ainda não explorado na literatura, para o qual foi desenvolvido um modelo de programação inteira mista em analogia aos modelos de sequenciamento de tarefas em ambientes flowshop. Foram obtidos resultados ótimos de sequenciamento para edifícios com 5, 10 e 25 andares, com o uso de pacotes comerciais (What's Best e GAMS). Os resultados obtidos são promissores, e indicam o desafio de desenvolvimento de estratégias de solução capazes de gerar respostas instantâneas (ou em intervalos de tempo muito pequenos) para aplicações reais. O problema em questão é rico, e permite diversas variações em função do tamanho dos edifícios, rotas de fuga existentes e número de pessoas por andar, entre outros aspectos.

PALAVRAS CHAVE: Evacuação predial faseada, Programação linear inteira mista, Flowshop, Modelagem matemática

ABSTRACT

This paper describes the development of an optimization model to minimize the total evacuation time of a building in the occurrence of fire. The model determines the optimal release sequence of people in different floors in a so called 'building phased evacuation'. This problem was modeled as a variation of a flowshop sequencing problem, thus resulting in a mixed integer linear model. Optimal solutions were obtained for instances with 5, 10 and 25 floors using commercial software like What's Best and GAMS. The results obtained so far are promising and also challenging, considering that real life applications require solutions to be generated instantaneously (or within a very short period of time). This is a rich problem due to alternative configurations found in different buildings such as number of floors, exiting routes and number of occupants in each floor, among other factors.

KEYWORDS: Phased evacuation, Mixed integer linear programming, Flowshop, Mathematical modeling

1. Introdução

A evacuação de pessoas é um tema de grande interesse em diversas áreas da sociedade e tem como necessidade assegurar que as pessoas envolvidas em um incidente evadam o local em que se encontram de forma segura e rápida. Em prédios de alta densidade de ocupação, Seito *et al.* (2008) sugerem a adoção do abandono faseado, com o intuito de não gerar tumulto e conflitos ao longo da descida.

Neste contexto, vários fatores podem ser analisados durante o processo de evacuação, tais como aspectos psicológicos e físicos, comportamento de multidões, instruções e procedimentos e rotas ótimas de saída. No entanto, um importante tópico não tem sido abordado com profundidade: o abandono faseado.

Assim sendo, estudou-se o problema de evacuação predial faseada em caso de incêndio e, para isso, foi desenvolvido um modelo de otimização para determinar a sequência ótima de liberação dos andares a fim de minimizar o tempo total de evacuação (considerando ou não prioridades por andar), evitando os tumultos durante a descida das escadas. Um grande potencial do estudo do abandono faseado é a geração de uma solução rápida, praticamente instantânea, calculada a partir do número de pessoas presentes em cada andar no momento do incêndio através do uso de sensores e computadores instalados no prédio.

2. Revisão bibliográfica

A evacuação de pessoas é tratada na literatura em várias frentes, abordando rotas de fuga em edifícios e estádios, comportamento humano, verificação de gargalos, análise estrutural e da qualidade do ar durante o incêndio, entre outros aspectos, mas nenhuma referência foi encontrada a respeito da otimização do abandono faseado.

Neste contexto, um modelo para situações de evacuação de multidões com o intuito de reproduzir os movimentos, tendências e velocidades de escoamento de aglomerações humanas em situações de congestionamento foi desenvolvido por Steinberg (2005). Alguns exemplos e aplicações desta modelagem também são apresentados, mas não há aplicabilidade direta no sequenciamento de uma evacuação predial.

Por outro lado, Seito *et al.* (2008) dissertam acerca de diversos temas relacionados à segurança contra incêndio no Brasil. Dentre eles, pode-se citar a abordagem da legislação, a determinação da velocidade de deslocamento e a distância entre as pessoas durante a descida, o comportamento humano em situações de incêndio e os métodos de evacuação.

Com relação à evacuação de edifícios altos, Oven & Cakici (2009) realizaram a modelagem do problema considerando um arranha-céu em Istambul, mas suas análises não contemplaram o instante de liberação de cada andar, mas sim a composição do ar, a temperatura ao longo do incêndio e o tempo total de descida para diferentes cenários utilizando o software building EXODUS desenvolvido pela Universidade de Greenwich.

Além disso, Kuligowski & Peacock (2005) apresentaram um levantamento de diferentes modelos de evacuação com aplicação em diversas áreas. Os modelos são classificados de acordo com suas capacidades em atingir certos objetivos, tais como roteirização, fatores humanos que afetam o andamento da evacuação, caráter estocástico, definição de grupos de pessoas para cada rota, fluxo de pessoas, entre outros. Verificou-se que não há nenhum modelo de otimização que considere a descida dos indivíduos de um prédio alto objetivando um sequenciamento ótimo dos disparos dos alarmes. O modelo mais próximo ao presente estudo é o EVACNET4, disponibilizado gratuitamente. A modelagem apresentada é em fluxo em rede, mas o objetivo principal é avaliar os gargalos do sistema e determinar o tempo total de evacuação. Ou seja, não há o sequenciamento de disparos, o que indica que o modelo não considera as conseqüências de tumultos nos tramos das escadas.

3. Modelagem

A modelagem matemática foi desenvolvida com base no modelo conceitual ilustrado na Figura 1.

