

**Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Civil**

**Desenvolvimento de modelo para  
simulação de situações de evacuação de  
multidões.**

José Gustavo Steinberg

**Campinas**

**2005**

**Universidade Estadual de Campinas**  
**Faculdade de Engenharia Civil**

**Desenvolvimento de modelo para  
simulação de situações de evacuação de  
multidões.**

José Gustavo Steinberg

Orientador: Prof. Dr. Orlando Fontes Lima Jr.

Dissertação de Mestrado apresentada a Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Transportes.

**Campinas**

**2005**

WADA \_\_\_\_\_  
EX \_\_\_\_\_  
BC/ 69000  
16.123-06  
D X  
14.00  
2.2106/06  
)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

St34d Steinberg, José Gustavo  
Desenvolvimento de modelo para simulação de  
situações de evacuação de multidões / José Gustavo  
Steinberg.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Orlando Fontes Lima Junior  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e  
Urbanismo.

1. Evacuações de civis. 2. Multidões. 3. Métodos de  
simulação. 4. Modelos matemáticos. 5. Pânico. I. Lima  
Júnior, Orlando Fontes. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e  
Urbanismo. III. Título.

2006/12/853

Título em Inglês: Modelling to simulate crowd evacuation situations  
Palavras-chave em Inglês: Civil evacuation, Crowds, Simulation methods,  
mathematical models, Panic

Área de concentração: Transportes

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Kil Jin Park, Carlos Alberto Bandeira Guimarães

Data da defesa: 22/12/2005

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**TÍTULO DO TRABALHO:**

**Desenvolvimento de modelo para simulação  
de situações de evacuação de multidões**

**Nome e Sobrenome do Autor:**

Jose Gustavo Steinberg

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

Prof. Dr. Orlando Fontes Lima Jr.  
FEC – Unicamp

Prof. Dr. Kil Jin Park  
FEAGRI – Unicamp

Prof. Dr. Carlos Alberto Bandeira Guimarães  
FEC - Unicamp

**Presidente e Orientador(a)/Nome da Instituição**

Prof. Dr. Orlando Fontes Lima Jr. / FEC - Unicamp

Campinas, 22 de Dezembro de 2005

## Sumário

Lista de Figuras.....	3
Lista de Gráficos e Fotografias.....	5
Resumo.....	6
Abstract.....	8
1 Introdução.....	10
2 Revisão bibliográfica.....	18
3 Metodologia.....	41
4 Simulação.....	70
5 Conclusões e recomendações.....	86
Referências bibliográficas.....	91
Anexo.....	94

## Lista de figuras

1.1 Instalação vazia. (Wembley St. 1998).....	12
1.2 Instalação congestionada. (Wembley St. 1998).....	12
1.3 NEW ORLEANS – Milhares de moradores desesperados imploravam por ajuda conforme suas condições pioravam. Com as fortes chuvas criou-se uma situação tensa que levou a brigas, empurra-empurra e insegurança generalizada.....	15
2.1 Como num direcionador de fluxo, muito usado na hidráulica, as colunas da estação de metro funcionam como paletas que separam as partículas com direções opostas.....	28
2.2 Interface do programa com o usuário. Esta é uma tela que demonstra os resultados simulados.....	29
2.3 Interface do programa com o usuário. Esta é uma tela que demonstra o processo de simulação em tempo real.....	30
2.4 Simulação de duas correntes de pedestres que concorrem em certo instante de suas trajetórias.....	35

2.5 A figura mostra uma instalação de cinema projetada convencionalmente e uma melhorada. Ao lado de cada proposta arquitetônica estão expressos os tempos de espera em função da localização do indivíduo. Observa-se uma queda drástica no tempo de espera de indivíduos situados nas fileiras do fundo.....	36
2.6 Proposta de novo Layout para salas de aulas tendo em vista a rápida evacuação dos alunos em casos de emergência.....	37
3.1 Torcedores de futebol em pânico tentando escapar do estádio em Sheffield. Quase ninguém consegue passar pela porta aberta devido à alta pressão interna que ocorre durante o congestionamento.....	44
3.2 Grelha cujas linhas e colunas definem nós.....	45
4.1 Representação gráfica da sala de aula, com seus nós de não transporte e alunos alocados randomicamente conforme no dia do experimento.....	82
4.2 Instante $T = 4,0$ seg. onde a primeira pessoa sai da sala.....	84
4.3 Instante em que se abre a segunda porta. $T = 10,0$ seg.....	85

## **Lista de gráficos e fotografias**

1.1 Regularização de vazão pluvial através de barramento.....	13
2.1 Número de pessoas que escapariam numa situação de fuga em pânico em função do parâmetro de pânico da multidão.....	40
3.1 Tempo de evacuação por velocidade desejada.....	52
4.1 Início do processo de fuga.....	74
4.2 Carteiras escolares formando pontos de não transporte.....	75
4.3 Todas as pessoas já estão no corredor central.....	76
4.4 A porta é aberta e sua largura dobra.....	77
4.5 A porta mais larga facilita a evacuação.....	78
4.6 Final da evacuação.....	79

## **Resumo**

Steinberg, José Gustavo. Desenvolvimento de modelo para simulação de situações de evacuação de multidões. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 90 pág. Dissertação de Mestrado.

Até os prognósticos mais otimistas apontam para uma tendência de inchaço populacional nas próximas décadas. As taxas de crescimento populacional se mostram crescentes, e a cada dia tornam-se mais freqüentes situações de filas, congestionamentos e aglomerações humanas. O presente estudo pretende analisar os movimentos, tendências e velocidades de escoamento de aglomerações humanas em situações de congestionamento. As situações de fugas em pânico, sempre impregnadas com muitas e complexas variáveis, serão reduzidas a protótipos que se assemelham em sua essência com a realidade. Em muitas situações do dia a dia será possível aplicar os resultados obtidos no estudo, como no dimensionamento de cinemas, teatros e centros de entretenimento. Neste caso, o foco está em melhorar os níveis de conforto dos usuários do sistema minorando seu tempo de exposição a situações de congestionamento.

Muitos estudos já foram realizados nesta linha de pesquisa, e os modelos vêm se mostrando cada vez mais realísticos à medida que as variáveis psicológicas são utilizadas como uma ferramenta fundamental para prever o comportamento das partículas no sistema, já que nós, seres humanos, raramente nos comportamos previsivelmente como um fluido.

Este estudo tem como objetivo a modelagem das situações de evacuação, e o estudo mecânico e psicológico do comportamento coletivo. Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para levantamento das variáveis, mecânicas e psicológicas, que influenciam no processo de evacuação. A análise crítica e processamento destas informações definiram como se pode alterar ou anular variáveis envolvidas com a finalidade de minimizar o tempo de fuga e reduzir acidentes e níveis de pânico na multidão.

Como resultado final, foi desenvolvido um modelo que permite a realização de simulações de situações de evacuação de multidões. São apresentados também alguns exemplos, aplicações desta modelagem, capazes de auxiliar arquitetos e engenheiros na busca por soluções em projetos de grandes instalações.

## **Abstract**

Steinberg, José Gustavo. Modelling to simulate crowd evacuation situations. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 90 pages. Master in Science (MSc).

Even the most optimistic prognostics show an incredible populational growth for the next decades. As demographic rates grow, people usually see themselves in queuing situations and crowd problems. The following research seeks to analyze movements, tendencies, and flowing velocities of human crowds in jam situations. Situations of panic runaways, always full of complex variables, will be reduced to prototypes that in its essence represent reality. The results from the research will be useful in many ordinary activities, such as in cinema, theaters, and convention centres projects. In this case the focus is in the improvement of comfort standards for pedestrians, reducing their exposal time to stressful situations.

Many researches have already been done in this area, and the models have improved a lot as they introduced psychological variables as main tools to predict human behavior. Humans rarely behave predictably as a fluid.

This research goal is the modeling of escape situations, and the mechanical and psychological of collective behavior. To do so, a bibliographic research was made, to discover mechanical and psychological variables that could influence the escape process. The analyses of this information defined which of the variables were useless, or how to alternate those aiming reduced escape times, panic levels in the crowd and accidents.

As a final result a model was developed. The model allows simulating crowds in panic during their escape process. Some examples are also shown, applications of the model are able to help architects and engineers in the search of project solutions for facilities.

# **1 Introdução**

## **1.1 Motivação e Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo que permite a realização de simulações de situações de evacuação de multidões. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo computacional que apresenta baixa complexidade ao usuário. Uma das metas do projeto foi promover uma interface amigável, já que muitas vezes teremos um profissional leigo em dinâmica de vivenciando a simulação. O programa deverá ter visual agradável e conter informações úteis e claras para facilitar a entrada de dados. Fazer o programa em si, com toda a sua complexidade computacional, não é o foco do trabalho, mas sim o estabelecimento de premissas a partir de dados de entrada, estruturação dos algoritmos e finalmente a modelagem de situações reais. O desenvolvimento do software não será objeto da pesquisa, e será desenvolvido posteriormente, uma vez que envolve outros especialistas na área computacional e necessita aporte de recursos para sua realização.

O programa recebe informações como tipo de instalação (cinema, teatro, etc...), nível de pânico das pessoas, dimensões físicas da instalação, numero de saídas e entradas, etc... Como saída ele fornece, entre outras coisas, velocidade de

escoamento, tempo até escoamento total, comportamento durante o escoamento, tendências de desuniformidade.

O debate em torno de dinâmica de multidões, e mais especificamente este trabalho, tem como objetivo prover maior segurança e conforto para usuários de sistemas de concentração de massa. Procura-se um aprimoramento dos níveis de serviço de instalações, não só para evitar acidentes, mas para cativar o cliente minimizando seu tempo de exposição a situações de desconforto. Na maioria dos casos a aplicabilidade desta pesquisa se dará na indústria do entretenimento. O interesse em cativar o cliente evitando expô-lo a situações desagradáveis, vinculado ao baixo custo da implantação de algumas medidas comprovadamente eficientes na garantia do fluxo de pedestres, levará a um pronto crescimento do setor nos próximos anos. Vale lembrar que a humanidade entra agora na era da experiência. Hoje em dia, no Brasil, 60% do PIB (Produto Interno Bruto) provêm de atividades vinculadas ao setor de serviços.

## **1.2 Identificação do problema**

O estudo da dinâmica de multidões é, antes de tudo, um estudo de transporte. Transporte de pedestres em baixíssimas velocidades, sobre condições psicológicas e ambientais especiais. Ele se encaixa perfeitamente no ambiente logístico, na medida que visa suprir uma demanda de espaço físico que ocorre num determinado instante de tempo. A palavra logística vem do verbo francês *loger*, que significa abastecer.

A discussão também é muito apropriada no ambiente logístico do setor de serviços, pois contempla o bem estar dos usuários de instalações, que podem ser tanto no setor de entretenimento, como hoteleiro, como hospitalar.

Pode-se observar, por exemplo, que nas figuras 1.1 e 1.2 as mesmas instalações físicas são solicitadas de maneira diferente no tempo. Ou seja, existe um pico de demanda num certo instante que precisa ser previsto.

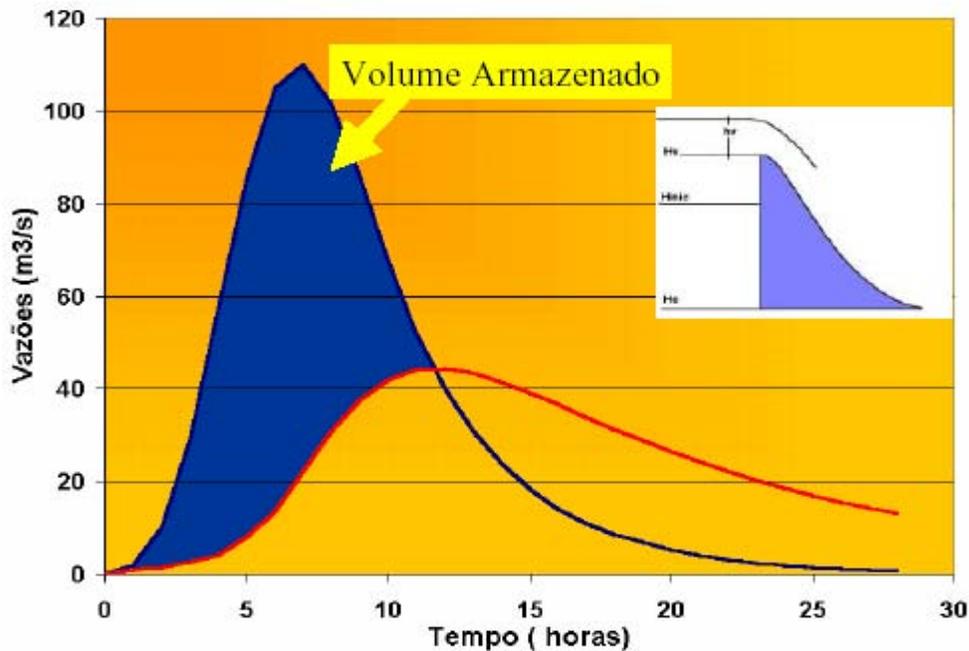


**Figura 1.1** Instalação vazia. (Wembley St. 1998)



**Figura 1.2** Instalação congestionada. (Wembley St. 1998)

Num paralelo que será mencionado algumas vezes neste estudo, o gráfico 1.1 mostra como os engenheiros lidam com os picos de precipitação das águas das chuvas através de reservatórios que amenizam o pico e regularizam a vazão de saída. Inicialmente, a vazão (linha azul) ultrapassa níveis toleráveis e pode provocar inundações por não encontrar infra-estrutura que a suporte. Após o amortecimento da cheia, a vazão (linha vermelha) perde o pico e tem seu escoamento regularizado. Olhando para o gráfico, por analogia, suponha que ele exprime as condições de evacuação de um cinema só consiga evacuar com conforto 60 pessoas a cada cinco minutos.



**Gráfico 1.1:** Extraído das notas de aula da disciplina de graduação “Hidrologia Aplicada” (PHD2307) da Escola Politécnica da USP. Regularização de vazão pluvial através de barramento.

A idéia de regularizar a vazão de saída esta presente na maioria dos estudos de evacuação, seja na teoria de filas ou na hidrologia. Pode-se explicá-la

matematicamente através da equação de tempo de espera em fila (**Wq**) vinda da teoria de filas. A equação, extraída das notas de aula da disciplina de graduação “Economia e Planejamento de Sistemas de Transportes” (PTR2451) da Escola Politécnica da USP é a seguinte:

$$Wq = \varphi(\rho, \lambda) * [1 + Cv^2]$$

Onde:  $\varphi(\rho, \lambda)$  é uma função da taxa de chegada e da taxa de atendimento, e  $Cv$  é um coeficiente que denota a distribuição que rege a demanda por espaço. No caso de um processo regido por uma distribuição determinística;  $Cv=0$ . Se a demanda for mais bem descrita por uma distribuição exponencial;  $Cv=1$ . Isso mostra que quanto mais se regulariza a procura por um posto de atendimento, no nosso caso uma saída num processo de evacuação, menor será o tempo de espera em fila.

Atualmente, o mundo todo vive uma revolução nos costumes e paradigmas sociais. Uma das grandes tendências é a do crescente respeito individual para com os cidadãos, principalmente quando usuários de sistemas públicos ou clientes de empresas privadas. A legislação fica cada vez mais dura, punindo severamente responsáveis por quaisquer tipos de danos aos indivíduos sejam físicos, morais, psicológicos ou financeiros. As responsabilidades civis na construção seguem os mesmos parâmetros fixados para o exercício profissional de qualquer classe. Existe a responsabilidade civil objetiva, decorrente da relação entre causa e efeito do dano e o agente causador. Quando existe essa relação direta, o agente é responsabilizado sem necessidade de se provar a culpa. A queda de um muro de contenção de uma obra sobre uma edificação vizinha é responsabilidade direta da construtora e não cabem recursos. É a construtora que deverá arcar com os reparos cabíveis. Já o setor das responsabilidades civis subjetivas é o que induz a maioria dos processos entre

engenheiros, construtoras e Ministério Público e muito provavelmente serão encaixadas aqui as negligências no dimensionamento de evacuações. Essa investigação leva à análise dos projetos e dos processos executivos da obra. Para tanto, o juiz contrata um perito que em primeira instância irá averiguar a qualidade dos projetos. As partes envolvidas também podem contratar assistentes técnicos que acompanham o trabalho do perito nomeado. Se constatados erros de cálculo e dimensionamentos, a responsabilidade do engenheiro projetista é facilmente provada.

Neste contexto, surge a preocupação de projetistas, arquitetos e engenheiros com o bom funcionamento dos mecanismos de evacuação de instalações civis quando em situações de emergência. Hoje em dia, vale muito mais a pena gastar com uma consultoria em dinâmica de multidões e adequar os padrões de grandes projetos às especificações sugeridas, que enfrentar uma série de processos milionários e carregar o peso da culpa pela perda de vidas por negligência num caso de acidente.



**Figura 1.3** Extraída do website da NBC, 2:42 p.m. Sept. 1, 2005. **NEW ORLEANS** – Milhares de moradores desesperados imploravam por ajuda conforme suas condições pioravam. Com as fortes chuvas criou-se uma situação tensa que levou a brigas, empurra-empurra e insegurança generalizada.

Para o estudo de dinâmica de multidões, existem programas que simulam situações de pânico, como o EVACSIM e o EGRESS, mas o diferencial entre eles, e a brecha para um produto inovador, está na refinação dos fatores psicológicos motivadores das movimentações humanas.