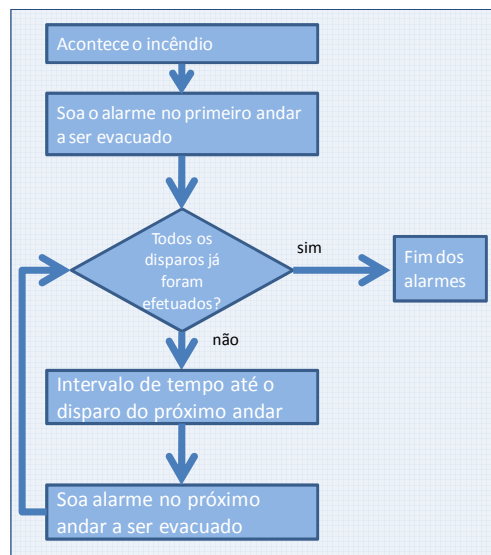


Figura 1 - Modelo conceitual.

Em prédios de alta densidade populacional, é importante organizar a evacuação a fim de evitar, nas escadas, conflitos e tumultos entre grupos de pessoas provenientes de diferentes andares. Para que isto seja possível, Seito *et al.* (2008) discutem a necessidade de se realizar um abandono faseado.

Dessa forma, no instante do incêndio, o andar afetado é evacuado imediatamente. Em seguida, liberam-se os próximos andares em instantes distintos, respeitando as janelas de tempo necessárias para que não haja tumulto entre grupos de pessoas oriundas de andares diferentes. Este ciclo se repete até que todos os andares tenham sido liberados. O modelo matemático descrito a seguir é baseado nesta lógica de operação.

O modelo de evacuação predial foi elaborado a partir da percepção da sua semelhança com um problema de sequenciamento de tarefas em um ambiente *flowshop* que, de acordo com Garey, *et al.* (1976), é do tipo NP – difícil. A modelagem descrita a seguir foi baseada no modelo de Souza (2009), no qual N tarefas independentes devem ser processadas por um subconjunto das M máquinas consideradas em uma seqüência pré-estabelecida.

O modelo de liberação faseada de andares considera um grupo de pessoas proveniente de um mesmo andar como uma tarefa e cada tramo (ou lance) da escada como uma máquina de processamento. Apesar da analogia, algumas situações operacionais são diferentes, como por exemplo, a possibilidade de um tramo estar sendo percorrido por grupos provenientes de dois ou mais andares diferentes (o equivalente a uma máquina realizar duas ou mais tarefas concomitantemente), ou um grupo de pessoas não necessariamente ter que percorrer todos os tramos da escada.

A modelagem desenvolvida para o problema de abandono faseado é apresentada a seguir:

- N : número total de andares na escada;
 - T : número suficientemente grande;
 - i, j, h : índices referentes às pessoas de um andar (0, no caso de andar fictício) – $\{0, 1, \dots, N\}$;
 - m : índice referente ao tramo da escada – $\{1, \dots, N\}$;
 - $p_{m,i}$: tempo gasto por uma pessoa do andar i para descer o tramo m ;
 - $s_{m,i}$: intervalo de tempo entre a primeira e a última pessoa do grupo i a passar pelo mesmo ponto do tramo m ;
 - f_i : parâmetro binário cujo valor 1 indica o andar de ocorrência do incêndio;
-
- G_m : conjunto de grupo de pessoas que passa pelo tramo m , ou seja, $G_m = \{m,$

- $m+1, \dots, N$ };
- M : conjunto total de tramos na escada;
- CM_i : conjunto de andares por onde passa o grupo de pessoas originadas no andar i , ou seja, $CM_i = \{1, 2, \dots, i-1, i\}$;
- $x_{m,i,j}$: variável binária que recebe valor 1 caso as pessoas do andar j sucedam as pessoas do andar i no tramo m ;
- $c_{m,i}$: variável que corresponde ao instante de término da descida da primeira pessoa do andar i no tramo m ;
- $b_{m,i}$: variável que corresponde ao instante de início da descida de um grupo de pessoas proveniente do andar i pelo tramo m ;
- t_{final} : variável cujo valor equivale ao instante final de evacuação do edifício.

As restrições adaptadas para a modelagem elaborada são as seguintes:

- Há apenas um antecessor i do grupo j no tramo m :

$$\sum_{\substack{i \neq j \\ i \in (G_m, 0)}} x_{m,i,j} = 1 \quad j \in N, m \in CM_j \quad (\text{eq. 01})$$

- Há apenas um sucessor j do grupo i no tramo m :

$$\sum_{\substack{i \neq j \\ j \in G_m}} x_{m,i,j} \leq 1 \quad i \in N, m \in CM_i \quad (\text{eq. 02})$$

- O tramo m só será percorrido pelo grupo j após o grupo i ter iniciado a descida neste tramo, que, por sua vez, sucedeu a grupo h (real ou fictício):

$$\sum_{\substack{h \neq j, h \neq i \\ h \in (G_m, 0)}} x_{m,h,i} \geq x_{m,i,j} \quad i, j \in N, m \in CM_i \cap CM_j \quad (\text{eq. 03})$$

- Evita subciclos, ou seja, se j sucede i em m , i não pode suceder j em m :

$$x_{m,i,j} + x_{m,j,i} \leq 1 \quad i \in N; j = i + 1, \dots, n; m \in CM_i \cap CM_j \quad (\text{eq. 04})$$

- Haverá apenas um grupo inicial em cada tramo, ou seja, apenas um grupo sucede a grupo inicial:

$$\sum_{i \in G_m} x_{m,0,i} \leq 1 \quad m \in M \quad (\text{eq. 05})$$

- Pessoas de dois andares diferentes consecutivos só estarão presentes no mesmo tramo m quando as pessoas do andar i , anterior a j , já tiverem liberado espaço suficiente neste tramo para que as pessoas do andar j possam acessá-lo:

$$b_{m,j} \geq b_{m,i} + s_{m,i} - (1 - x_{m,i,j})T \quad m \in M; i, j \in (G_m \cup 0); j \neq i \quad (\text{eq. 06})$$

- Pessoas do andar i só podem começar a descer o tramo m quando acabarem de descer o tramo $m+1$. Além disso, não deve haver espera dessas pessoas entre os tramos $m+1$ e m :

$$c_{m,i} = c_{m+1,i} + p_{m,i} \quad m \in M; i \in G_m \quad (\text{eq. 07})$$

- Define o valor mínimo para a variável t_{final} , o instante final de evacuação:

$$t_{final} \geq c_{1,i} + s_{1,i} \quad i \in G_1 \quad (\text{eq. 08})$$

- Garante a coerência entre as variáveis b_{mi} e c_{mi} , ou seja, o instante de entrada no tramo e o instante de saída do tramo pelo primeiro integrante do grupo:

$$c_{m,i} = b_{m,i} + p_{m,i} \quad m, i \in G_m \quad (\text{eq. 09})$$

Considerando a liberação faseada dos andares para evacuação, foi identificada a necessidade de priorizar os andares mais críticos nessa liberação. Para garantir isso foi criada uma restrição adicional na modelagem:

- Garante que o andar onde acontece o incêndio seja liberado no instante zero:

$$b_{i,i} \leq (1 - f_i)T \quad i \in N \quad (\text{eq. 10})$$

A princípio, a função objetivo considerada foi:

$$\min t_{\text{final}}$$

Observa-se que o parâmetro $p_{m,i}$ (tempo de descida do grupo i pelo andar m) permite que a fadiga do grupo de pessoas seja considerada, ou seja, pode-se atribuir valores mais altos para andares mais baixos (por exemplo, tempo de descida do grupo 15 no andar 14 ser maior que no andar 10, que por sua vez é maior que no andar 5: $p_{14,15} = 10$; $p_{10,15} = 12$; $p_{5,15} = 14$).

4. Resultados Computacionais Preliminares

Foram utilizados dois *softwares* para resolução do modelo. Inicialmente foi utilizado o *software What's Best* (versão 9.0) para solução de instâncias menores do problema com o propósito de verificar e validar o modelo. Para instâncias de dimensão maior, optou-se pela linguagem *Gams* (versão 2.0.34.19) e o solver *CPLEX*.

Foram realizados testes com o número total de andares, N , variando entre 5 e 25. Admitiu-se um caso simples no qual a população de todos os andares era constante (igual a 30 pessoas). Com base em Seito *et al.* (2008), considerou-se uma escada com seção de largura constante para passagem de apenas uma pessoa, na qual as 30 pessoas demorariam 26 segundos para entrar. Além disso, baseado na velocidade de descida obtida por Proulx (1995), considerou-se que o tempo de descida de uma pessoa por um tramo é constante durante todo o percurso e de 11 segundos. Ou seja, admitiu-se o valor do parâmetro $p_{m,i}$ como 11 segundos e do parâmetro $s_{m,i}$ como 26 segundos.

Considerando $N=5$, a solução ótima obtida no *software What's Best* é ilustrada nas Figuras 2 a 4. Foram feitos três testes: o primeiro sem andar de incêndio definido (sem definição do primeiro andar a ser liberado), o segundo com incêndio ocorrendo no segundo andar e o último com incêndio ocorrendo no quarto andar. Os resultados obtidos, ilustrados nestas figuras, mostram a ocupação dos tramos da escada pelas pessoas provenientes de cada andar. O eixo vertical corresponde ao tramo da escada, enquanto o eixo horizontal corresponde ao instante em observação. As curvas ilustram o instante de entrada e de saída de um mesmo grupo em um tramo. É importante frisar que pessoas de um mesmo grupo podem ocupar tramos diferentes da escada simultaneamente.

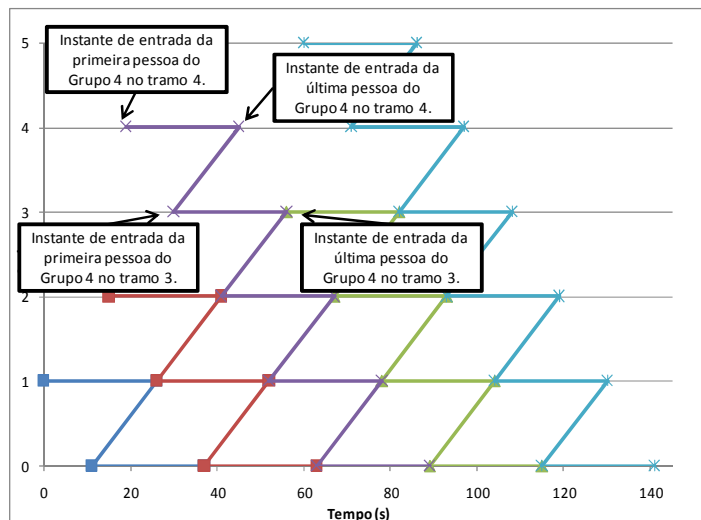


Figura 2 - Resultado 1 - sem andar de incêndio definido.

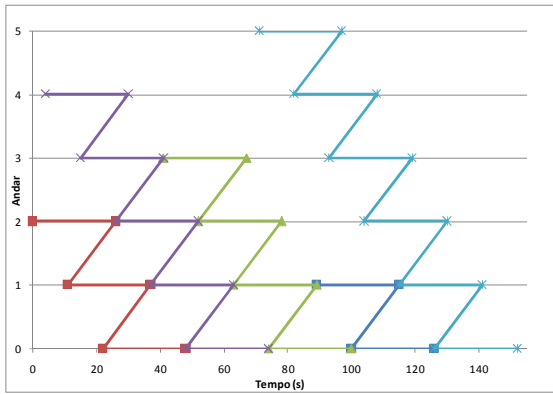


Figura 3 - Resultado 2 - incêndio no segundo andar.