A psicologia social é um importante campo interdisciplinar dentro da sociologia, e será a base do estudo para definição dos padrões de nosso programa. Enquanto a psicologia está focada em processos que ocorrem dentro do indivíduo, a sociologia está focada em interações sociais e suas instituições. Elas aparecem juntas na psicologia social para explorar a interface entre os dois campos. A psicologia social aborda o estudo de como fatores intra-indivíduo e interações sociais influenciam e são influenciadas pelo comportamento individual. Segundo Miller (1985) “Este campo da sociologia evolui a cada dia na mesma velocidade dos chamados “eventos sociais””. Basicamente este estudo inclui:

- O impacto de um indivíduo sobre outro;
- O impacto de um grupo sobre seus membros;
- O impacto de um indivíduo sobre o grupo que pertence;
- O impacto de um grupo sobre outro.

A análise do contexto em que se encontra o indivíduo pode ser mostrada através de textos da literatura em psicologia social. Segundo LeBon (1960), “Quando

estudamos as características fundamentais de uma multidão, percebemos que ela é guiada quase que exclusivamente, por motivos inconscientes. Seus atos estão mais sobre a influência da espinha dorsal que do cérebro. A esse respeito, uma multidão se aproxima muito dos seres primitivos. As ações executadas podem ser perfeitas, mas como não são orientadas pelo cérebro, o indivíduo se comporta de acordo com o ambiente de excitação a que é submetido. Uma multidão está a mercê de fatores de excitação externos, e reflete suas incessantes variações. Ela é escrava dos impulsos que recebe. O indivíduo isolado também pode ser submetido às mesmas excitações que o homem na multidão, mas seu cérebro mostra o perigo de obedecê-las, ele se controla. Essa verdade pode ser expressa psicologicamente dizendo que o indivíduo isolado possui a capacidade de dominar seus reflexos, enquanto que uma multidão está privada desta capacidade. A variedade dos impulsos obedecidos pela multidão pode ser, dependendo das excitações que a causaram, é generoso ou cruel, heróico ou covarde, mas será sempre imperativo sobre o interesse individual, mesmo que o interesse seja de autopreservação.”

Assim, o processo de modelar o comportamento de multidões fica a cada dia mais refinado. Com a inclusão de variáveis comportamentais, foram desmascarados alguns paradigmas, que não se observavam na realidade, como o comportamento durante evacuação com duas saídas. Uma multidão não se comporta como um fluido, e tende a se aglomerar em uma delas.

O estudo do comportamento coletivo revela também uma tendência a copiar ações bem sucedidas e a seguir grupos maiores que o seu quando em altos níveis de pânico. Muitas situações a serem estudadas vão contra o senso comum, e neste aspecto esta uma das mais belas facetas do projeto em desenvolvimento.

## **2 Revisão bibliográfica**

### **2.1 Psicologia social, pânico e comportamento coletivo**

O primeiro trabalho na área de psicologia social que realmente está voltado para o estudo de multidões foi *The Crowd*, um clássico publicado por Le Bon (1960). O autor introduz, nesta obra, a idéia de consciente coletivo. Segundo Le Bon (1960), comumente a palavra multidão aparece no sentido de um agrupamento de indivíduos, de qualquer nacionalidade, profissão, ou sexo, sendo qualquer que seja o motivo que os colocou juntos. Do ponto de vista da psicologia, “multidão” assume um significado um tanto quanto diferente. Sob certas circunstâncias, e só sob estas circunstâncias, uma aglomeração de pessoas assume novas características diversas daquelas dos indivíduos que a compõe. Os desejos e sentimentos dos indivíduos tomam uma única e mesma direção, e sua consciência pessoal desaparece. Apesar de transitória, uma consciência coletiva se forma, apresentando características bem claras e definidas. O autor passa a se referir a esta multidão com consciência coletiva única como “multidão organizada”. Ela forma um único corpo, e está sujeita a lei da unidade mental das multidões.

Apesar de ter publicado seus trabalhos mais significativos na década de 50, as idéias de Quarantelli se assemelham bastante com os conceitos atuais de pânico

utilizados em modelagem. Segundo Quarantelli (1957), o termo “pânico” é utilizado normalmente tanto em discursos do dia a dia, quanto na literatura de diferentes áreas profissionais e disciplinas científicas. A justificativa para tal foco é que o conceito é amplamente utilizado na subespecialidade da sociologia chamada comportamento coletivo. Muito do trabalho empírico relevante do pesquisador foi assessorado por sociólogos estudando o comportamento humano em desastres naturais e tecnológicos. Eles entendem pânico como sendo “uma disfunção comportamental de fuga da realidade, gerada por motivo fortuito, mas envolvendo perigo eminente”. O autor procurou em sua época quebrar vários estereótipos sobre o fenômeno. Ele coloca que nem sempre pânico envolve múltiplos participantes, mas pode também ser um comportamento individual. Também evita o emprego do conceito de irracional ao fenômeno comportamental do pânico, pois alega que mesmo neste estado emocional, os participantes conseguem estruturar o raciocínio definindo objetivos e ações para alcançar metas.

Neste mesmo artigo, Quarantelli (1957) coloca que a maioria das discussões acerca do tema pode ser agrupada em duas categorias. Uma visão mais antiga ratifica o senso comum das pessoas, e coloca o pânico como um sentimento primário de medo. Isto está claramente relacionado com a origem da palavra, que vem do deus grego Pan, supostamente capaz de gerar súbito e arrebatador sentimento de medo sem nenhuma real ameaça. Para muitos autores adeptos desta linha de pensamento, ser arrebatado por tamanha sensação de medo pode levar a um comportamento irracional, apesar da essência do pânico ser uma manifestação emocional. A outra linha de pesquisa, adotada pelo autor e mais utilizada atualmente, prega que o pânico é, intrinsecamente, uma aberração comportamental. Nesta concepção, a essência do comportamento é marcada pela fuga das normas sociais aceitas, mesmo as mais fortes, como pais que abandonam seus filhos pequenos tentando se salvar durante uma situação de risco de vida. Muitas vezes implícita a esta linha de pesquisa, está o conceito de que tal comportamento aberrante só existe se houver a percepção de que existe a possibilidade de fuga. Pesquisadores de eventos empíricos pregam que, a esperança de se salvar versus uma situação sem esperanças é o que motiva o comportamento

aberrante. Pessoas que se acham totalmente presas em locais como um submarino afundando, não entram em pânico, pois não enxergam meios de se livrar da ameaça.

A teoria proposta por Smelser (1963) acerca do comportamento coletivo, traz o conceito de que as pessoas se unem a movimentos sociais radicais depois de experimentar algum grau de sofrimento. Um movimento social se presta para garantir a seus participantes que alguma coisa esta sendo feita para sufocar, de alguma maneira, um foco de sofrimento. Ele define pânico como sendo “um delírio coletivo baseado em uma crença histórica”. Se aceita esta teoria, teremos uma maior tendência a aglomerações em situações de fuga onde a maioria dos participantes já tenha vivenciado uma situação parecida em algum ponto de sua vida.

Quando lançado, o livro de Brown (1965) foi claramente uma obra de vanguarda no campo da psicologia social, trazendo a luz novas teorias. A sua maior contribuição para o estudo de fugas em pânico vem da sua explicação sobre níveis de aceitação de risco em tomadas de decisão em grupo. A base da teoria é que numa vasta gama de decisões, o risco moderado normalmente aceitável individualmente torna-se expressivo e saliente numa discussão em grupo. Ou seja, quando o grupo em fuga atinge certo numero de pessoas, a tomada de decisões passa ser mais complexa e o processo de aceitação do risco passa a ser bem mais lento e exigente.

Quando o estudo de dinâmica de multidões aborda o tema tomada de decisão, define-se o comportamento das massas como auto-organizado e emergente. Turner e Killian (1987) discutem que as similaridades de comportamento observadas em multidões são causadas por normas emergentes. A teoria de normas emergentes propõe que as multidões normalmente desenvolvem padrões únicos de comportamento, e que estas normas atípicas exercem uma poderosa influência no comportamento coletivo. A moderna gestão de empresas já reconhece a existência de sistemas Bottom-Up, ou seja, onde as regras que definem o sistema emergem dos participantes do mesmo sem a necessidade de liderança. A teoria é explicada e desenvolvida através da análise de processos e circunstâncias onde o elemento

normativo emerge e persiste no comportamento e ações coletivas gerais. Johnson (2001) coloca como algumas características básicas de sistemas emergentes:

1. Quanto maior o numero de participantes, mais bem sucedido em seus fins será o sistema.
2. Deve haver simplicidade de linguagem na comunicação interna ao sistema.
3. Encontros aleatórios devem ser encorajados.
4. Deve haver um padrão para os sinais recebidos e trocados entre os componentes.
5. A interação entre vizinhos é fundamental para a determinação de metas individuais.

No tocante a tomada de decisão, muitos autores trabalham os fatores determinantes para a agilidade do processo. Segundo Glance e Huberman (1994), a cooperação e conseqüente facilidade na tomada de decisão em situações de pânico depende do tamanho do grupo e das expectativas do individuo sobre interações futuras. Assim, teríamos maior facilidade na evacuação de ambientes onde os participantes se conhecem e esperam continuar a ter contato no futuro, como por exemplo, num edifício de escritórios ou numa escola. Em termos práticos, o atrito entre as partículas neste tipo de sistema é menor que num processo de evacuação de estádio de futebol, por exemplo.

Quando a motivação para o trabalho e performance é analisada da perspectiva da teoria de identidade social, Anderson (1961) propõe que o ponto central da análise é a relação entre identificação organizacional e a motivação de se esforçar em prol do coletivo. Uma análise teórica, bem como uma revisão de dados empíricos das relações entre identidade organizacional e performance levam a conclusão que a identidade está relacionada positivamente com a motivação para o trabalho e performance em desafios. O estudo ainda mostra que os trabalhadores se sentem mais motivados quando explicitamente alertados que a alta performance é o objetivo fundamental da organização. Ou seja, apesar do ambiente emergente, sem líder explícito, a massa se beneficia de orientação específica sobre o que se deseja dela. Deve-se deixar explícito, ou por mensagem de voz ou placas, quais são as metas em situações de evacuação, o que está acontecendo, quais atitudes são esperadas das pessoas.

## **2.2 Estudos experimentais**

No início dos anos 50, Mintz (1951) realizou uma série de estudos que culminaram em um famoso texto, publicado no *The Journal of Abnormal and Normal Social Psychology*. Nele, o autor mostra que as pessoas mudam seu comportamento de acordo com suas expectativas em relação ao comportamento dos outros, como acontece numa situação de desafio. Este experimento foi valioso, pois mostrou que o comportamento não cooperativo em situações de pânico não é resultado de uma excitação emocional violenta, como sugerido pela psicologia social e por antigos estudos sobre comportamento de massa. Pelo contrário, o caráter não adaptativo deste tipo de comportamento provém da percepção das pessoas a respeito da situação e sua expectativa do que está por vir. Com base nestas afirmações, percebe-se a importância do processo iterativo na modelagem de massas, onde constantemente os participantes

interagem entre si e mudam de opinião sobre que direção tomar e qual a velocidade individual desejada.

Algum tempo depois, outra publicação do gênero, o *Journal of Experimental Social Psychology* publicava um artigo de Kelley e Condry e Dahlke e Hill (1965), que tratava basicamente da influência do tamanho do grupo na fuga. Segundo o artigo, o tamanho do grupo que encara uma situação de crise é determinante no tempo necessário para a evacuação. Quanto maior for o grupo, mais difícil será a tomada de decisão frente à situação de perigo, decidindo por evacuar ou não. Isto ocorre, por que é mais difícil para um grupo grande adotar um novo comportamento do que para um menor. No grupo grande ocorre mais divergência de opiniões e experiências vividas sobre o que fazer naquele tipo de situação e que, de repente, deve-se fazer de novo para uma fuga bem sucedida.

Na década de 80, tivemos a publicação de alguns artigos interessantes no *Fire Journal*, um periódico voltado ao público que trabalha com prevenção a incêndios. Dois artigos chamam a atenção. Keating (1982), apresenta uma proposta que vai totalmente contra o senso comum. Ele afirma a maioria das vítimas de grandes catástrofes envolvendo fogo na verdade não entram em pânico, mas agem de forma bem altruísta. Elas ajudam os outros e são muito solícitas: Elas não entram em pânico. Certamente as histórias de companheirismo e ajuda que ouvimos dos sobreviventes do WTC ilustram a tese. Algum tempo depois, Bryan (1985), publica no periódico *Fire Journal* um artigo que resume uma literatura histórica vasta, selecionada sobre o comportamento dos usuários de sistemas em chamadas. O artigo também apresenta uma análise da influência recente do conceito de psicologia comportamental em incêndios com ênfase em resultados e modelos de evacuação. Mostrando o que realmente aconteceu em algumas situações reais, o autor compara com os resultados das modelagens existentes até então.

O assunto teve crescente interesse na década de 80, devido aos muitos acidentes em shows superlotados. Segundo Johnson (1987), “As pessoas no fundo da

multidão não conseguem ver o que está acontecendo lá na frente. Num colapso de massa, as pessoas empurram. As pessoas do fundo presumem que existe espaço e saídas suficientes, e se movem pra frente. Isso esmaga as pessoas ainda mais, mas as pessoas do fundo não percebem”. Este artigo, publicado no periódico *Social Problems* exemplifica esta e mais algumas teorias, usando o caso real do desastre no concerto do “The Who” em 1979, onde 11 pessoas foram esmagadas até a morte em Cincinnati.

A necessidade de entender o comportamento humano em situações de fogo não diminuiu no início da década de 90, e nesta época Canter (1990) lança o livro *Fires and Human Behaviour*, que reproduz estudos detalhados de uma série de acidentes. Acidentes como o do estádio de futebol de Bratford, ou da estação King’s Cross estão comentados no livro. Existe um capítulo que resume os padrões de comportamento característicos de grandes emergências, apoiado em pesquisas sobre incêndios domésticos e em edifícios públicos. Os estudos do autor no campo do comportamento humano em incêndios o levaram a periciar em diversas ocasiões e ser uma preciosa fonte de consultoria para grandes obras como o Eurotunnel.

Seguindo a linha de acidentes em estádios, Jacobs (1990) analisa o incidente do Hillsborough stadium. Em seu artigo, ele nos traz algum entendimento sobre problemas resultantes de situações de pânico em estádios. Ele não se concentra na reação das pessoas em si, mas no planejamento, plano de contenção inadequado e também na responsabilidade das autoridades sobre os desastres. Assim, podemos perceber como as pessoas detentoras de cargos de autoridade podem, na verdade, negligenciar a adequada sinalização ou até mesmo dar coordenadas inadequadas. O artigo fala do desastre do estádio de Hillsborough, na Inglaterra em 1989, onde 95 pessoas foram esmagadas até a morte e cerca de 400 ficaram feridas. O acidente envolveu um grande número de pessoas que ficaram presas com muito pouca ou nenhuma orientação sobre rotas alternativas de fuga. Segundo Elliot (1993) muitos dos fatores dos desastres envolvendo multidões, têm causas mais profundas que as falhas de projeto e dimensionamento. Ele propõe que não basta uma otimização do espaço físico, nem ambientes bem sinalizados. É discutido aqui que isto é o efeito de uma crise

num nível administrativo superior da indústria do futebol, arraigada em fraca e inadequada administração de estádios de futebol e das massas que os utilizam. Deve-se notar, no entanto, que não se trata de um fenômeno exclusivamente inglês. As tragédias na Cidade do México (1985) e Bastia (1992) indicam que os resultados desta pesquisa podem ser aplicados a todos os envolvidos em administração de eventos esportivos.

Na linha dos experimentos recentes envolvendo situações de pânico, existem excelentes estudos, como o realizado por um grupo internacional de pesquisadores e comandado pela Universidade de Berkeley. Saloma e Perez e Tapang e Lim e Palmes (2003) comandaram investigações numéricas sobre fugas em situações de pânico de pedestres confinados, e revelaram interessantes formatos dinâmicos, como um arco de pessoas ao redor da saída, reações inesperadas abruptas de pedestres internos ao sistema, filas auto organizadas, e comportamento em livre escala. Entretanto, estas previsões permanecem não comprovadas, uma vez que é muito difícil realizar simulações realistas com voluntários. Para ratos escapando de uma piscina, os autores propõem que para uma taxa crítica o comportamento se assemelha ao proposto. Os ratos escapam por uma saída em grupos de tamanhos diferentes que obedecem a uma lei de distribuição exponencial e truncada dependendo do tamanho da saída. Fora da faixa de amostragem, as características observadas fogem dos padrões esperados. Sistemas reais são normalmente sujeitos a inevitáveis restrições provenientes de taxas de ocupação das instalações, exaustão dos pedestres, e não rigidez dos corpos dos pedestres. Os efeitos destas restrições na dinâmica de fuga real também são estudados no artigo.