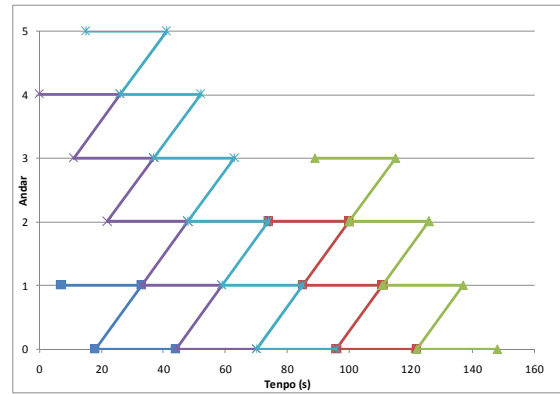


Figura 4 - Resultado 3 - Incêndio no quarto andar.

Todos os resultados obtidos foram soluções ótimas para o problema. No entanto, na Figura 4, a solução não é a mais adequada sob o ponto de vista do senso comum. Isto porque o grupo proveniente do primeiro andar foi liberado no instante sete, sendo que ele poderia ter sido liberado no instante zero sem que houvesse perda da otimalidade da solução. Para solucionar esta inconveniência, foi efetuada uma revisão na função objetivo.

5. Revisão do modelo e sua função objetivo

Tendo em vista a forte recomendação de Seito *et al.* (2008), em que o andar do incêndio, o superior e o inferior possuem prioridade máxima de evacuação, foram propostas algumas alterações na função objetivo.

A função objetivo inicial visa minimizar o tempo total de evacuação, t_{final} . Se fosse acrescentada a ela uma parcela correspondente aos instantes de liberação de cada andar a nova função objetivo seria:

$$\min t_{final} + \sum_{i=1}^N b_{i,i} \quad i \in N \quad (eq. 11)$$

No entanto, não é desejável que a parcela correspondente aos instantes de liberação influencie no tempo total de evacuação. Por isso, foi atribuído um peso menor a essa parcela, de forma que a nova função objetivo considerada seja:

$$\min t_{final} + 0,01 * \sum_{i=1}^N b_{i,i} \quad i \in N \quad (eq. 12)$$

Usando esta modelagem, foram realizados testes para o incêndio localizado nos andares 4 e 5 respectivamente. O resultado obtido foi o mostrado a seguir.

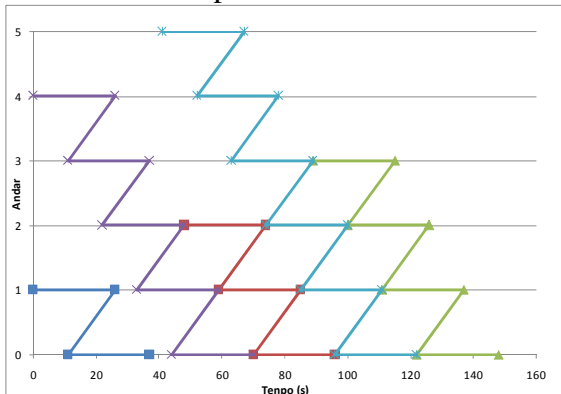


Figura 5 - Resultado 4 - incêndio no andar 4 com nova função objetivo.

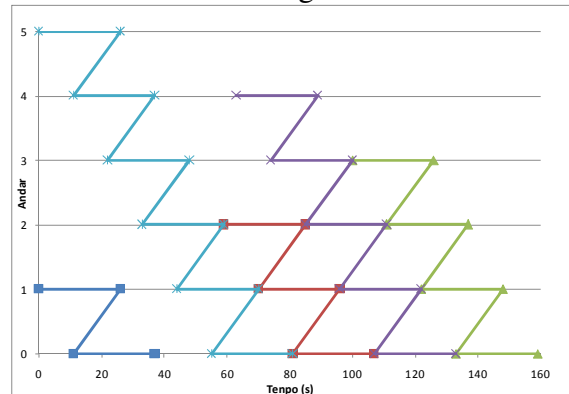


Figura 6 - Resultado 5 - Incêndio no andar 5.

A partir da comparação dos resultados das Figuras 4 e 5 percebe-se que não houve alteração no tempo total de evacuação do edifício. No entanto, todos os andares foram liberados assim que possível, sem haver espera.

Na modelagem desenvolvida até este momento, deu-se preferência ao andar de incêndio, uma vez que ele é considerado o de maior risco. No entanto, Seito *et al.* (2008) consideram que os andares vizinhos ao andar do incêndio também tenham grande risco e, por isso, também deve ser dada atenção especial a eles. Dessa forma, foi feita mais uma alteração na função objetivo de forma a garantir que, uma vez evacuado o andar do incêndio, seus vizinhos seriam os próximos.

Foi adicionada à função objetivo a seguinte parcela:

$$\sum_{m=2}^{N-1} \sum_{i=m-1}^{m+1} f_m * c_{m-1,i} + \sum_{i=1}^2 f_1 * c_{1,i} + \sum_{i=N-1}^N f_N * c_{N-1,i} \quad (\text{eq. 13})$$

onde f_m é um parâmetro binário que identifica o andar do incêndio e $c_{m,i}$ é o instante final de descida da primeira pessoa do grupo i pelo tramo m . Esta parcela adicional é dividida em três somatórios, de forma que o somatório só terá valor não nulo quando um dos f_i ($i = 1, \dots, N$) for igual a 1, ou seja, quando estiver sendo analisado o andar do incêndio.

Por considerar-se que a liberação das pessoas dos andares vizinhos ao andar incendiado é mais importante do que o tempo mínimo de evacuação, foi atribuída a essa parcela peso 1000. Dessa forma, a nova função objetivo é a seguinte:

$$\min t_{final} + 0,01 * \sum_{i=1}^N b_{i,i} + 1000 * \left(\sum_{m=2}^{N-1} \sum_{i=m-1}^{m+1} f_m * c_{m-1,i} + \sum_{i=1}^2 f_1 * c_{1,i} + \sum_{i=N-1}^N f_N * c_{N-1,i} \right) \\ i \in N, m \in M \quad (\text{eq. 14})$$

A partir da nova função objetivo, foram realizados testes para 5 e 10 andares (com a utilização dos *softwares* What's Best e Gams respectivamente).

Para um edifício de 5 andares, considerando o incêndio localizado no andar 4, o resultado obtido é ilustrado na Figura 7.

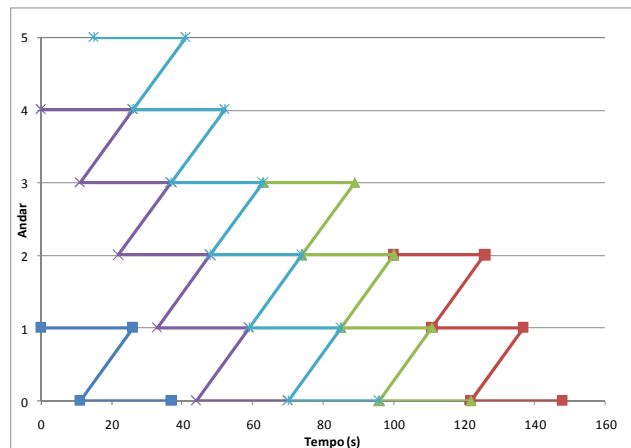


Figura 7 - Resultado Final - 5 andares.

Para um edifício de 10 andares, mantendo o incêndio no andar 4, a solução obtida é ilustrada na Figura 8.

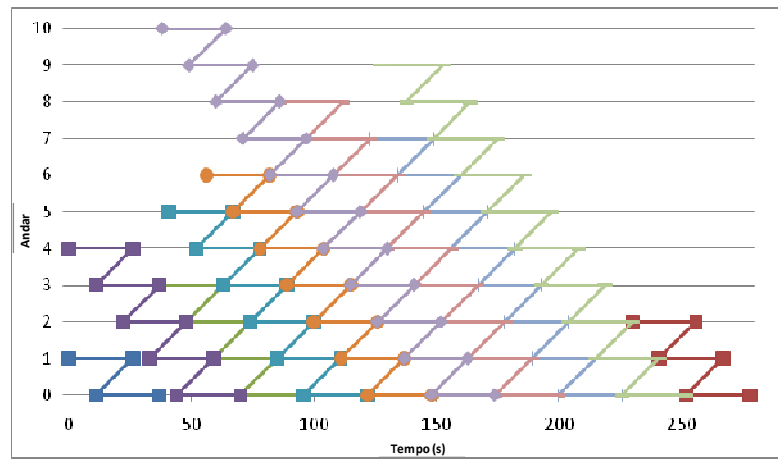


Figura 8 – Resultado Final - 10 andares.

Além disso, para edifícios altos, é notório um maior risco de vida para ocupantes de andares mais altos. Sendo assim, foi atribuído a cada andar um peso pelo qual o instante de liberação $b_{i,i}$ possa ser dividido, de forma a priorizar os grupos provenientes destes andares:

$$fobj = t_{final} + \sum_{i=1}^N \left(\frac{b_{i,i}}{peso_i} \right) + 1000$$

$$* \left(\sum_{m=2}^{N-1} \sum_{i=m-1}^{m+1} f_m * c_{m-1,i} + \sum_{m=1}^2 f_1 * c_{1,i} + \sum_{i=N-1}^N f_N * c_{N-1,i} \right)$$

$i \in N, m \in M$ (eq15)

Para o estudo de caso de 25 andares, considerou-se arbitrariamente que um andar tem um peso 20% menor que o andar imediatamente inferior a ele:

Tabela 1 - Pesos utilizados para edifício de 25 andares.

Andar	pesos	Andar	pesos
1	10000	14	550
2	8000	15	440
3	6400	16	352
4	5120	17	282
5	4096	18	226
6	3277	19	181
7	2622	20	145
8	2098	21	116
9	1678	22	93
10	1342	23	74
11	1074	24	59
12	859	25	47
13	687		

Não obstante, há um grave problema em atribuir um alto custo na parcela de instante de liberação dos andares adjacentes ao incêndio na função objetivo: a solução ótima obtida, com um GAP de, por exemplo, 1%, pode não ser satisfatória já que o valor a ser minimizado é muito alto em relação ao valor t_{final} . Uma vez que a recomendação de evacuação imediata do andar de incêndio e seus adjacentes é muito forte, decidiu-se por fixar o instante de liberação do andar de incêndio e seus adjacentes:

$$b_{i,i} * f_i = 0$$

$$b_{i,i-1} * f_i = s_{i,i} * f_i$$

$$b_{i-1,i-1} * f_i = (b_{i-1,i+1} + s_{i-1,i+1}) * f_i$$

Além disso, foi fixada também a sequência de passagem desses andares críticos pelo primeiro andar (já que, uma vez fixada essa sequência para o primeiro andar, ela é mantida para os andares superiores já que não há espera durante a descida). Seja i o andar de incêndio, foi fixado:

$$\begin{aligned} x_{1,i,i+1} &= 1 \\ x_{1,i+1,i-1} &= 1 \\ x_{i,0,i} &= 1 \end{aligned}$$