Mais recentemente, Johnson (1988) realizou estudos intensos sobre pessoas em situações que potencialmente provocariam pânico, como o incêndio em uma casa noturna e a correria em um concerto de rock, onde morreram 160 e 11 pessoas respectivamente. As conclusões são surpreendentes. A grande maioria das pessoas envolvidas não apresentou comportamento instintivo animal, ao contrário do que a maioria dos autores em pânico sugeririam. Ao contrário da competição feroz, a ordem

social não se alterou, pois tivemos uma predominância de comportamento cooperativo ao invés de egoísta. Contrariando as noções de irracionalidade, existiram muitas evidências de respostas racionais frente à situação de crise. Apesar de experimentarem fortes emoções, as pessoas não foram tomadas por comportamento desajustado. Estes argumentos reforçam o crescente ponto de vista, compartilhado por muitos pesquisadores que estudam situações potenciais de pânico, de que predominam comportamentos pró-sociais ao invés de anti-sociais em tais contextos.

### **2.3 Mecânica do processo e modelagem**

A teoria de autômatos celulares (AC) ajuda muito a modelagem de sistemas onde existe tomada de decisão durante o processo. Ela propõe que as células do sistema devem ser estudadas independentemente e suas vizinhanças e como elas atuam sobre as movimentações da célula consideradas. Durante o processo de evacuação, as pessoas tendem, com certo intervalo de tempo, a mudar de opinião sobre direção, velocidade desejada, e eventuais paradas. Segundo Boyce (1996), o tempo de locomoção entre o lugar onde as informações do ambiente são recebidas e o destino depende da localização do motorista no instante da decisão. Assim, a habilidade do motorista em fazer suas decisões sobre rotas deve ser tratada explicitamente quando a estabilidade de fluxo é investigada. Para estudar a escolha de rota, devemos modelar as decisões sobre rota do motorista a cada nó do modelo. Para cada nó, devemos rodar o programa novamente e definir para todos os usuários do sistema quais seus novos desejos.

Toda base do processo de modelagem será feita com a teoria clássica de escoamento de fluidos. Para respeitar as peculiaridades psicológicas do escoamento de pessoas, colocaremos variáveis e iterações comportamentais sobre o pano de fundo

da mecânica dos fluidos. Fox e MacDonald (1999), colocam o escoamento de pessoas na classe dos escoamentos compressíveis barotrópicos (que independem da temperatura e dependem somente da pressão) quando diz que: “Escoamentos em que a variação de massa específica não é desprezível são chamados compressíveis”. Dependendo da quantidade de pessoas por  $m^2$  durante um processo de evacuação, observa-se uma variação na pressão interna, e conseqüente variação na “densidade” de pessoas por  $m^2$ . O autor também classifica o fenômeno como um escoamento em regime turbulento quando diz que: “Os regimes de escoamentos viscosos são classificados em laminar e turbulento, tendo por base a sua estrutura. No regime laminar, a estrutura é caracterizada pelo movimento suave em laminas ou camadas. A estrutura do escoamento em regime turbulento é caracterizada por movimentos tridimensionais aleatórios de partículas fluidas, em adição ao movimento médio. No escoamento laminar, não há mistura macroscópica de camadas adjacentes do fluido. Um filamento delgado de corante injetado num escoamento em regime laminar parece como uma linha única. Por outro lado, se injetado num escoamento em regime turbulento, se dispersa rapidamente por todo campo de escoamento”. Quando o escoamento for modelado em computador ele seguirá as equações do escoamento compressível em regime turbulento, que inclusive se assemelha bastante com o escoamento de um gás.



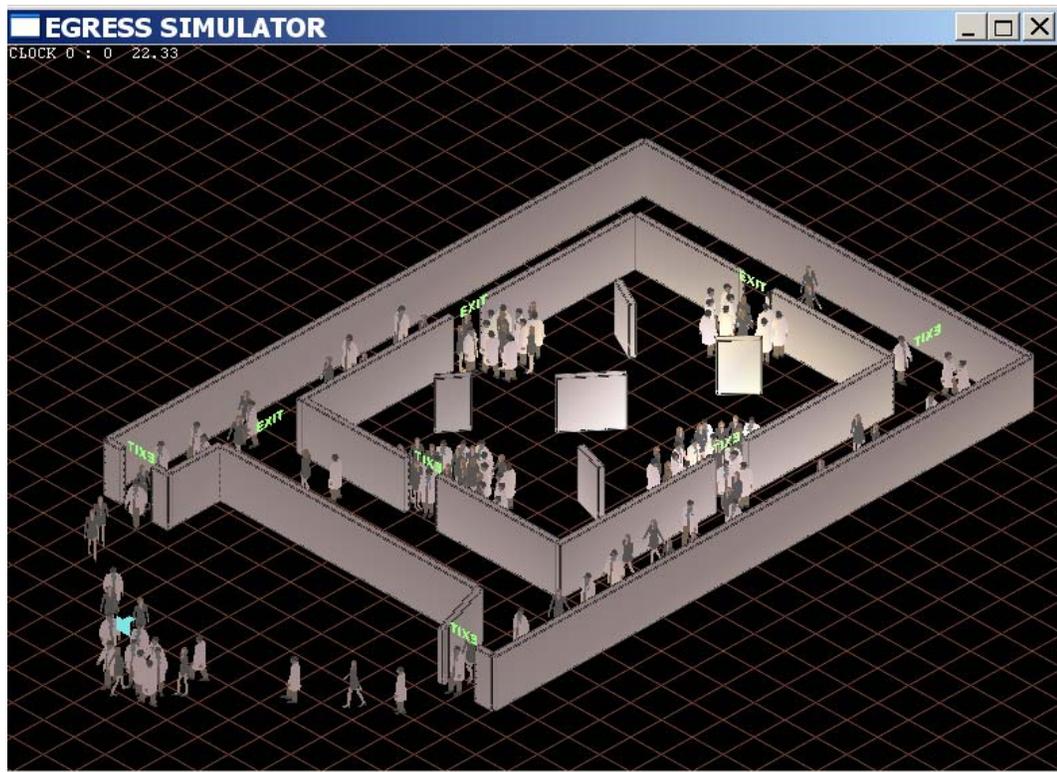
**Figura 2.1** Extraída de Helbing e Buzna (2003). Como num direcionador de fluxo, muito usado na hidráulica, as colunas da estação de metro funcionam como paletas que separam as partículas com direções opostas.

Fox e MacDonald (1999), ainda dizem que: "Nos casos de escoamentos turbulentos, as soluções analíticas não são possíveis, e devemos respaldar-nos essencialmente em teorias semi-empíricas ou em dados experimentais", reforçando a dedicação dos pesquisadores em dinâmica de multidão em realizar experiências práticas de situações de fuga.

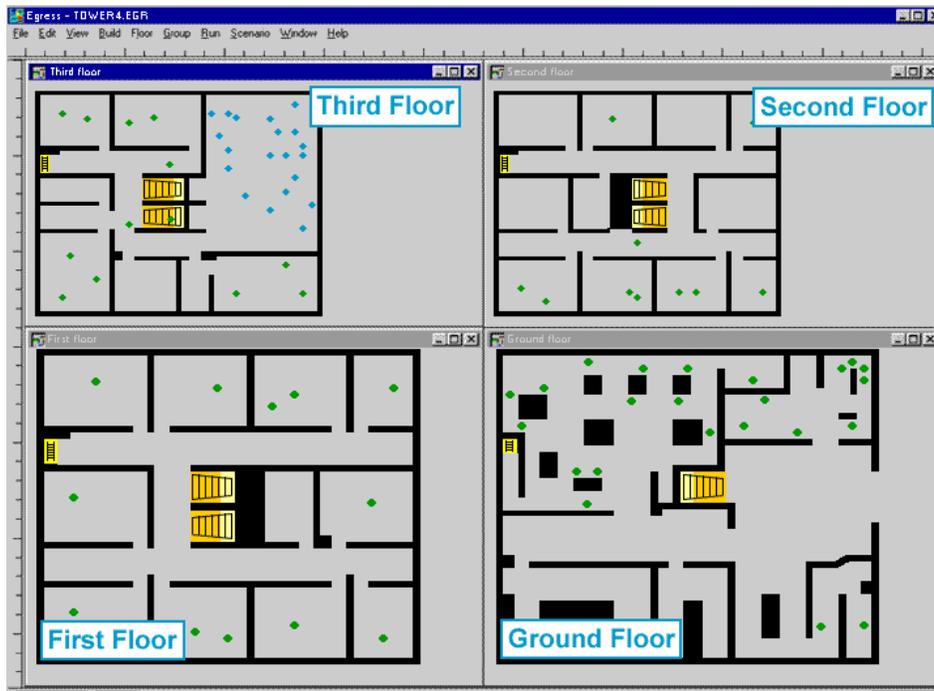
Existem atualmente alguns programas no mercado que simulam situações de evacuação com bastante fidelidade ao fenômeno. O programa de computador "EVACSIM" de Drager (1992), é um deles. As simulações são baseadas em dados de performance humana em emergências, inclusive abordando variáveis psicológicas. O programa foi desenvolvido baseado na experiência e em dados reais obtidos da evacuação de vinte e quatro edifícios, a maioria deles instalações offshore.

No programa de computador "EGRESS" de Ketchell (1993), as pessoas são modeladas como indivíduos numa grelha. A técnica de simulação está baseada no uso de células móveis, os já mencionados autômatos celulares (AC). A cada intervalo de

tempo as pessoas se movem entre as células baseadas num jogo de pesos. Os pesos requeridos são calibrados por informações constantemente retroalimentadas sobre velocidade, fluxo e densidade, para que os dados experimentais possam ser adequadamente rerepresentados onde serão válidos.



**Figura 2.2** Extraído de *Ketchell (1993)*. Interface do programa com o usuário. Esta é uma tela que demonstra os resultados simulados.



**Figura 2.3** Extraído de *Ketchell (1993)*. Interface do programa com o usuário. Esta é uma tela que demonstra o processo de simulação em tempo real.

As contribuições de Smith (1993) em seu estudo sobre segurança em tumultos estão nas informações e suporte para gerenciar mais eficientemente e reconhecer sítios de perigo potencial. Os estudos focalizam lugares onde um grande número de pessoas coabita, como estações, shoppings e concertos, providenciando informações detalhadas para o projeto de instalações seguras. Uma especial atenção é dada, em como o projeto da estruturas deve se adaptar ao comportamento dos usuários e como isso vai promover a sua segurança. A grande colaboração do estudo esta no fato de explorar que este tipo de engenharia requer conhecimento não somente dos carregamentos e pressões internas geradas numa multidão, mas também de como o projeto pode afetar o movimento dessa multidão, como ela pode ser controlada, influenciada e modelada.

Em outra interessante pesquisa, Still (2000) examina a natureza da multidão e sua dinâmica com referências específicas a assuntos de segurança. Seu modelo foi desenvolvido para simular a multidão como um fenômeno emergente utilizando dados de células móveis, ou seja, também sobre o enfoque de autômatos celulares. Eles modelam os elementos deste modelo baseados nas interações de quatro parâmetros: Objetivo, mobilidade, restrição e assimilação. O modelo trata cada entidade como um indivíduo e pode simular como as pessoas lêem e reagem ao ambiente em várias condições. Isso permite ao usuário estudar uma vasta gama de processos envolvendo dinâmica de multidões em diferentes geometrias, e evidencia as interações da massa com o ambiente que a cerca. Os autores demonstram que o modelo funciona para acessar os limites de segurança durante evacuações normais e em emergências.

O estudo de dinâmica de multidões tem se mostrado nos últimos anos muito rico em aplicações. A análise de processos de evacuação de passageiros a bordo de navios tem atraído crescente interesse. Segundo Meyer e König (2000), o tamanho de navios e aeronaves tem sido limitado não pelos avanços tecnológicos, mas pelo tempo seguro de evacuação que estes modais devem proporcionar. A maioria das abordagens utiliza modelos antigos, ou desenvolvidos para aplicações em outras áreas como simulações de movimentos de pedestres. As duas maiores dificuldades intrínsecas ao problema são: Movimentos de passageiros em duas dimensões, e a complexidade psicológica e influências sociais. Também neste artigo de Meyer e König (2000) o modelo simples de descrição do movimento de massas é apresentado e a sua implementação num software de simulação colocada. Ele, como a maioria dos autores acerca do tema, coloca que a validade das suposições e o escopo de aplicações devem ser escrutinizados por comparação com dados empíricos de evacuações reais, pois se sabe que este tipo de escoamento tem sua base em teorias empíricas.

A dissertação parte de algumas premissas, citadas em clássicos do trabalho em dinâmica de multidões, coletadas em fontes de renome na área. Nos trabalhos de Helbing e Molnár (1995), por exemplo, é comum encontrarmos a seguinte afirmação: “Em situações de fuga em pânico existem algumas regras de comportamento padrão:

1. As pessoas se movimentam, ou tentam se movimentar, mais rápido que de costume.
2. Os indivíduos começam a se empurrar tornando as interações entre pessoas reais.
3. A movimentação e, em especial, a passagem por gargalos torna-se descordenada.
4. Nas saídas, pisoteamento e empurra-empurra são observados.
5. Nascem os engarrafamentos.
6. As interações físicas na massa engarrafada crescem, levando a pressões perigosas.
7. A fuga é atrapalhada por pessoas caídas que funcionam como obstáculos.
8. As pessoas apresentam uma tendência a fazer o que os outros fazem.
9. Saídas alternativas passam normalmente despercebidas ou são usadas ineficientemente.”

Helbing e Molnár (1995) sugerem também que os movimentos de pedestres podem ser descritos como se eles estivessem sujeitos a “forças sociais”. Essas forças

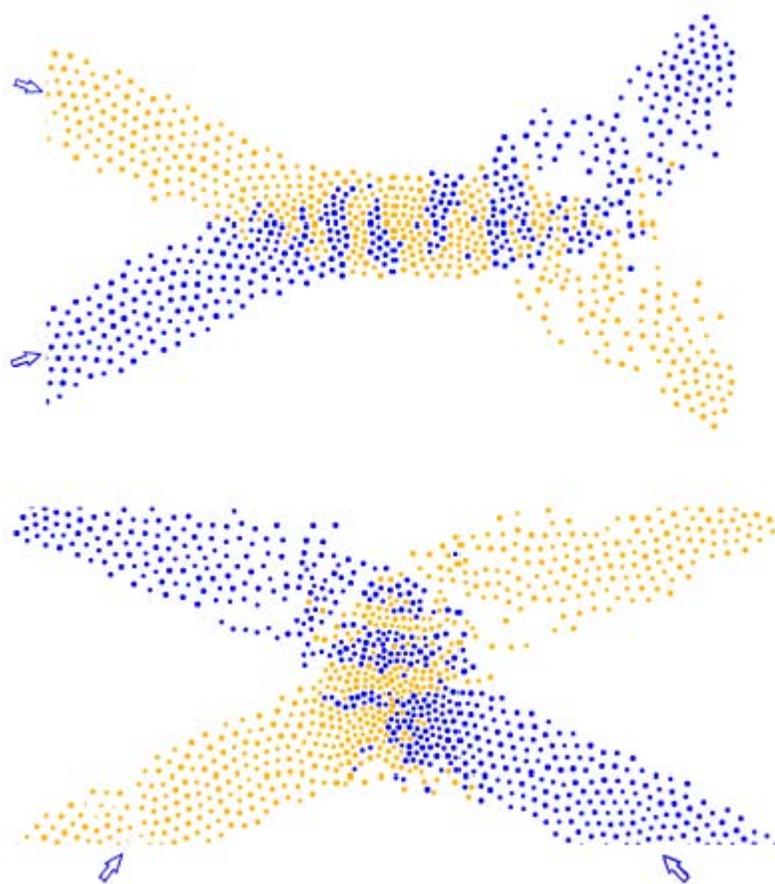
não são exercidas diretamente pelo ambiente em que o pedestre está inserido, mas são medidas pelas motivações internas dos indivíduos para realizar certos movimentos. Este conceito de força é discutido mais detalhadamente no texto e também pode ser aplicado na descrição de outros comportamentos. No modelo apresentado de comportamento de pedestres, várias variáveis de força são essenciais. Temos um termo descrevendo a rapidez em atingir a velocidade desejada, um outro descrevendo que os pedestres mantêm uma certa distância entre si, outro modelando o efeito de atratividade. As equações resultantes de movimento não linear são simuladas por computador. Essas simulações de interações entre multidões de pedestres mostram que o modelo de força social é capaz de descrever a auto-organização de vários efeitos coletivos observados no comportamento de pedestres de modo muito realista.

Um modelo simples de dinâmica de partículas, e aplicação prática da teoria dos autômatos celulares, é introduzido por Vicsek e Czirók (1995) com o objetivo de investigar o aparecimento de movimento ordenado em sistemas de partículas com interações biológicas induzidas. No modelo proposto, as partículas se movem numa velocidade absoluta constante, e a cada intervalo de tempo assumem a direção média das partículas na sua vizinhança, com alguma perturbação adicionada. Os autores apresentam evidências numéricas de que o modelo resulta em uma fase de transição cinética que varia do “não transporte” até uma rede finita de transporte através de uma simetria espontânea.