Com estas modificações, pode-se retirar a parcela de peso 1000 da função objetivo, resultando em:

$$\min t_{final} + \sum_{i=1}^N \left(\frac{b_{i,i}}{peso_i} \right) \quad i \in N \quad (eq.16)$$

Portanto, a função objetivo acima foi utilizada nas análises para 25 andares, sem perda de fidelidade com a recomendação de Seito, et al., (2008).

Por fim, foi adicionado ao modelo um limite inferior para o valor da variável t_{final} (661 segundos).

6. Análise do tempo computacional e dimensão do problema para outras instâncias

Uma vez definidas a função objetivo e as restrições para a instância de 25 andares, estudou-se a dimensão do problema para instâncias maiores. A Figura 9 ilustra o número de variáveis e restrições, indicando um crescimento exponencial das mesmas.

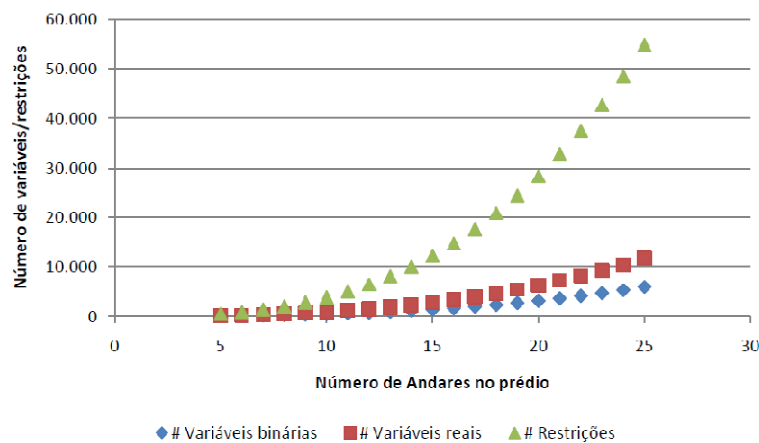


Figura 9 – Crescimento de variáveis e restrições com o crescimento de instâncias.

Além disso, analisou-se o tempo de processamento para diferentes instâncias, verificando um crescimento abrupto a partir de 8 andares (Figura 10).

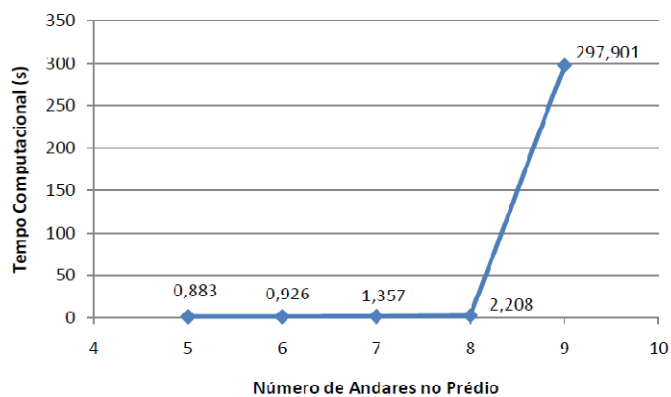


Figura 10 – Crescimento do tempo computacional com o crescimento de instâncias.

Para obtenção dos resultados para instâncias a partir de 10 andares, procuraram-se os melhores parâmetros para busca através do algoritmo *Branch and Bound*, além de se relaxar e priorizar a seleção de algumas variáveis binárias. Tal procedimento não está no escopo deste artigo.

7. Resultados para 25 andares

Para um prédio de 25 andares com incêndio localizado no andar 20, o resultado obtido é ilustrado na Figura 11. Nota-se que, como esperado, o andar 20 foi liberado no instante zero, assim como os andares 1 e 8. Os andares 1, 3, 5, 8, 10, 15 e 17 foram evacuados antes do andar 20, pois essa evacuação não influenciou o tempo total de descida do andar incendiado.

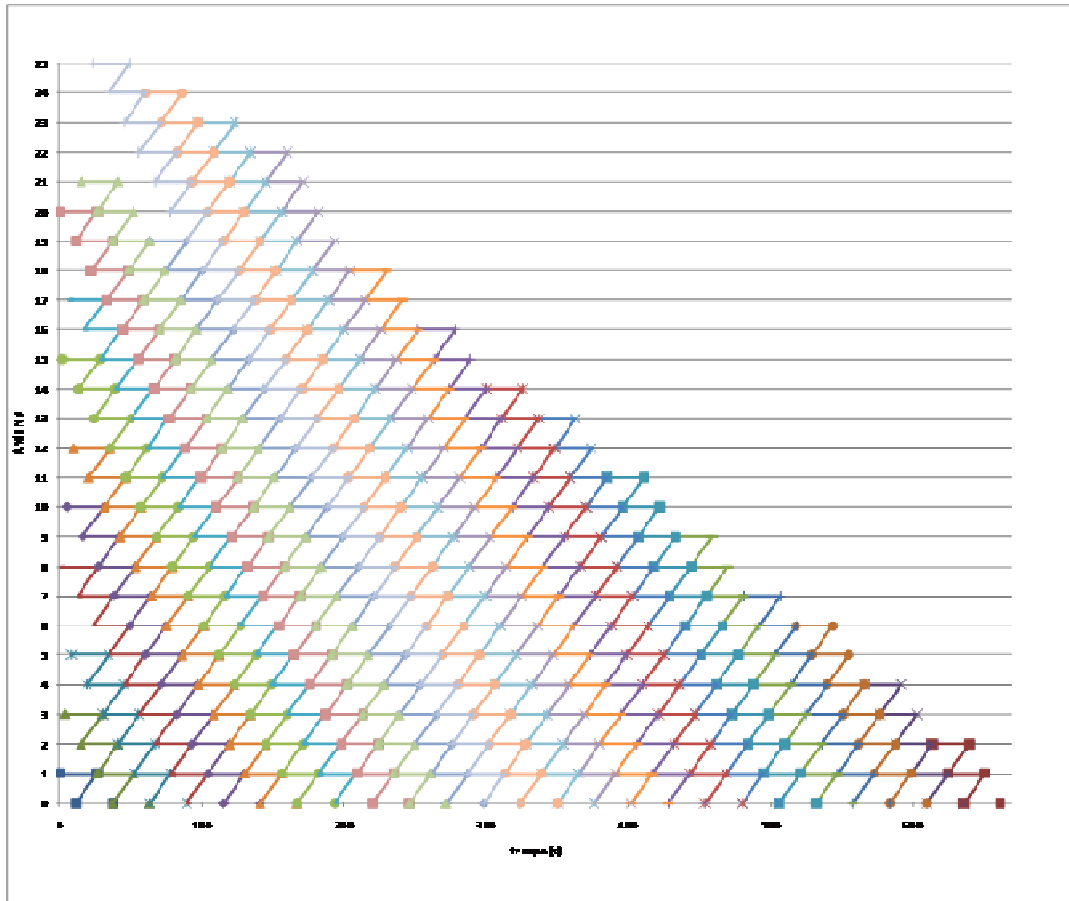


Figura 11 - Resultado para 25 andares – GAP: 1,34%.

Observa-se que os andares mais altos foram priorizados durante o processo de evacuação faseada. O gap de 1,34% (calculado com base na função objetivo – eq.16) não garante a solução ótima, no entanto o tempo de evacuação encontrado (662 segundos) é apenas 0,15% maior que o limite inferior para esse tempo (661 segundos). Formalmente, pode-se definir “w” como o intervalo de tempo entre o último integrante de um grupo e o primeiro integrante de um grupo subsequente na saída do edifício (m=1):

$$w_{i,j} = (b_{1,i} + s_{1,i} - b_{1,j}) * x_{1,i,j} \quad i, j \in G_1$$

dessa forma, verificou-se que todos os valores de $w_{i,j}$ são iguais a zero, com exceção de $w_{17,20}$ que é igual a um. Atribui-se a isso o fato do andar 20, por ser o local do incêndio, não poder ser liberado em algum instante diferente do inicial, o que limita o ramo de soluções para o problema.

Além disso, nota-se que a evacuação do andar do incêndio e seus vizinhos foi priorizada em primeiro plano enquanto a evacuação dos andares superiores foi priorizada em segundo plano.

Também foi realizada uma análise de sensibilidade acerca do número de ocupantes por andar. Para isto, variou-se os valores dos parâmetros $s_{m,i}$ para diferentes grupos, de forma que para m fixo, o valor do parâmetro varie com i e, para i fixo, o valor do parâmetro seja constante para todos os valores de m .

Tabela 2 - Valores de s - Análise de Sensibilidade.

parâmetro	Valor	parâmetro	Valor
$s_{m,1}$	4	$s_{m,14}$	38
$s_{m,2}$	47	$s_{m,15}$	3
$s_{m,3}$	27	$s_{m,16}$	39
$s_{m,4}$	5	$s_{m,17}$	37
$s_{m,5}$	2	$s_{m,18}$	33
$s_{m,6}$	13	$s_{m,19}$	18
$s_{m,7}$	1	$s_{m,20}$	51
$s_{m,8}$	28	$s_{m,21}$	47
$s_{m,9}$	31	$s_{m,22}$	14
$s_{m,10}$	29	$s_{m,23}$	16
$s_{m,11}$	2	$s_{m,24}$	44
$s_{m,12}$	24	$s_{m,25}$	38
$s_{m,13}$	9		

A resolução do problema parou em virtude da falta de memória disponível, em um *gap* de 3,78%. O tempo total de evacuação neste caso foi de 613 segundos e o valor da função objetivo de 624,49. A Figura 12 ilustra o resultado encontrado.