Recentes avanços no campo das simulações tornaram possível o estudo de padrões realistas de tráfego e permitiram a experimentação de teorias baseadas no comportamento dos motoristas. Helbing e Huberman (1998) simularam estes tipos de situação, e outros vários fatores empíricos relacionados ao fluxo de tráfego que são usados para projetar controles de tráfego que maximizam a entrada de veículos em estradas com trânsito pesado. Além do valor econômico intrínseco, o tráfego de veículos é de especial interesse por colocar a luz alguns fenômenos sociais onde diversos indivíduos competitivamente tentam maximizar suas próprias ações sobre certas restrições de ambiente. Nesse estudo, os autores apresentam os resultados de

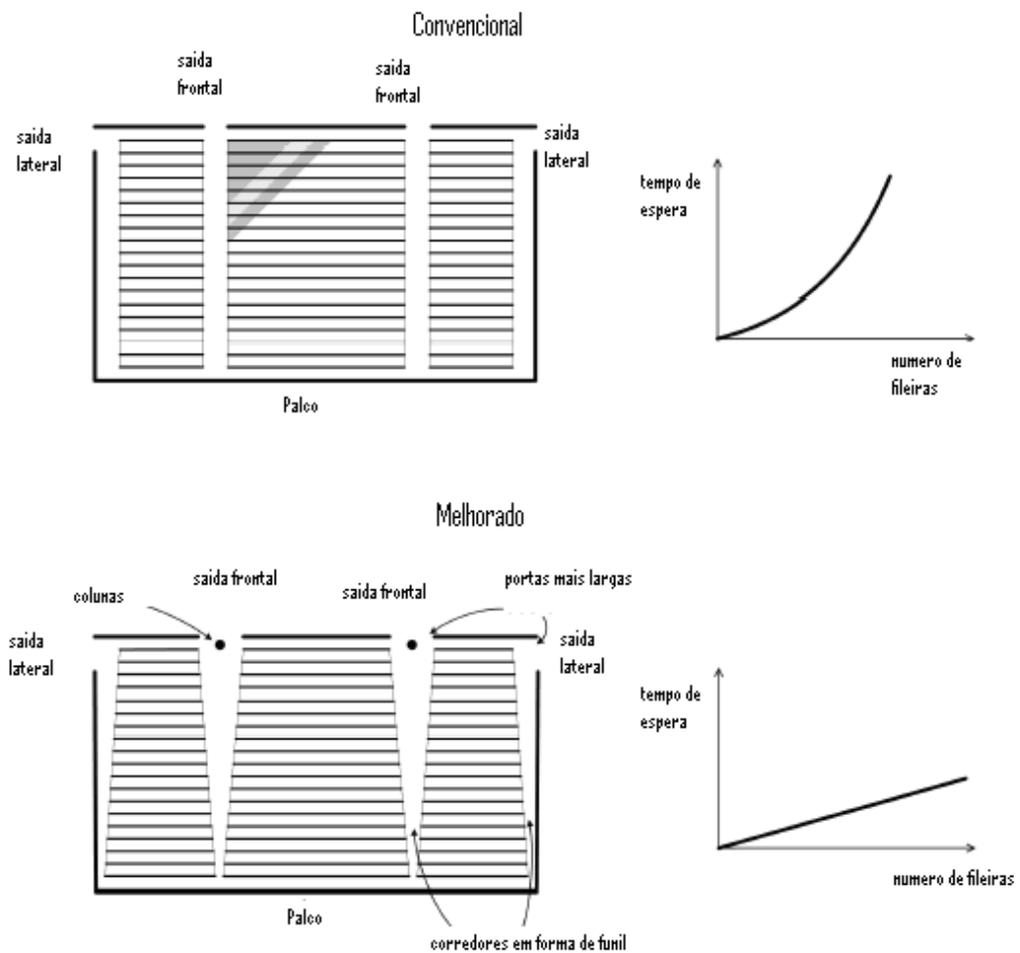
simulações que apontam para a existência de estados cooperativos e coerentes nascidos de interações competitivas que levam a um novo fenômeno no tráfego heterogêneo existente nas estradas. Na proporção que a densidade de veículos cresce, suas interações geram uma transição para um estado altamente correlacionado no qual todos os veículos praticamente se movem na mesma velocidade, análogo a locomoção de um bloco sólido. Esse estado está associado com a reduzida taxa de mudança de faixa, inexistência de pressão interna, e um fluxo alto, porém estável e seguro. Esses fenômenos desaparecem assim que a densidade veicular supera um valor crítico. Os efeitos foram observados na prática em recentes avaliações sobre dados do tráfego holandês.

Em Helbing e Buzna (2003), os autores apresentam resultados empíricos sobre fluxo de pedestres em situações normais e de pânico, obtidos de gravações em vídeo. O estudo revela que as condições geométricas de contorno não só são importantes para a capacidade das instalações, como para a distribuição dos pedestres nos intervalos de tempo, revelando sinais de auto-organização. Por exemplo, quando dois fluxos de pedestres se interceptam, observa-se a divisão da corrente em uma série de filas únicas em paralelo.



**Figura 2.4** Extraído de Helbing e Buzna (2003). Simulação de duas correntes de pedestres que concorrem em certo instante de suas trajetórias.

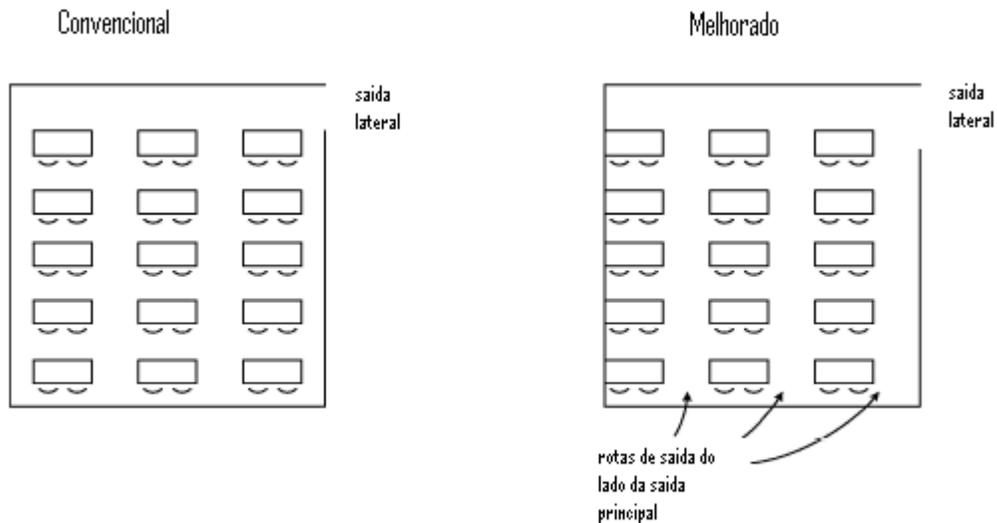
Estas proposições poderão ser usadas para melhorar o design para instalações para pedestres e rotas de saída. Por exemplo, eles propõem o uso de obstáculos para estabilizar os padrões de fluxos e fazê-los mais fluentes. Atualmente as instalações de cinemas e teatros já utilizam este recurso, colocando corrimãos no meio de seus corredores. Mais adiante, eles sugerem o aumento de diâmetros de rotas de fuga de estádios, teatros, e bibliotecas para evitar tempos de espera desproporcionais para pessoas no fundo e ondas de choques devidas à impaciência.



**Figura 2.5** Extraído de Helbing e Buzna (2003). A figura mostra uma instalação de cinema projetada convencionalmente e uma melhorada. Ao lado de cada proposta arquitetônica estão expressos os tempos de espera em função da localização do indivíduo. Observa-se uma queda drástica no tempo de espera de indivíduos situados nas fileiras do fundo.

Os autores deste estudo ainda colocam a possibilidade de geometrias em zigue-zague e colunas para reduzir a pressão interna em multidões em pânico. As soluções de design propostas geram expectativa de aumento de segurança em

instalações civis em geral, como estações de trens, aeroportos, estádios, teatros, edifícios públicos, navios ou qualquer evento de massa.



**Figura 2.6** Extraído de Helbing e Buzna (2003). Proposta de novo Layout para salas de aulas tendo em vista a rápida evacuação dos alunos em casos de emergência.

Como as pessoas reagem em situações de fogo já foi estudado em oportunidades reais e com experimentos também. Benthorn (1996) propõe na primeira parte de seu estudo “Fire alarm in a public building: How do people evaluate information and choose evacuation exit?”, que a escolha de saída foi examinada com relação a distancia até a saída, e saída de emergência fechada ou aberta. Ele propõe, com exemplos, que as pessoas preferem rotas conhecidas, ou pelo menos se dirigem para locais onde estão acostumadas a encontrar saídas. Segundo o autor, “Durante o incêndio no MGM Grand Hotel em Las Vegas 1980, a maioria dos hospedes (nos andares superiores ao local do fogo) usaram as escadas do prédio para evacuar. O edifício foi construído como um grande T, com escadas de emergência localizadas nas

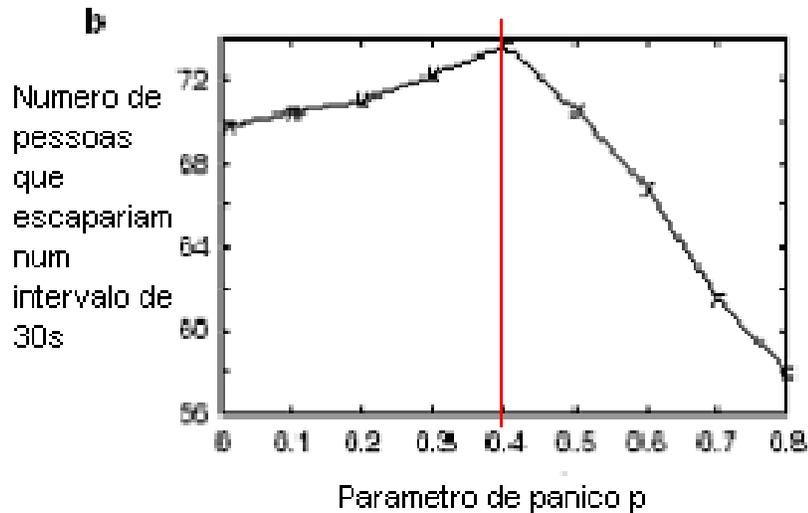
extremidades do T, e a maior delas no centro do T onde os dois prédios principais se encontravam. Um pouco mais de 10% dos hóspedes utilizaram a escada central, enquanto a grande maioria preferiu as escadas no final dos corredores. Isto pode ser explicado pelo fato da maioria dos hotéis da região apresentarem escadas de emergência nas extremidades de seus corredores. A maioria das pessoas então procurou esta direção”. A segunda parte do texto trata de como as pessoas se comportam em situações em que existe um pequeno foco de fogo na rota de saída. A terceira parte trata de certos aspectos ligados à sinalização e comunicação durante a fuga. O estudo mostra que as pessoas preferem saídas ordinárias e conhecidas, mesmo que a distância seja maior do que a da saída de emergência. Entretanto, se a saída de emergência estiver aberta, e as pessoas puderem enxergar lá fora, a atratividade da saída de emergência se torna grande, e ela passa a ser escolhida.

Ainda segundo Benthorn (1996), a utilização de alarmes sonoros como sinal de emergência, normalmente causa confusão, sendo confundido com telefone ou sinal escolar, e leva a demora para a assimilação da situação de perigo. Por outro lado, uma mensagem falada passa a mensagem de evacuação e comportamento desejado com maior clareza. O texto descreve vários procedimentos simples para aumentar a rapidez de percepção e acuidade de resposta dos usuários do sistema.

Vicsek (2001), em um pequeno texto publicado na Nature tenta explicar e exemplificar situações para a aplicação da teoria de comportamento coletivo. “A principal característica do comportamento coletivo está na perda da ação individual, que é dominada pela influência dos vizinhos. A unidade se comporta diferentemente do que faria se estivesse sozinha; e este tipo de sistema mostra um interessante fenômeno de organização, pois as unidades mudam seu comportamento simultaneamente para um padrão comum. Limalha de ferro pode ser um bom exemplo. Este material pode sofrer espontânea magnetização, pois é composto por pequenos pedaços de ferro. A altas temperaturas, estes pequenos pedaços não conseguem se alinhar, e a magnetização resultante é zero. Mas, a uma temperatura crítica, a tendência a adotar uma direção comum supera os efeitos de flutuações. Assim, a

maioria dos ferrinhos, se ajudando de uma maneira cooperativa, aponta em uma mesma direção, e a magnetização de repente aparece. Da mesma forma, um grupo de pombas se alimentando orientadas aleatoriamente, se ordenam num bloco único e uniforme quando voam em retirada após algum distúrbio ou ameaça”.

A linha de estudo que modela o comportamento de pedestres tem como um grande expoente os trabalhos de Helbing e Vicsek e Farkas. Em um artigo na revista NATURE, Helbing e Vicsek e Farkas (2000) apresentam um modelo de comportamento de pedestres para investigar os mecanismos e pré-condições para o pânico e engarrafamentos pelo movimento desordenado das multidões. As simulações sugerem métodos práticos para a prevenção de pressões internas perigosas. O texto traz também uma estratégia ótima para o problema da fuga de uma sala enfumaçada, envolvendo uma mistura de comportamento individualista e instinto coletivo. Existem neste artigo importantes contribuições para a caracterização do pânico como fator fundamental num processo de fuga. Aqui o autor introduz o conceito de parâmetro de pânico, colocando-o numa escala e classificando atitudes típicas a cada nível da escala. O comportamento coletivo é intimamente relacionado ao estado de pânico da multidão, o que parece bem consistente. Para ilustrar o fenômeno, o gráfico 2.1, apresentado no artigo, segue abaixo:



**Gráfico 2.1** Extraído de *Helbing e Vicsek e Farkas (2000)*. Número de pessoas que escapariam numa situação de fuga em pânico em função do parâmetro de pânico da multidão.

Vale a pena observar que, mais uma vez contra o senso comum, é colocado que um nível intermediário de pânico, suficiente para deixar a multidão em estado de alerta, seria o ideal neste tipo de situação.

Como o fator de pânico “p” está intimamente relacionado a pressão interna do sistema, ou seja, a pressão que os indivíduos exercem sobre seus vizinhos, e a pressão interna está intimamente ligada a lotação da instalação, percebemos que maior é o grau de pânico quanto mais lotada está a instalação.

Para instalações com “p” menor ou igual a 0,4, ou seja, relativamente vazias, será adotada uma abordagem microscópica do sistema, com o uso do algoritmo proposto. Por outro lado, quando a pressão interna for tão grande que eleve o parâmetro de pânico para maior que 0,4 será adotada uma abordagem análoga a da mecânica dos fluidos. As pessoas perdem o poder de decisão e se vêem levadas pela vontade da massa, o consciente coletivo.

## **3 Metodologia**

### **3.1 Desenvolvimento do trabalho**

Os estudos na área de psicologia social foram realizados pelo pesquisador junto à extensa bibliografia apresentada. Foram considerados dados a respeito de comportamento coletivo e individual de indivíduos submetidos a situações de pânico. Esta parte do estudo teve uma metodologia bem clássica, que remeteu o autor à pesquisa na literatura existente e busca por padrões aplicáveis as situações exigidas em dinâmica de multidões.

Um excelente exemplo é o comportamento dos freqüentadores de cinemas, geralmente casais, que dificilmente se movimentam sozinhos e estão sempre andando aos pares, dificultando o escoamento em situações de incêndio.

Estiveram também entre os assuntos abordados, princípios da mecânica dos fluidos e transporte de sedimentos. Estas áreas da hidráulica clássica desempenharam papel de suporte intelectual para que o autor compreendesse as diferenças entre o comportamento humano quando submetido a condições psicológicas desfavoráveis e partículas sólidas imersas num fluido. Na mesma linha de raciocínio, seguiu o estudo

de engenharia de tráfego. Muitos dos fenômenos observados em engarrafamentos também podem ser observados em aglomerações humanas, trazendo o cuidado de observar que as pressões internas, provenientes do contato entre partículas, são sempre zero em congestionamentos de veículos. Pode-se observar como os estudos em engenharia de tráfego são aplicáveis no texto de Gartner, Messer e Rathi: “Como o tráfego de veículos envolve fluxos, concentrações e velocidades, existe uma tendência natural de tentar descrever esse tráfego como um comportamento fluido. Os modelos existentes reconhecem que o tráfego é composto de partículas discretas e suas interações se assemelham a dos fluidos. Entretanto, eles preferem focar no comportamento estatístico geral da corrente de tráfego. Na analogia com o fluxo fluido, a corrente de tráfego é tratada como um fluido unidimensional compressível. Isso leva a duas premissas básicas:

1. O fluxo de tráfego é conservado e, portanto, a equação da continuidade pode ser aplicada.
2. Existe uma relação direta entre a velocidade e densidade, ou entre fluxo e densidade.

O modelo de continuidade simples é composto pela equação de conservação e pela equação de estado. Se essas equações são resolvidas com dados básicos do fluxo de tráfego, obtém-se velocidade, fluxo e densidade a qualquer momento e em qualquer ponto da rodovia. Sabendo dessas variáveis básicas de tráfego, têm-se informações sobre o estado do sistema de tráfego e pode-se presumir medidas de eficiência, como atrasos, paradas, tempo de viagem e outras que podem ajudar a avaliar o desempenho do sistema como um todo”.

A base para o processo de interação com o usuário da modelagem é a de fazer as perguntas certas, simples de serem respondidas, e que forneçam dados consistentes. A situação que acaba de ser citada pode nos fornecer um bom exemplo. Se, quando perguntado sobre o tipo de instalação que deseja projetar, o usuário cita um cinema, o algoritmo deve prever uma maioria de casais. Se ele cita um estádio de futebol, ele deve prever uma maioria de solteiros, com uma maior medida média de diâmetro corpóreo, e assim por diante.