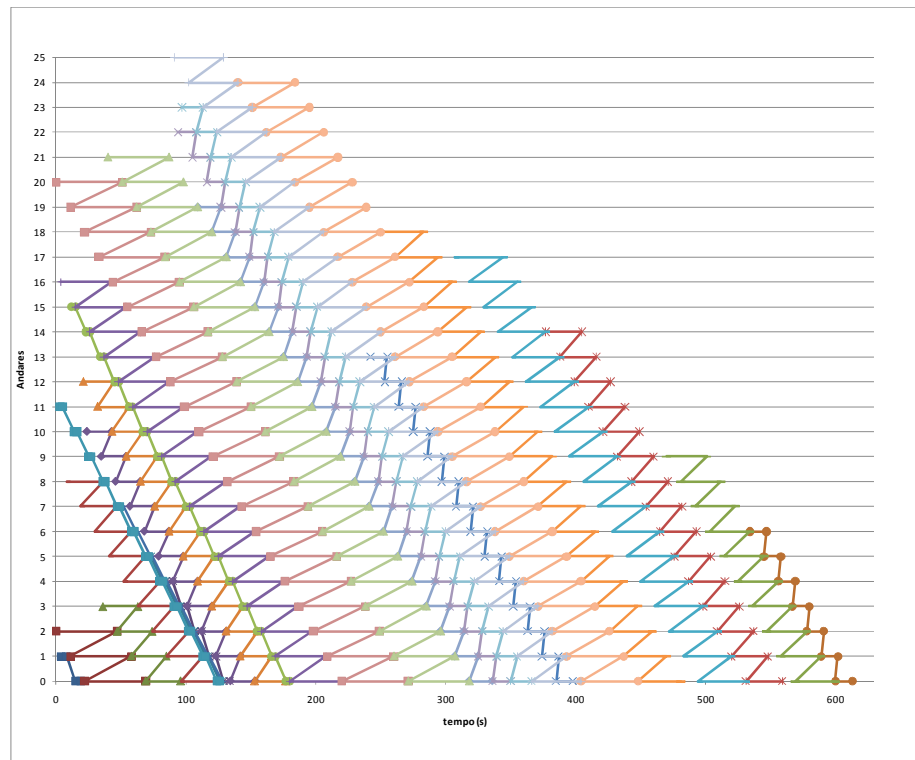


Figura 12 – Resultado para situação com $s_{m,i}$ variável.

Além disso, outra análise de sensibilidade pode ser feita, em que o parâmetro $s_{m,i}$ varia de acordo com o número de pessoas em um andar e de acordo com a seção da escada, que pode ser variável ao longo da descida.

Faz-se necessário comentar que os resultados obtidos para problemas com mais de 9 andares só foram possíveis com a mudança de alguns parâmetros no algoritmo *branch and bound*. A partir de uma revisão da modelagem, percebeu-se que não é necessário definir o

sequenciamento dos grupos de pessoas em cada tramos da escada, basta definí-los no primeiro tramo que o sequenciamento nos demais estará definido. Ou seja, só é necessário definir as variáveis x_{1ij} (primeiro andar) para que as demais variáveis x_{mij} ($m>1$) sejam definidas. Dessa forma, foram retiradas do modelo as variáveis x_{mij} para $m>1$ e, a partir da variação dos parâmetros do *Branch and Bound* relativos ao uso de memória e critério de ramificação (*depth search first*), foi possível gerar soluções para instâncias com 10 e 25 andares.

8. Conclusões

Este trabalho se propôs a investigar um problema ainda não explorado na literatura relativo à programação dos instantes de liberação dos ocupantes dos diversos andares de um edifício em situação de incêndio.

Um modelo matemático foi adaptado a partir de uma formulação desenvolvida para um problema de sequenciamento de tarefas em um ambiente *flowshop*. Uma restrição nova (eq06) foi incorporada para permitir a presença de grupos de pessoas de 2 andares no mesmo tramo ao mesmo tempo. A analogia das tarefas com as pessoas e das máquinas com os andares a partir do problema de sequenciamento de máquinas em um *flowshop* se mostrou adequada para o desenvolvimento do modelo.

A natureza combinatória do problema ficou evidenciada ao resolver os problemas de grande porte, em que o tempo computacional cresceu abruptamente. Mesmo com o relaxamento de algumas variáveis binárias e a utilização de recursos e ferramentas para a execução do algoritmo *Branch and Bound*, observou-se uma grande dificuldade de se obter resultados ótimos e rápidos para um edifício de 25 andares. Sendo assim, para o estudo de problemas maiores, sugere-se o estudo de heurísticas e técnicas de decomposição, como a relaxação lagrangiana.

Destaca-se, ainda, a possibilidade de uma solução de abandono faseado instantânea, calculada a partir do número de pessoas presentes em cada andar no momento do incêndio (através do uso de sensores e computadores instalados no prédio em uma região protegida contra incêndios ou até mesmo computadores instalados fora do edifício). Dessa forma, cada edifício poderia ser equipado com um mecanismo que determinaria a sequência ótima ou próxima da ótima (em caso do uso de heurísticas) para o abandono faseado inclusive em edifícios que possuam escadas com seção variável.

Por fim, ressalta-se que integração deste modelo com modelos que determinem rotas de fuga em cada andar pode ser estudada, possibilitando um abandono faseado em função da rota de fuga, possibilitando soluções ainda mais eficientes.

9. Referências bibliográficas

Escudero, L., & Salmeron, J. (2005). On a Fix-and-Relax framework for a Class of Project Scheduling Problems. *Annals of Operations Research*, 19, pp. 163-188.

Garey, M., Johnson, D. S., & Sethi, R. (1976). The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling. *Mathematics of Operations Research*, Vol. 1, p.117-129.

Kuligowski, E. D., & Peacock, R. D. (2005). *A Review of Building Evacuation Models*. National Institute of Standards and Technology.

Oven, V., & Cakici, N. (2009). Modelling the evacuation of a high-rise office building in Istanbul. *Fire Safety Journal*.

Proulx, G. (1995). *Evacuation Time and Movement in Apartment Buildings*. Ontario, Canada: National Fire Laboratory, Institute for Research and Construction.

Seito, A. I., Gil, A. A., Pannoni, F. D., Ono, R., Silva, S. B., Del Carlo, U., et al. (2008). *A segurança contra incêndio no Brasil*. São Paulo: Projeto.

Souza, E. C. (2009). *Programação de Tarefas em um Flowshop*. São Paulo: Universidade de São Paulo.