A parte de programação não será alvo de pesquisa, pois o foco são os processos de modelagem e meios de traduzir o mais realisticamente possível as situações mais comuns num processo de evacuação. A calibração deve ser um processo de constante retroalimentação de dados, pois os indivíduos no sistema alternam freqüentemente sua direção, velocidade, e percepção do que acontece a sua volta.

Segundo Still (2000), “Existem muitas maneiras de criar um objeto em movimento numa simulação de computador. A dinâmica baseada nas leis da física pode ser usada e codificada para um objeto qualquer. Contudo, isto não é apropriado para a modelagem de pessoas, pois as pessoas não se comportam como bolas de bilhar. Nossa simulação deve capturar os elementos essenciais de como as pessoas lêem e reagem ao ambiente. Diferentemente das bolas de bilhar, as pessoas podem escolher sua própria direção, e nosso modelo deve refletir estas escolhas comportamentais.

Nossa simulação deve ser capaz de modelar e visualizar eventos não-lineares. O sistema também deve permitir modificações rápidas de todos os parâmetros, como comportamento dinâmico, variáveis randômicas e início de eventos. Os elementos que fazem parte do sistema devem ser programados com critérios de tomada de decisão; os indivíduos devem se adaptar ao ambiente utilizando regras simples.”

Para finalizar a etapa de pesquisas e embasamento teórico, foi feita uma consulta minuciosa a artigos e publicações abordando o tema. Daí se extraiu uma

quantidade grande de informações necessárias para o desenvolvimento de um trabalho sólido. Existem muitas publicações acerca do tema, e também muitos programas de computador sendo comercializados. Infelizmente, nenhum feito por brasileiros ou sequer adaptado a nossa realidade. Este trabalho coletou informações e posições diversas sobre o assunto, e, a partir daí, tece considerações que observam as condições brasileiras.



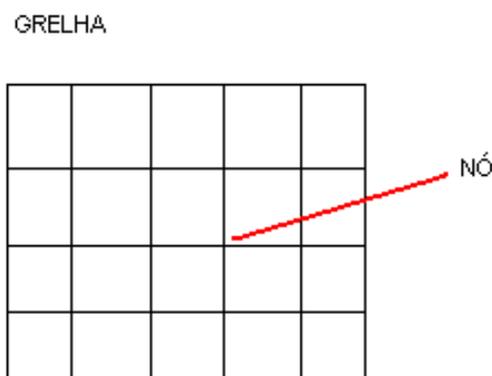
**Figura 3.1** Extraída de Helbing e Buzna (2003). Torcedores de futebol em pânico tentando escapar do estádio em Sheffield. Quase ninguém consegue passar pela porta aberta devido à alta pressão interna que ocorre durante o congestionamento.

Como este trabalho de mestrado apresenta uma proposta inovadora de algoritmo capaz de descrever o processo de evacuação em instalações civis, a eficácia deste algoritmo precisa ser comprovada. Depois de desenvolvida toda etapa de modelagem, segundo a teoria dos autômatos celulares, o modelo foi testado comparando seus resultados com os de uma situação real simulada com os alunos de Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp. Depois de avisados sobre a importância da pesquisa, e concordado com sua realização, os alunos foram

expostos, numa data surpresa, ao processo evacuativo de sua sala de aula durante sua rotina. Os resultados obtidos nesta simulação, como tempo de percepção do perigo, tempo de evacuação e tendências de aglomeração foram então comparados com os dados simulados segundo a modelagem proposta. No capítulo “Simulação” este experimento aparece com maiores detalhes.

Outro assunto de total relevância nesta etapa de metodologia foi entender e aplicar a teoria dos autômatos celulares. A princípio a terminologia e aplicações são um pouco complexas, mas se tornam bem lógicas à medida que os princípios básicos da teoria são assimilados. Este tipo de abordagem se aplica à modelagem de sistemas onde existe tomada de decisão durante o processo.

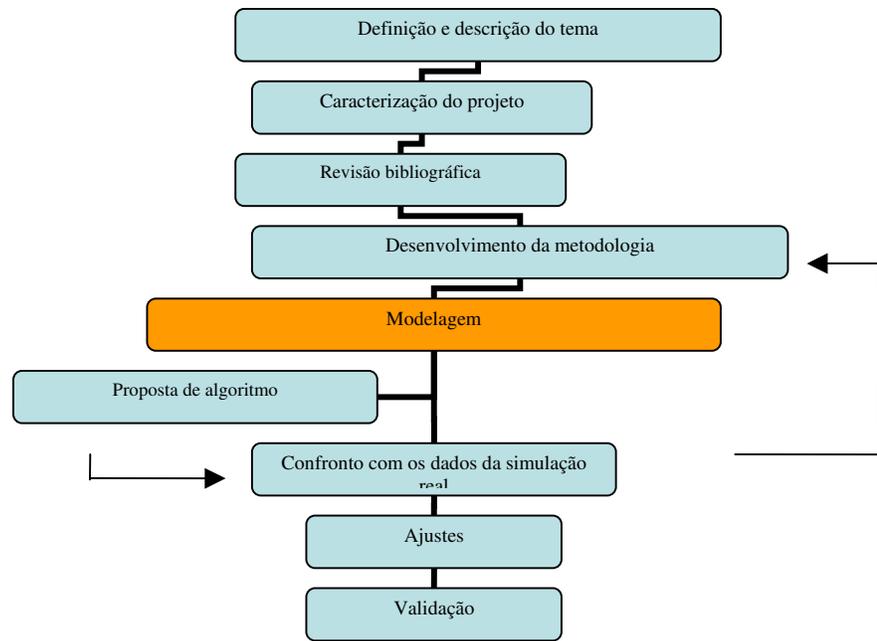
Toda modelagem em autômatos acontece dentro de uma “grelha”. A “grelha” vem a ser o espaço físico onde teremos a modelagem. Ela se parece muito com uma matriz, pois tem linhas e colunas, intervalos entre elas definidos e “nós” por elas determinados como se observa na Figura 3.2.



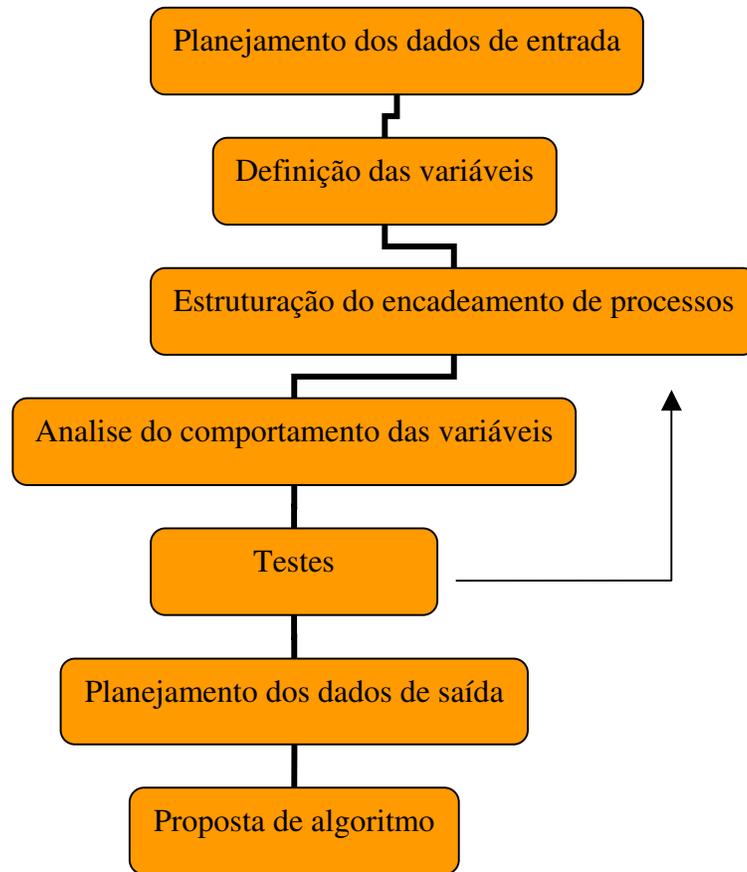
**Figura 3.2** Grelha cujas linhas e colunas definem nós.

Sobre os nós serão colocados pontos representando pessoas num processo evacuativo. Esses pontos têm “vontade” de caminhar pelos nós com direção e intensidade de acordo com a sua vizinhança. Como a vizinhança esta em constante modificação, as “vontades” de todos os pontos da grelha são avaliadas em intervalos regulares.

## **Fluxograma de atividades**



## Fluxograma da modelagem



### 3.2 Modelo proposto

Para que a modelagem das simulações pretendidas tenha êxito, existe uma etapa fundamental intermediária. Trata-se da pesquisa na área da psicologia social para definição dos padrões que foram inseridos no programa. Esta pesquisa trouxe resultados claros, no sentido que elucidou muito dos mitos existentes na área de dinâmica de multidões. Expôs-se, ao final das pesquisas, algumas das tendências de grupos de indivíduos, quando em pânico, sofrendo diversos tipos de influência. Também foram exploradas quais suas características estatisticamente inerentes de acordo com o local que freqüentam. Para o processo de modelagem, foi necessário o estabelecimento de premissas, já que os estudos psicológicos mostram tendências, mas raramente quantificam os fenômenos. Estas premissas, provenientes do estudo do comportamento humano, guiaram o processo de criação dos algoritmos para traduzir em linguagem computacional a realidade de maneira mais fiel possível. A seguir seguem as premissas adotadas, todas extraídas da bibliografia apresentada:

- Pânico é um fenômeno individual e racional; *Quarantelli (1957)*
- Cada grupo tem suas características particulares; *Le Bon (1960)*
- Pânico só aparece quando se configura uma possibilidade de fuga; *Quarantelli (1957)*
- Público já acostumado a situações de fuga, e/ou que já se conhece aglomera-se mais facilmente; *Smelser (1963)*
- Num grupo grande a tomada de decisão é mais lenta e o risco menos aceitável; *Brown (1965)*

- Existe auto-cooperação durante o processo evacuativo. *Keating (1982)*
- As pessoas mudam seu comportamento de acordo com suas expectativas em relação ao comportamento dos outros. *Mintz (1951)*
- Fatores que aumentam a atratividade de uma saída: *Benthorn (1996)*
  - ✓ *Aviso de voz com orientação*
  - ✓ *Saída conhecida*
  - ✓ *Saída iluminada e aberta*

O modelo proposto abrange muitas possibilidades para um mesmo tipo de instalação, como no tocante a lotação e geometria. Os usuários podem observar como a massa reage a mudanças no sentido de alargarem corredores, alterarem o número de saídas, e modificarem o lay out como um todo. Como dados de saída, temos informações referentes à velocidade do escoamento, tempo para total evacuação, nível de conforto dos usuários durante o processo, e uma nítida caracterização dos focos de pânico.

A área a ser simulada será sempre dada, em sua geometria e dimensões, pelo usuário. A partir destas informações será montada uma matriz (“grelha”), que serve como pano de fundo para o desenvolvimento do processo de evacuação. Nesta matriz, os nós estarão equidistantes entre si, respeitando o raio médio corpóreo para livre movimentação. A cada iteração do sistema, onde ocorre nova escolha de direção, as partículas nele alocadas poderão se movimentar para seus nós vizinhos respeitando as restrições de não transporte: Duas partículas nunca ocupam o mesmo nó.

Ex: Sala de dimensões M x N


Para alocar a multidão dentro desta sala, será analisado o estado de pânico que se deseja simular. Segundo Helbing e Molnár (1995) um dos fatores decisivos para o aumento do nível de pânico numa multidão é a densidade em que ela se encontra. Uma multidão “densa” é aquela que se encontra com um elevado quociente pessoa/nó. Quanto maior a pressão interna, e conseqüentemente a relação pessoa/nó, maior será o grau de pânico definido por “p”.

A seguir foi proposta pelo autor uma equação que relaciona matematicamente Pressão interna (P) e Parâmetro de pânico (p):

$$P = 1,5p - 0,1$$

Vale lembrar aqui que o momento ótimo para o grau de pânico “p” se dá no instante em que a multidão esta de prontidão, alerta para uma possível situação de perigo (aproximadamente  $p = 0,4$ ). Uma evacuação com baixos graus de pânico não se faz em tempos ótimos. As pessoas relaxadas não tendem a se apressar e efetuar uma evacuação eficiente.

Portanto, segundo Helbing e Vicsek e Farkas (2000), a velocidade que as pessoas desejam imprimir em seu processo de evacuação também está estritamente relacionada com o grau de pânico. Uma multidão relaxada tem o desejo por evacuar em baixas velocidades, enquanto que uma multidão em pânico deseja evacuar a altas velocidades, evento nem sempre possível. Os engarrafamentos e aumentos de pressão interna são frutos deste desejo reprimido. Diante de uma situação onde as pessoas se vêem presas, elas não diminuem seu desejo por velocidade de escoamento. Numa situação ideal o desejo por velocidade acompanha a velocidade máxima fornecida pelo sistema, e não existe pressão interna. Isto ocorre no processo de evacuação de veículos em estradas engarrafadas.

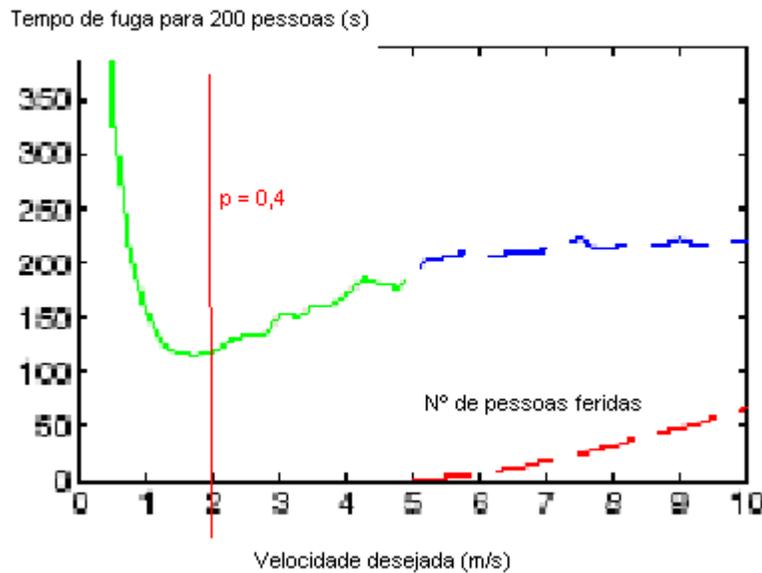
Segundo Helbing e Buzna (2003), a velocidade de escoamento de uma multidão relaxada é de 1,2 m/s. Os autores ainda afirmam que as velocidades que os usuários do sistema desejam imprimir em suas evacuações, nem sempre atendidas, aumentam conforme a pressão interna do sistema. Nos experimentos realizados pelos autores, eles colocam sempre esta velocidade desejada como algo entre 1,0 e 4,0 m/s. A partir de 4,0 m/s a instalação estaria tão lotada que um aumento da velocidade desejada não resultaria em nenhuma diminuição de tempo de fuga.

Assim, com base nos estudos de velocidade desejada de Helbing e Buzna (2003), o autor propõe uma relação matemática entre Velocidade desejada (V) e parâmetro de pânico (p). Vale lembrar que, apesar de linear, a equação se mostra mais fiel à realidade para valores próximos ao parâmetro de pânico ideal ( $p = 0,4$ ).

$$V = 10,0p - 2,0$$

Segundo Helbing e Vicsek e Farkas (2000), com o aumento da pressão interna, resultado do maior desejo por velocidade de escoamento, nota-se também um maior

numero de acidentes durante a evacuação, e o processo torna-se cada vez mais perigoso. O gráfico 03 mostra o aumento de pessoas feridas numa evacuação onde a velocidade desejada aumenta. Também está explicito o insucesso do desejo por mais velocidade. O tempo de escoamento para 200 pessoas aumenta conforme o grau de pânico “p” excede o seu valor ótimo.



**Gráfico 3.1** Extraído de Helbing e Vicsek e Farkas (2000). Tempo de evacuação por velocidade desejada.

Antes de finalmente aplicar o algoritmo desenvolvido em um exemplo, algumas ressalvas devem ser feitas.

Segundo Benthorn (1996), em situações de fuga em pânico, os participantes têm sua visão limitada. O autor propõe um raio de visão limitado em todas as direções para que os usuários notem os movimentos de pessoas ao seu redor, e outro raio de

visão, ligeiramente maior, em todas as direções para que eles avistem saídas e pólos potencialmente atratores.

Ainda de acordo com Benthorn (1996), s movimentos dos usuários do sistema não são necessariamente em linha reta, mas aleatórios em uma faixa do terreno. Devido à natureza matricial do espaço físico, os indivíduos caminham para seus nós vizinhos nas oito possibilidades apresentadas: Norte, Sul, Leste, Oeste, Nordeste, Noroeste, Sudeste e Sudoeste.

O algoritmo proposto em muito se assemelha com os modelos gravitacionais de planejamento de transportes. Também se pode fazer uma analogia ao modelo de atração e repulsão de cargas elétricas.

Pessoas e saídas funcionam como pólos atratores em uma grelha. Cada um tem sua respectiva carga e a cada iteração, as partículas assumem a direção média do vetor força decorrente das atrações que sofrem de sua vizinhança.

Sendo  $\vec{F}_a$ , o vetor que vai mostrar a direção por onde a partícula “a” deve caminhar, temos:

$$\vec{F}_a = \sum \frac{(q_a * q_i) \hat{n}_{ai}}{D_{ai}^2} + \sum \frac{(q_a * Q_j) \hat{n}_{aj}}{D_{aj}^2}$$

**J = nº de saídas**

**Í = nº de pessoas**

**$\hat{n}_{ai}$  = versor na direção ai**

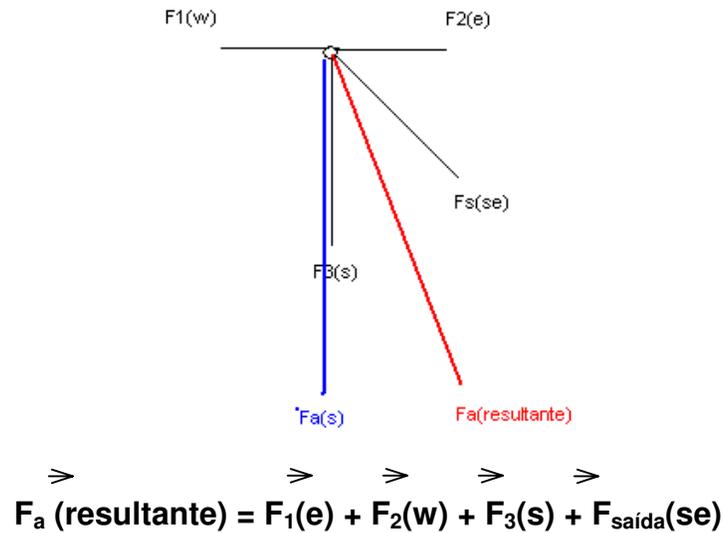
**$\hat{n}_{aj}$  = versor na direção aj**

O termo “D” representa a distancia, ora entre partículas, ora entre partícula e saídas. Já o termo “q” representa a carga elementar de uma pessoa, e “Q” representa a carga de cada saída. Estes valores estão relacionados pela constante “ $\alpha$ ”. A constante

“ $\alpha$ ” representa quantas vezes a saída atrai mais que uma partícula ( $Q = \alpha q$ ). Segundo Benthorn (1996), aumenta-se o valor de “ $\alpha$ ”, tornando uma saída mais atrativa se:

- ✓ A saída já é conhecida
- ✓ A saída está aberta e clara
- ✓ O aviso para início de processo de evacuação se dá com mensagem falada

Sendo assim,  $\vec{F}_a$  é simplesmente a soma de vetores em diversas direções, por exemplo:



Tendo em vista que  $\vec{F}_a$  está entre  $\vec{F}_3$  e  $\vec{F}_{saída}$ , e  $\vec{F}_3$  é maior que  $\vec{F}_{saída}$ , o vetor resultante assume a direção **Sul**, e a partícula se move para o nó imediatamente abaixo dela.

### 3.3 Aplicações do algoritmo

Para elucidar o algoritmo proposto, serão apresentados três exemplos.

#### Exemplo 01:

O primeiro dado fornecido refere-se à geometria da instalação. Neste caso, uma sala de 50x40. A área desta sala será de 2000m<sup>2</sup>

Para montagem da grelha, é necessário saber a quantidade de nós. O número de nós será sempre (M+1) \* (N+1). Portanto, 51 x 41 = 2091 nós.

Outro dado que também deve ser fornecido pelo usuário do algoritmo é o do número de pessoas nesta sala. No caso 1600 pessoas.

A partir destas informações, pode-se inferir sobre a pressão interna neste ambiente. Pressão interna (P) = 1600 / 2091.

$$P = 0,76 \text{ pessoas / nó.}$$

Como ultimo dado de entrada, o usuário do algoritmo deve fornecer informações acerca da saída. Neste caso uma saída central, inferior, aberta e clara. Para inicio do processo evacuativo foi usado um aviso com alarme sonoro, e o processo de evacuação foi realizado por uma porta diversa da utilizada na entrada, ou seja, ela não era conhecida pelos usuários da instalação.

Utilizando a Equação  $P = 1,5p - 0,1$ , tem-se:

$$p = 0,55$$

A partir deste dado de parâmetro de pânico, utiliza-se a equação  $V = 10,0p - 2,0$  para a determinação da velocidade desejada (V):

$$V = 3,5 \text{ m/s}$$

Segundo Helbing e Buzna (2003), o diâmetro corpóreo médio deve ser algo muito próximo a 1,0 m, e, portanto as distâncias entre nós nas grelhas não podem diferir muito de 1,0 m. A única mudança que ocorre quando se adota uma distancia entre nós diversa, é o maior ou menor intervalo entre interações do programa. Quando se deseja um maior detalhamento do processo, pode-se adotar distâncias ligeiramente menores que 1,0 m entre nós da grelha. Não é o caso deste exemplo, onde a grelha foi dividida com linhas e colunas eqüidistantes de 1,0 m.

Assim, observa-se um intervalo entre interações equivalente ao tempo necessário para percorrer 1,0 m à velocidade desejada pelas pessoas de 3,5 m/s.

**Intervalo entre interações = 0,28 Seg.**

O último dado refere-se a conversão dos dados referentes à saída em constante  $\alpha$ . O autor propõe a que esta constante varie entre 5 e 20. Como neste caso a saída esta aberta e clara, seu  $\alpha$  será de 10, e portanto, **Q = 10q**.

### **Exemplo 02:**

O primeiro dado fornecido refere-se à geometria da instalação. Neste caso, a mesma sala de 50x40. A área desta sala será de 2000m<sup>2</sup>

Para montagem da grelha, é necessário saber a quantidade de nós. O número de nós será sempre (M+1) \* (N+1). Portanto, 51 x 41 = 2091 nós.

Outro dado que também deve ser fornecido pelo usuário do algoritmo é o do número de pessoas nesta sala. No caso 1100 pessoas.

A partir destas informações, pode-se inferir sobre a pressão interna neste ambiente. Pressão interna (P) = 1100 / 2091.

$$\mathbf{P = 0,52 \text{ pessoas / nó.}}$$

Como ultimo dado de entrada, o usuário do algoritmo deve fornecer informações acerca da saída. Neste caso uma saída central, inferior, aberta e clara. Para inicio do processo evacuativo foi usado um aviso de voz com mensagem explicativa orientando as pessoas sobre como agir frente aquela situação. O processo de evacuação foi realizado pela mesma porta utilizada na entrada, ou seja, ela era conhecida pelos usuários da instalação.

Utilizando a Equação  $P = 1,5p - 0,1$ , tem-se:

$$p = 0,4$$

A partir deste dado de parâmetro de pânico, utiliza-se a equação  $V = 10,0p - 2,0$  para a determinação da velocidade desejada (V):

$$V = 2,0 \text{ m/s}$$

Segundo Helbing e Buzna (2003), o diâmetro corpóreo médio deve ser algo muito próximo a 1,0 m, e, portanto as distâncias entre nós nas grelhas não podem diferir muito de 1,0 m. A única mudança que ocorre quando se adota uma distancia entre nós diversa, é o maior ou menor intervalo entre interações do programa. Quando se deseja um maior detalhamento do processo, pode-se adotar distâncias ligeiramente menores que 1,0 m entre nós da grelha. Não é o caso deste exemplo, onde a grelha foi dividida com linhas e colunas equidistantes de 1,0 m.

Assim, observa-se um intervalo entre interações equivalente ao tempo necessário para percorrer 1,0 m à velocidade desejada pelas pessoas de 2,0 m/s.

**Intervalo entre interações = 0,5 Seg.**

O último dado refere-se a conversão dos dados referentes à saída em constante  $\alpha$ . O autor propõe a que esta constante varie entre 5 e 20. Como neste caso a saída esta aberta e clara, utilizou-se aviso de voz, e a saída já era conhecida, seu  $\alpha$  será de 20, e portanto,  $Q = 20q$ . Segundo Benthorn (1996) esta saída tem todas as características para se tornar um foco altamente atrativo para as pessoas em processo de evacuação.

### **Exemplo 03:**

O primeiro dado fornecido refere-se à geometria da instalação. Neste caso, a mesma sala de 50x40. A área desta sala será de 2000m<sup>2</sup>

Para montagem da grelha, é necessário saber a quantidade de nós. O número de nós será sempre (M+1) \* (N+1). Portanto, 51 x 41 = 2091 nós.

Outro dado que também deve ser fornecido pelo usuário do algoritmo é o do número de pessoas nesta sala. No caso 1700 pessoas.

A partir destas informações, pode-se inferir sobre a pressão interna neste ambiente. Pressão interna (P) = 1700 / 2091.

$$\mathbf{P = 0,81 \text{ pessoas / nó.}}$$

Como ultimo dado de entrada, o usuário do algoritmo deve fornecer informações acerca da saída. Neste caso uma saída central, inferior, fechada. Para inicio do processo evacuativo foi usado um aviso sonoro, e o processo de evacuação foi realizado por porta diversa da utilizada na entrada, ou seja, ela não era conhecida pelos usuários da instalação.

Utilizando a Equação  $P = 1,5p - 0,1$ , tem-se:

$$\mathbf{p = 0,6}$$

A partir deste dado de parâmetro de pânico, utiliza-se a equação  $V = 10,0p - 2,0$  para a determinação da velocidade desejada (V):

$$V = 4,0 \text{ m/s}$$

Segundo Helbing e Buzna (2003), o diâmetro corpóreo médio deve ser algo muito próximo a 1,0 m, e, portanto as distâncias entre nós nas grelhas não podem diferir muito de 1,0 m. A única mudança que ocorre quando se adota uma distancia entre nós diversa, é o maior ou menor intervalo entre interações do programa. Quando se deseja um maior detalhamento do processo, pode-se adotar distâncias ligeiramente menores que 1,0 m entre nós da grelha. Não é o caso deste exemplo, onde a grelha foi dividida com linhas e colunas eqüidistantes de 1,0 m.

Assim, observa-se um intervalo entre interações equivalente ao tempo necessário para percorrer 1,0 m à velocidade desejada pelas pessoas de 4,0 m/s.

**Intervalo entre interações = 0,25 Seg.**

O último dado refere-se a conversão dos dados referentes à saída em constante  $\alpha$ . O autor propõe a que esta constante varie entre 5 e 20. Como neste caso a saída esta fechada, utilizou-se aviso sonoro, e a saída não era conhecida, seu  $\alpha$  será de 5, e portanto,  $Q = 5q$ . Segundo Benthorn (1996) esta saída não tem nenhuma das características para se tornar um foco altamente atrativo para as pessoas em processo de evacuação.

#### **Exemplo 04:**

Para mostrar como o processo interativo funciona, um exemplo foi selecionado e analisado. Nele, todo processo pode ser feito sem a ajuda de um computador, pois os espaços são diminutos e a população da instalação bem pequena.

O espaço físico escolhido foi o de uma sala de aula, tendo 5,0 m x 4,0 m. Sua área é de 20,0 m<sup>2</sup> e o número de nós da grelha é de 30.

A partir destas informações, pode-se inferir sobre a pressão interna neste ambiente. Pressão interna (P) = 5 / 30.

$$P = 0,17 \text{ pessoas / nó.}$$

Utilizando a Equação  $P = 1,5p - 0,1$ , tem-se:

$$p = 0,2$$

A partir deste dado de parâmetro de pânico, utiliza-se a equação  $V = 10,0p - 2,0$  para a determinação da velocidade desejada (V):

$$V = 0,0 \text{ m/s}$$

Este resultado vem a reforçar que valores de pânico abaixo de  $p = 0,2$  se traduzem como um escoamento realmente muito lento. Assim, adota-se o valor mínimo de velocidade desejada como  $V_{\min} = 0,5 \text{ m/s}$ , pois esta é a velocidade utilizada por Helbing e Buzna (2003) quando simulam situações onde praticamente inexistente o fenômeno de pânico.

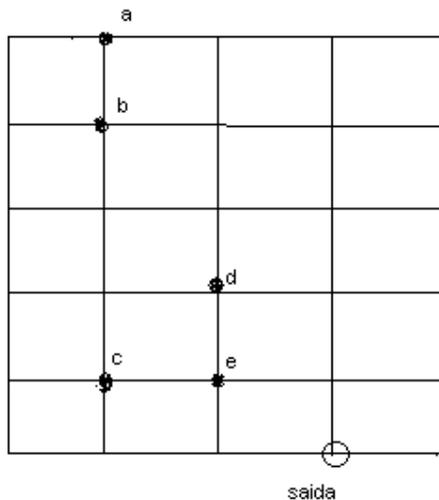
Também segundo Helbing e Buzna (2003), o diâmetro corpóreo médio deve ser algo muito próximo a 1,0 m, e, portanto as distâncias entre nós nas grelhas não podem diferir muito de 1,0 m. A única mudança que ocorre quando se adota uma distância entre nós diversa, é o maior ou menor intervalo entre interações do programa. Quando se deseja um maior detalhamento do processo, pode-se adotar distâncias ligeiramente menores que 1,0 m entre nós da grelha. Não é o caso deste exemplo, onde a grelha foi dividida com linhas e colunas equidistantes de 1,0 m.

Portanto, observa-se um intervalo entre interações equivalente ao tempo necessário para percorrer 1,0 m à velocidade desejada pelas pessoas de 0,5 m/s.

**Intervalo entre interações = 2,0 Seg.**

O último dado refere-se a conversão dos dados referentes à saída em constante  $\alpha$ . O autor propõe a que esta constante varie entre 5 e 20. Como neste caso a saída esta aberta e clara, utilizou-se aviso sonoro, e a saída era conhecida, seu  $\alpha$  será de 15, e portanto,  $Q = 15q$ . Segundo Benthorn (1996) esta saída tem algumas das características para se tornar um foco altamente atrativo para as pessoas em processo de evacuação.

**Interação 01:**



Este cenário foi gerado aleatoriamente. Nele as pessoas foram posicionadas em seus respectivos nós, e terão como meta fundamental atingir a saída. Para rapidez de cálculos, foi adotada a constante “k” que equivale à multiplicação de duas cargas elementares “q”.

Também é interessante notar que a soma de vários vetores só se torna possível na medida em que as forças assumem direção ao serem multiplicadas por versores unitários que lhes fornecem suas características de direção e sentido. O versor “**sw**”, por exemplo, confere direção Sudoeste à força oriunda do desejo de mudança de posição das pessoas na grelha. Assim, esta é a primeira interação das forças do sistema:

$$\vec{F}_a = k/1 \cdot \vec{s} + k/16 \cdot \vec{s} + k/9 \cdot \vec{s} + k/16 \cdot \vec{s} + 15k/25 \cdot \vec{s} = F_a (s) = \text{Não transporte (nó ocupado)}.$$

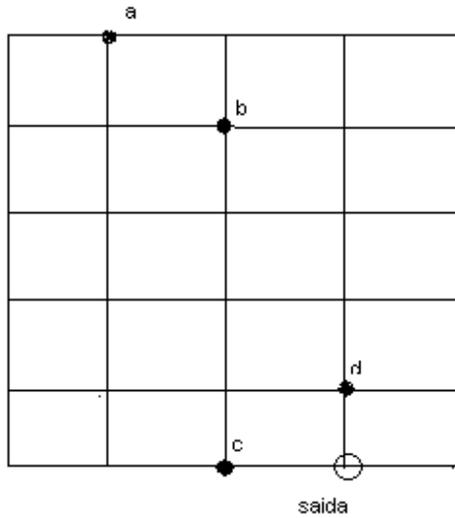
$$\vec{F}_b = k/1 \cdot \vec{n} + k/9 \cdot \vec{s} + k/9 \cdot \vec{s} + k/4 \cdot \vec{se} + 15k/16 \cdot \vec{se} = F_b (e)$$

$$\vec{F}_c = k/16 \cdot \vec{n} + k/9 \cdot \vec{n} + k/1 \cdot \vec{ne} + k/1 \cdot \vec{e} + 15k/4 \cdot \vec{se} = F_c (se)$$

$$\vec{F}_d = k/9 \cdot \vec{n} + k/4 \cdot \vec{n} + k/1 \cdot \vec{sw} + k/1 \cdot \vec{s} + 15k/4 \cdot \vec{se} = F_d (sw)$$

$$\vec{F}_e = F_e (se)$$

## Interação 02:



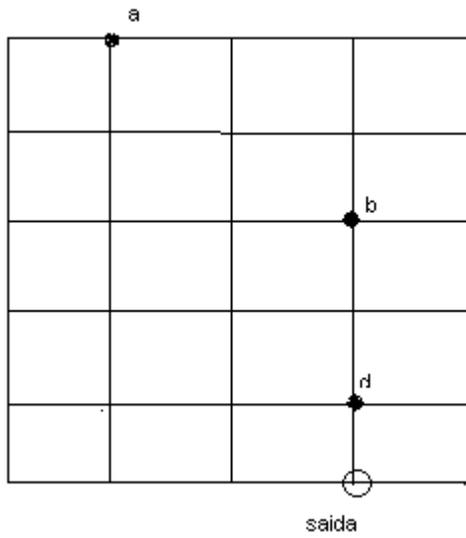
$$\Rightarrow F_a = k/1 \cdot \overrightarrow{se} + k/16 \cdot \overrightarrow{se} + 15k/25 \cdot \overrightarrow{s} = F_a (se) = \text{n\~{a}o transporte (n\~{o} ocupado)}.$$

$$\Rightarrow F_b = k/1 \cdot \overrightarrow{nw} + k/16 \cdot \overrightarrow{s} + k/9 \cdot \overrightarrow{s} + 15k/16 \cdot \overrightarrow{s} = F_b (sw)$$

$$\Rightarrow F_c = k/16 \cdot \overrightarrow{n} + k/1 \cdot \overrightarrow{ne} + 15k/1 \cdot \overrightarrow{e} = F_c (e)$$

$$\Rightarrow F_d = k/16 \cdot \overrightarrow{n} + k/9 \cdot \overrightarrow{n} + k/1 \cdot \overrightarrow{sw} + 15k/1 \cdot \overrightarrow{s} = F_d (s) = \text{n\~{a}o transporte} \Rightarrow (F_c > F_d)$$

### Interação 03:

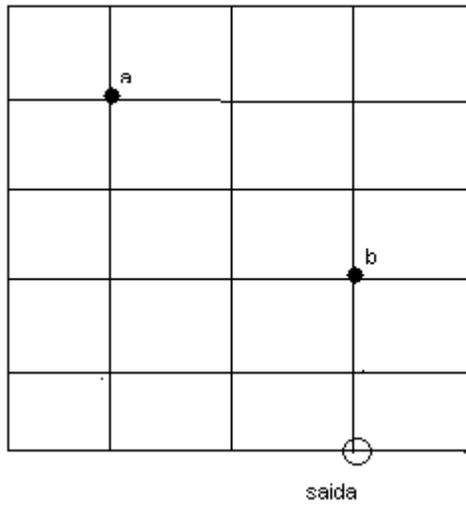


$$\vec{F}_a = k/4 \cdot \vec{se} + k/16 \cdot \vec{se} + 15k/25 \cdot \vec{s} = F_a (s)$$

$$\vec{F}_b = k/4 \cdot \vec{w} + k/4 \cdot \vec{s} + 15k/9 \cdot \vec{s} = F_b (s)$$

$$\vec{F}_d = \vec{F}_d (s)$$

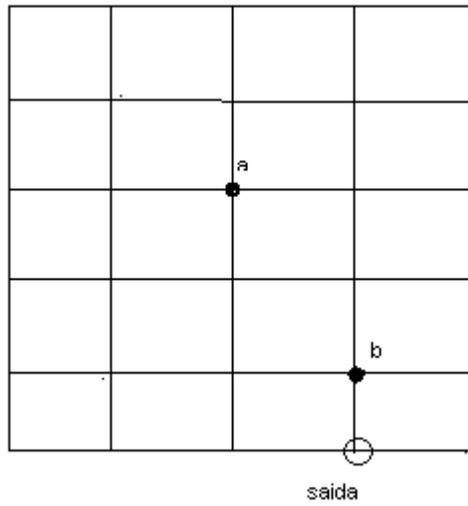
### Interação 04:



$$\Rightarrow F_a = k/4 \cdot \mathbf{se} + 15k/16 \cdot \mathbf{se} = F_a (se)$$

$$\Rightarrow F_b = k/4 \cdot \mathbf{nw} + 15k/4 \cdot \mathbf{s} = F_b (s)$$

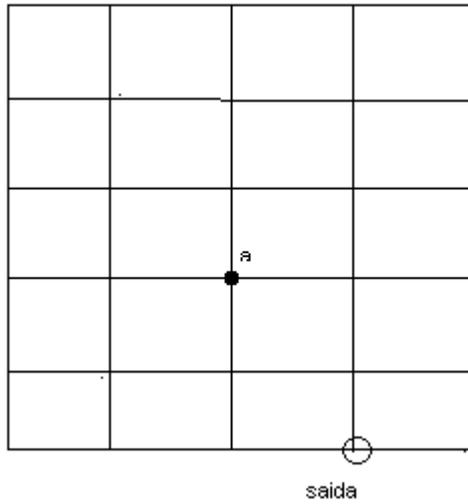
### Interação 05:



$$\vec{F}_a = k/4 \cdot \vec{s} + 15k/9 \cdot \vec{s} = \vec{F}_a (s)$$

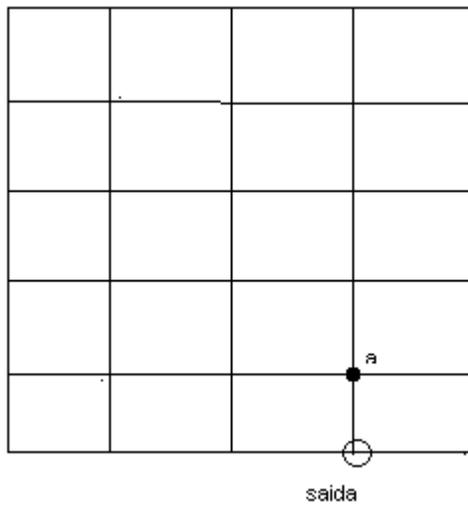
$$\vec{F}_b = k/4 \cdot \vec{h} + 15k/1 \cdot \vec{s} = \vec{F}_b (s)$$

### Interação 06:



$$\vec{F}_a = \vec{F}_a (se)$$

### Interação 07:



$$\vec{F}_a = \vec{F}_a (s)$$

Segundo Benthorn (1996), o tempo total de fuga é composto de duas parcelas: O tempo de percepção, que varia muito de acordo com o modo como o alarme foi disparado, e o autor propõe algo entre 13,0 e 22,0 seg, e o tempo de escoamento. Neste caso o tempo de percepção será adotado como o mínimo proposto pelo autor, e o tempo de fuga será o numero de interações vezes o intervalo entre elas.

Tempo de percepção: 13,0 seg

Tempo de escoamento:  $7 \times 2,0 \text{ seg} = 14,0 \text{ seg}$

**Tempo de fuga: 27,0 seg**

No modelo proposto, deve-se atentar ainda para a possibilidade de não transporte de uma ou mais partículas durante uma interação. O não transporte pode ocorrer seja quando duas partículas querem ocupar o mesmo nó e só aquela com maior módulo da força o faz, ou quando o operador define pontos que não devem ser ocupados, como paredes, colunas, objetos que obstruam a passagem. Nestas ocasiões, as partículas (pessoas) permanecem paradas esperando uma nova interação onde provavelmente receberão outros estímulos e estarão mais sujeitas a mover-se.

## 4 Simulação

### 4.1 Apresentação de dados obtidos

Nesta etapa derradeira do trabalho, foi realizada uma simulação de evacuação de uma sala de aula com os alunos da Eng. Agrícola, coordenados pelo Prof. Dr. Kil Jin Park.

Durante a apresentação da teoria envolvendo modelagem por autômatos celulares, em alguns momentos, foram colocadas propostas do autor que não encontram confirmações na literatura, e, portanto colocam toda teoria desenvolvida na dependência de uma comprovação para sua validação. Neste caso, será utilizada a metodologia de Estudo de caso para comprovação da teoria exposta na Dissertação de Mestrado.

Durante sua rotina habitual, os alunos foram abordados, sem prévio aviso, por três operadores que desenvolveram os seguintes papéis:

- Operador 01: Realizou os registros fotográficos da Simulação.
  
- Operador 02: Anotou e cronometrou os dados referentes ao espaço geométrico e tempos de percepção e evacuação.
  
- Operador 03: Deu a mensagem falada a respeito da emergência que estava em vigor no prédio da Eng. Agrícola, e ordenou a evacuação da sala o mais rápido possível.

O relatório experimental apresentado a seguir, mostra a planilha preenchida pelo Operador 02 tal qual no dia do experimento:

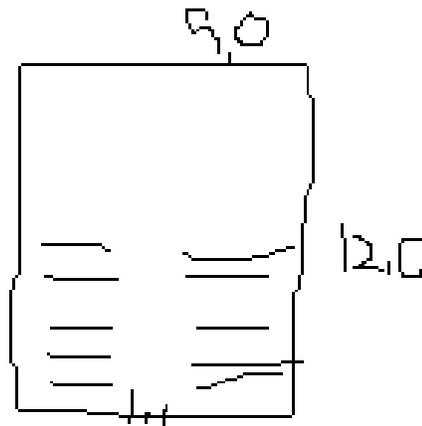
## Relatório de procedimento experimental

**Título:** Tomada de tempos e geometrias para validação de modelo para evacuação de pessoas em instalações civis através de experimento prático.

**Objetivo:** Tendo em vista a necessidade da validação de uma formulação proposta em dissertação de mestrado, foi necessária a execução de uma evacuação real. Nela serão analisados os tempos de percepção e evacuação, o conhecimento da geometria da instalação e a contagem de participantes.

**Metodologia:** Os alunos de uma turma de graduação serão expostos a uma situação de incêndio simulada. Os participantes estarão a par da realização do experimento, porém, sem saberem da sua natureza. Durante a evacuação de uma sala de aula, serão medidos tempos de percepção e evacuação. Serão também contados os participantes e a sala utilizada será medida e sua distribuição de móveis reproduzida. A mesma situação será analisada utilizando o algoritmo proposto na dissertação de mestrado.

**Geometria da sala de aula:**



**Numero de participantes:** 31

**Tempo de percepção:** 10,0 + 3,0

**Tempo total da fuga:** 22,0

**Tipo de alarme:** falado

**Saída conhecida:** S

**Saída clara e aberta:** S

**Aferido por:**

Num primeiro momento, serão analisados os dados obtidos no experimento. A geometria da sala de aula, rotas de fuga, diâmetro(s) da(s) saída(s), velocidades de percepção e evacuação. Posteriormente, será empregada a teoria desenvolvida pelo autor durante esta dissertação para tentar uma aproximação com a realidade.

Os principais dados obtidos a partir do experimento são:

- Dimensões da sala de aula: 9,0m (na direção da saída) x 12,0m
- Pontos de não transporte: Carteiras escolares funcionaram como restrições ao transporte, promovendo corredores de fuga.
- Quantidade de pessoas e sua distribuição: 31 pessoas distribuídas aleatoriamente em carteiras escolares.
- Largura da(s) saída(s): Inicialmente com 0,50m foi alargada durante o processo de evacuação por um participante para 1,00m
- Tempo de Percepção: Dividido em dois; o tempo de aviso de voz, que foi de 10,0seg, e o tempo de percepção do perigo, que foi de 3,0seg, totalizando o tempo de percepção em 13,0seg.
- Tempo de Evacuação: 22,0seg.
- Tempo total de fuga: 35,0seg.

Nas fotografias a seguir esta detalhado o processo pelo qual os alunos da Faculdade de Eng. Agrícola evacuaram sua sala de aula no dia 22/11/2005.



**Fotografia 4.1** Início do processo de fuga.



**Fotografia 4.2** Carteiras escolares formando pontos de não transporte.



**Fotografia 4.3** Todas as pessoas já estão no corredor central.



**Fotografia 4.4** A porta é aberta e sua largura dobra.



**Fotografia 4.5** A porta mais larga facilita a evacuação.



**Fotografia 4.6** Final da evacuação.

## 4.2 Simulação utilizando a modelagem proposta

### 4.2.1 Definição das variáveis comportamentais:

O primeiro dado a ser modelado é a saída que foi utilizada pelos alunos. A primeira saída era conhecida (eles entraram por lá) e estava aberta. Já a segunda, não era conhecida, muito menos estava aberta, mas adquiriu as características da primeira por estar contígua a ela. Ou seja, o público que se sentiu atraído pela primeira saída

também acabou utilizando a segunda. Quanto ao tipo de mensagem para a saída, foi utilizada uma mensagem falada que estimulou a evacuação. Assim podem-se classificar ambas as saídas com potencial atrator  $\alpha = 20$  (numa escala de 5 a 20).

O primeiro dado fornecido refere-se à geometria da instalação. Neste caso, a mesma sala de 9x12. A área desta sala será de 108,0m<sup>2</sup>

Para montagem da grelha, é necessário saber a quantidade de nós. O número de nós será sempre  $(M+1) * (N+1)$ . Portanto,  $10 * 13 = 130$  nós.

Outro dado que também deve ser fornecido pelo usuário do algoritmo é o do número de pessoas nesta sala. No caso 31 pessoas.

A partir destas informações, pode-se inferir sobre a pressão interna neste ambiente. Pressão interna  $(P) = 31 / 130$ .

$$P = 0,24 \text{ pessoas / nó.}$$

Pode-se observar que os alunos estavam num ambiente bem relaxado, onde praticamente inexistia pressão interna. A sala se mostrou muito ampla, e suas dimensões físicas não provocaram pressão psicológica sobre as pessoas durante o processo de evacuação. Pode-se assim considerar a velocidade desejada pela multidão como sendo a mínima proposta por Helbing e Buzna (2003) quando simulam situações onde praticamente inexistente o fenômeno de pânico, como quando o parâmetro de pânico é menor do que  $p = 0,2$ .

Utilizando a Equação  $P = 1,5p - 0,1$ , tem-se:

$$p = 0,22$$

A partir deste dado de parâmetro de pânico, utiliza-se o critério da velocidade mínima para a determinação da velocidade desejada (V):

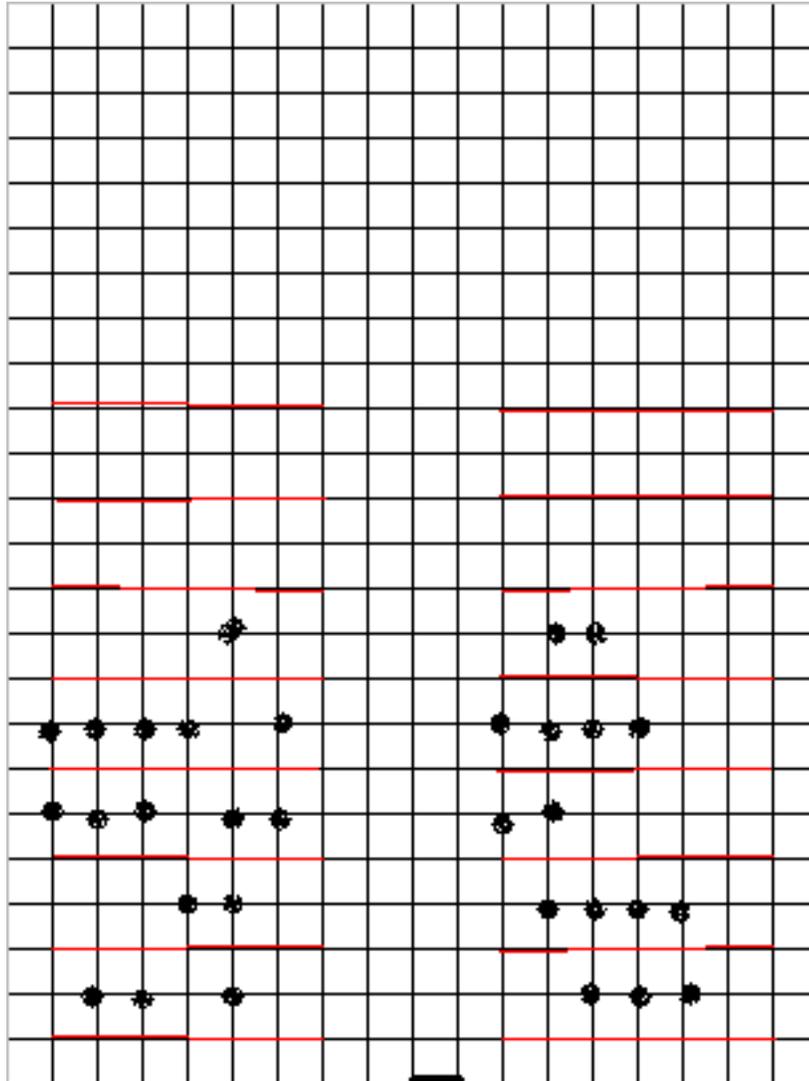
$$V = 0,5 \text{ m/s}$$

Segundo Helbing e Buzna (2003), o diâmetro corpóreo médio deve ser algo muito próximo a 1,0 m, e, portanto as distâncias entre nós nas grelhas não podem diferir muito de 1,0 m. A única mudança que ocorre quando se adota uma distancia entre nós diversa, é o maior ou menor intervalo entre interações do programa. Quando se deseja um maior detalhamento do processo, pode-se adotar distâncias ligeiramente menores que 1,0 m entre nós da grelha. É exatamente isso que será feito no exemplo, onde a saída tem largura 0,5m e sua largura vai reger a distancia entre nós da grelha.

Assim, observa-se um intervalo entre interações equivalente ao tempo necessário para percorrer 0,5m à velocidade desejada pelas pessoas de 0,5 m/s.

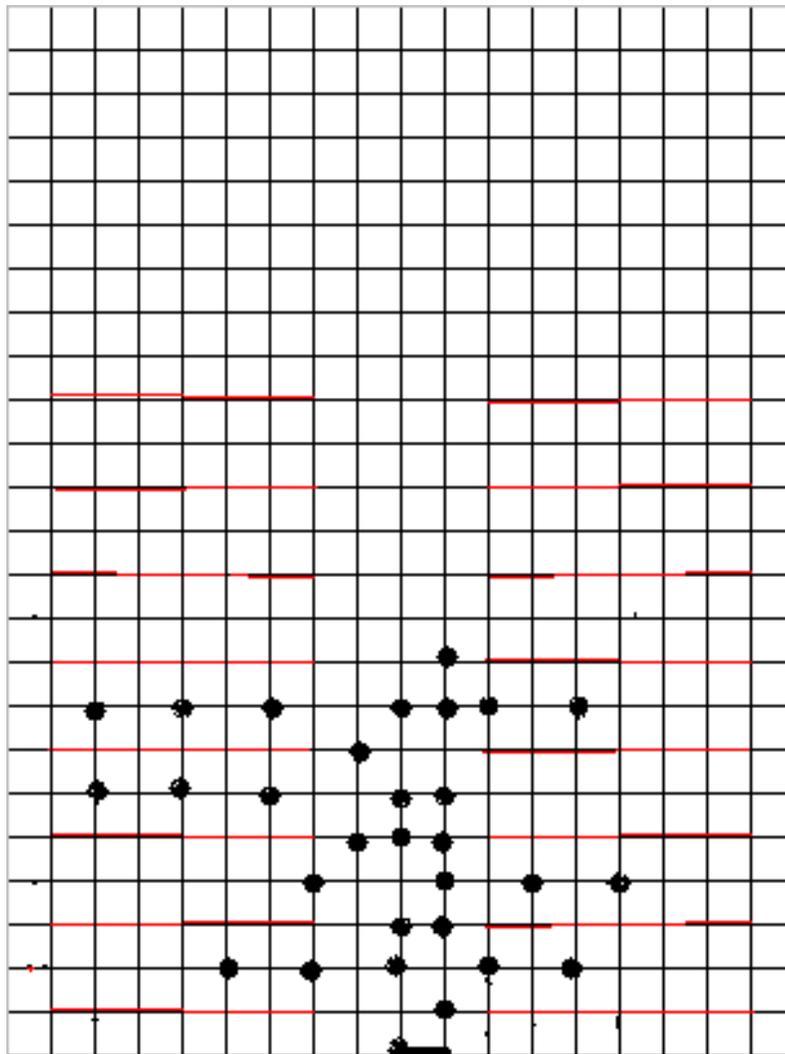
$$\text{Intervalo entre interações} = 1,0 \text{ Seg.}$$

## Geometria do local e interações:

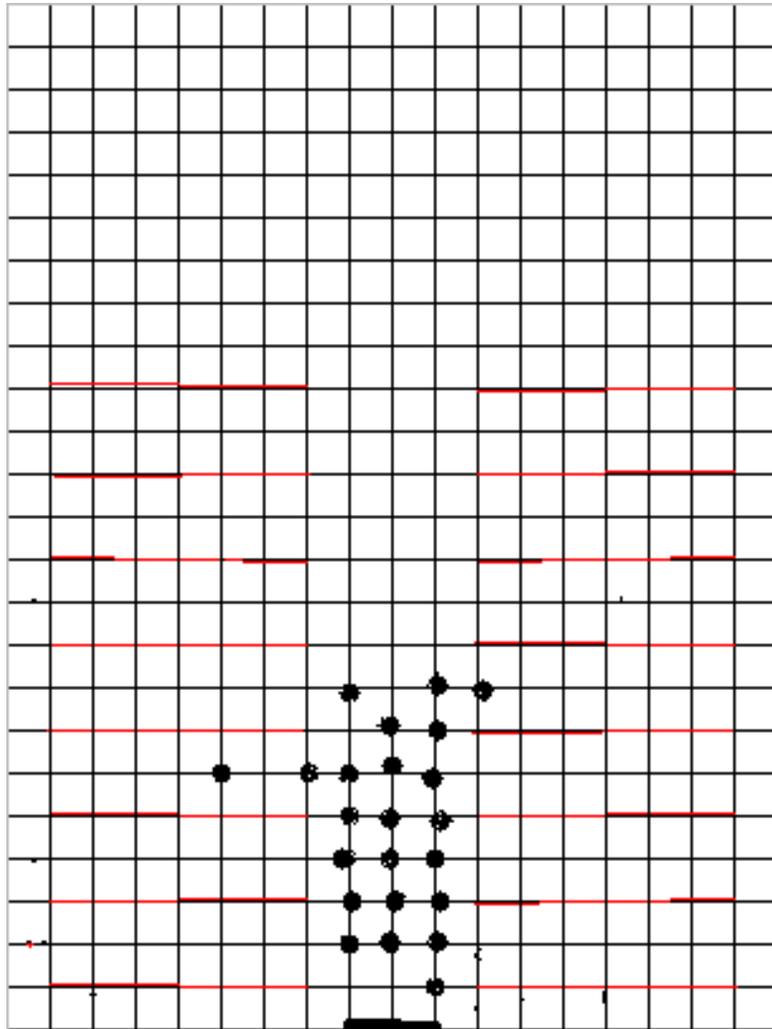


**Figura 4.1** Representação gráfica da sala de aula, com seus nós de não transporte e alunos alocados randomicamente conforme no dia do experimento.

Todo o processo interativo foi realizado manualmente pelo autor, e consta do anexo deste trabalho. A Figura 12 acima representa o instante  $T = 0,0$  seg, onde as pessoas acabaram de perceber a iminência do perigo e estão iniciando seu processo de fuga. Vale lembrar que o instante final do processo foi na experiência real,  $T = 22,0$  seg, mas que na simulação pode ocorrer uma pequena variação. A seguir serão apresentados alguns instantes emblemáticos da evacuação:



**Figura 4.2** Instante  $T = 4,0$  seg. onde a primeira pessoa sai da sala.



**Figura 4.3** Instante em que se abre a segunda porta.  $T = 10,0$  seg.

Ao todo foram necessárias 26 interações para esvaziar a sala. Como cada uma tem a duração de 1,0 seg, o modelo acusou uma evacuação durando 26,0 seg. O resultado foi levemente diferente da realidade, onde se obteve o valor de 22,0 seg, mas alguma leve diferença já era esperada.

**$T_{\text{Real}} = 22,0$  seg.**

**$T_{\text{Simulado}} = 26,0$  seg.**

Ao todo a evacuação durou, na simulação, os 13,0 seg. de aviso e percepção de aviso somados aos 26,0 seg. de fuga. Portanto obteve-se um tempo total de evacuação de 39,0 seg, contra os 35,0 seg. da situação real. Uma diferença de cerca de 10% de aumento.

## **5 Conclusões e recomendações**

Em construção civil, cada projeto é único. Quando ainda estão em fase de planejamento, já apresentam nuances características à seus usuários, ao tipo de uso e ao grau de conforto com que serão concebidos. Todos os casos que envolvem modelagem em dinâmica de multidões devem ser estudados em suas particularidades, mas algumas semelhanças no comportamento humano podem ser previstas, e devem ser utilizadas para o projeto de instalações mais seguras, confortáveis e que promovam o retorno de seus usuários. O setor de serviços, área que mais cresce na economia brasileira, não enxerga mais a construção civil como o prédio pronto, mas sim todo seu ciclo de vida. Hoje em dia, a operação de um edifício passa a ser tão importante quanto sua concepção em si, e as grandes empreendedoras têm como seus setores mais movimentados os departamentos de pós-obra. Neste contexto, a pesquisa em modelagem de movimentações humanas preenche uma lacuna no projeto de edificações brasileiras, que começam a ser concebidas num ambiente que visa o conforto e bem estar dos usuários das instalações. Neste contexto, surge a preocupação de projetistas, arquitetos e engenheiros com o bom funcionamento dos mecanismos de evacuação de instalações civis quando em situações de emergência.

Além do estudo em psicologia social, fenômenos de transporte e engenharia de tráfego, foram estudados modelos que já existem no mercado, suas falhas, vantagens, onde não se aplicam e onde se encaixam bem. O modelo desenvolvido atentou para as varias possibilidades de lotação de uma instalação, para os vários níveis de excitação

dos usuários e procurou classificá-los. Não existe uma regra única para solucionar um problema de modelagem, normalmente cada caso tem sua classificação peculiar.

Para o processo de modelagem, foi necessário o estabelecimento de premissas, já que os estudos psicológicos mostram tendências, mas raramente quantificam os fenômenos. Estas premissas, provenientes do estudo do comportamento humano, guiaram o processo de criação dos algoritmos para traduzir em linguagem computacional a realidade de maneira mais fiel possível. A seguir seguem as premissas adotadas, todas extraídas da bibliografia apresentada:

- Pânico é um fenômeno individual e racional; *Quarantelli (1957)*
- Cada grupo tem suas características particulares; *Le Bon (1960)*
- Pânico só aparece quando se configura uma possibilidade de fuga; *Quarantelli (1957)*
- Público já acostumado a situações de fuga, e/ou que já se conhece aglomera-se mais facilmente; *Smelser (1963)*
- Num grupo grande a tomada de decisão é mais lenta e o risco menos aceitável; *Brown (1965)*
- Existe auto-cooperação durante o processo evacuativo. *Keating (1982)*
- As pessoas mudam seu comportamento de acordo com suas expectativas em relação ao comportamento dos outros. *Mintz (1951)*

- Fatores que aumentam a atratividade de uma saída: *Benthorn (1996)*

- ✓ *Aviso de voz com orientação*
- ✓ *Saída conhecida*
- ✓ *Saída iluminada e aberta*

A partir destas premissas, se buscou um algoritmo que pudesse, mediante ao acerto com constantes e novas variáveis, representar este processo. Utilizando a teoria dos autômatos celulares, combinada com a teoria de atração e repulsão dos corpos, chegou-se a seguinte equação representando a força interna de atração entre as pessoas que compõe o sistema em evacuação.

Sendo  $\mathbf{F}_a$ , o vetor que vai mostrar a direção por onde a partícula “a” deve caminhar, temos:

$$\vec{F}_a = \sum \frac{(q_a * q_i)}{D_{ai}^2} \hat{n}_{ai} + \sum \frac{(q_a * Q_j)}{D_{aj}^2} \hat{n}_{aj}$$

**J = nº de saídas**

**Í = nº de pessoas**

**$\hat{n}_{ai}$  = versor na direção ai**

**$\hat{n}_{aj}$  = versor na direção aj**

Através da determinação destas forças internas do sistema, e de uma série de transformações das informações sobre espaço físico em padrões de pânico e

velocidade desejada pelos pedestres em processo de saída, chegou-se a um modelo que foi aplicado em uma situação real simulada na Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp. A aplicação trouxe bons resultados, e mostrou que, para este caso, a teoria desenvolvida apresentou um erro de 10%.

A grande aquisição desta pesquisa, que resultou na dissertação, foi a elaboração de um modelo, válido para o caso em que foi aplicado, e que se mostrou representativo nesta ocasião. Para uma generalização abrangendo todas as situações onde existe a evacuação de instalações em situações de pânico, se fazem necessários mais testes, e ajustes nas variáveis assumidas. No instante em que a teoria proposta se encaixa em diversos casos reais, pode-se deduzir que a teoria funciona. O sucesso do trabalho de modelagem se deve ao rigoroso processo de pesquisa e as comparações com casos práticos.

A pesquisa na área de dinâmica de multidões é um campo ainda pouco explorado, e muito ainda pode ser desenvolvido na área. Este trabalho ainda pode ser aprimorado, as formulações podem ser refinadas, como por exemplo, com a redefinição do nível de pânico da massa em processo de evacuação a cada processo de interação. Como os parâmetros físicos da sala com relação a seus ocupantes mudam, pode-se deduzir que o estado de pânico das pessoas também varia no processo. Assim, se a cada alteração ocorrida na relação pessoas por nó o modelo recalculasse o parâmetro de pânico, o estado psicológico da massa durante a evacuação seria processado de modo mais realista, e conseqüentemente sua velocidade de escoamento. Também é recomendado um aprimoramento nos valores de constantes adotadas, uma vez que isso só será possível na medida em que varias simulações forem realizadas e seus dados cruzados.

A exploração de outros casos e realização de outras simulações é altamente recomendada para afinação das equações e variáveis adotadas neste trabalho.

Outra faceta importante ainda a ser analisada é a comparação dos dados obtidos através deste método de modelagem com os softwares de evacuação existentes no mercado. Infelizmente o custo elevado deste tipo de programa computacional impossibilitou a realização desta pesquisa comparativa neste trabalho, mas sua realização é fortemente recomendada. De posse dos dados desta pesquisa, seria interessante também o desenvolvimento de um software utilizando a metodologia aqui apresentada. A criação de um produto brasileiro na área deve ser encorajada à medida que a teoria aqui apresentada for comprovada totalmente válida e todos seus parâmetros e constantes forem calibradas.

A análise de custo-benefício de uma consultoria em dinâmica de multidões durante a fase de projeto não pode estimar o preço a ser pago pelas vidas perdidas e traumas psicológicos advindos de um eventual desastre, mas pode estimar que o custo não ultrapassaria o custo que atualmente se paga a um escritório de arquitetura por um projeto executivo de uma grande instalação. Ou seja, depois do modelo computacional desenvolvido, sua aplicação e uma consultoria aplicada ao caso em questão não custaria mais que U\$ 20 mil.

## Referências bibliográficas

ANDERSON, N. H. **Group performance in an anagram task.** Journal of Social Psychology 55, 67-75 (1961).

BENTHORN, L.J. and FRANTZICH, H. **Fire alarm in a public building:** How do people evaluate information and choose evacuation exit? (1996)

BROWN, R. **Social Psychology** (The Free Press, New York, 1965).

BRYAN, J. L. **Convergence clusters.** Fire Journal, 27-30+86-90 (November/1985).

CANTER, D. (ed.) **Fires and Human Behavior** (David Fulton, London, 1990).

DRAGER, K. H., LOVAS, G., WIKLUND, J., SOMA, H., DUONG, D., VIOLAS A. & LANERES, V. **EVACSIM - A comprehensive evacuation simulation tool.** Proceedings of the 1992 Emergency Management and Engineering Conference (Society for Computer Simulation, Orlando, Florida, 1992), pp. 101-108.

ELLIOTT, D. & SMITH, D. **Football stadia disasters in the United Kingdom:** learning from tragedy? Industrial & Environmental Crisis Quarterly 7(3), 205-229 (1993).LEBON, G. **The Crowd** (Viking, New York, 1960).

FOX, R.W. & MCDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** (1998)

GARTNER Nathan, MESSER Carroll J., and RATHI Ajay K. **Traffic Flow Theory:** A State of the Art Report. U.S. Department of Transportation, Transportation Research Board, June 1992.

GLANCE, N. S. & HUBERMAN, B. A. **The dynamics of social dilemmas.** Scientific American 270, 76-81 (1994). QUARANTELLI, E. **The behavior of panic participants.** Sociology and Social Research 41, 187-194 (1957).

HELBING Dirk, BUZNA Lubos, and WERNER Torsten **Self-Organized Pedestrian Crowd: Dynamics and Design Solutions** (2003)

HELBING, D. & MOLNÁR, P. **Social force model for pedestrian dynamics.** Physical Review E [51, 4282-4286 \(1995\)](#).

HELBING, D. & HUBERMAN, B. A. **Coherent moving states in highway traffic.** Nature [396, 738-740 \(1998\)](#).

HELBING, D. e VICSEK, T. e FARKAS, I. (2000) **Simulating dynamical features of escape panic.** NATURE Vol. 407

JACOBS, B. D. & Hart, P. **Disaster at Hillsborough stadium: a comparative analysis.** In Parker, D. J. & Handmer, J. W. (eds.) Hazard Management and Emergency Planning (James & James Science, London, 1992), Chapter 10.

JOHNSON, N. R. **Panic at "The Who Concert Stampede": An empirical assessment.** Social Problems 34(4), 362-373 (1987).

JOHNSON N. **Fire in a crowded theater: A descriptive investigation of the emergence of panic.** International Journal of Mass Emergencies and Disasters, (1988).

SMELSER, N. J. **Theory of Collective Behavior** (The Free Press, New York, 1963).

JOHNSON, S. **Emergência.** (Ed. Jorge Zahar, 2001)

KEATING, J. P. **The myth of panic.** Fire Journal, 57-61+147 (May/1982). TURNER, R. H. & KILLIAN, L. M. **Collective Behavior** (Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 3rd ed., 1987).

KELLEY, H. H., CONDRY, J. C. Jr., DAHLKE, A. E. & HILL, A. H. **Collective behavior in a simulated panic situation.** Journal of Experimental Social Psychology 1, 20-54 (1965).

KETCHELL, N., COLE, S. WEBBER, D. M., MARRIOTT, C. A., STEPHENS, P. J., BREARLEY, I. R., FRASER, J., DOHENY, J. & SMART, J. **The EGRESS Code for human movement and behavior in emergency evacuations,** (1993)

MEYER-KONIG, M., KLUPFEL, H., WAHLE, J. & SCHREKENBERG, M. **Microscopic simulation of evacuation processes on passenger ships**. Proceedings of the 4th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (Springer, London, 2000).

MINTZ, A. **Non-adaptive group behavior**. The Journal of Abnormal and Normal Social Psychology 46, 150-159 (1951).

RAN, B.; BOYCE, D. **Modelling dynamic transportation networks** - an intelligent transportation system approach. Springer-Verlag (1996).

SALOMA Caesar, PEREZ Gay Jane, TAPANG Giovanni, LIM May, and PALMES Cynthia **Self-organized queuing and scale-free behavior in real escape panic**. (2003).

SMITH, R. A. & DICKIE, J. F. (eds.) **Engineering for Crowd Safety** (1993).

[STILL, G. K.](#) **Crowd dynamics** (Warwick, 2000)

VICZEK, T. (2001) **A question of scale**. NATURE Vol. 411

VICSEK, T., CZIROK, A., BEN-JACOB, E., COHEN, I. & SHOCHET, O. **Novel type of phase transition in a system of self-driven particles**. Physical Review Letters

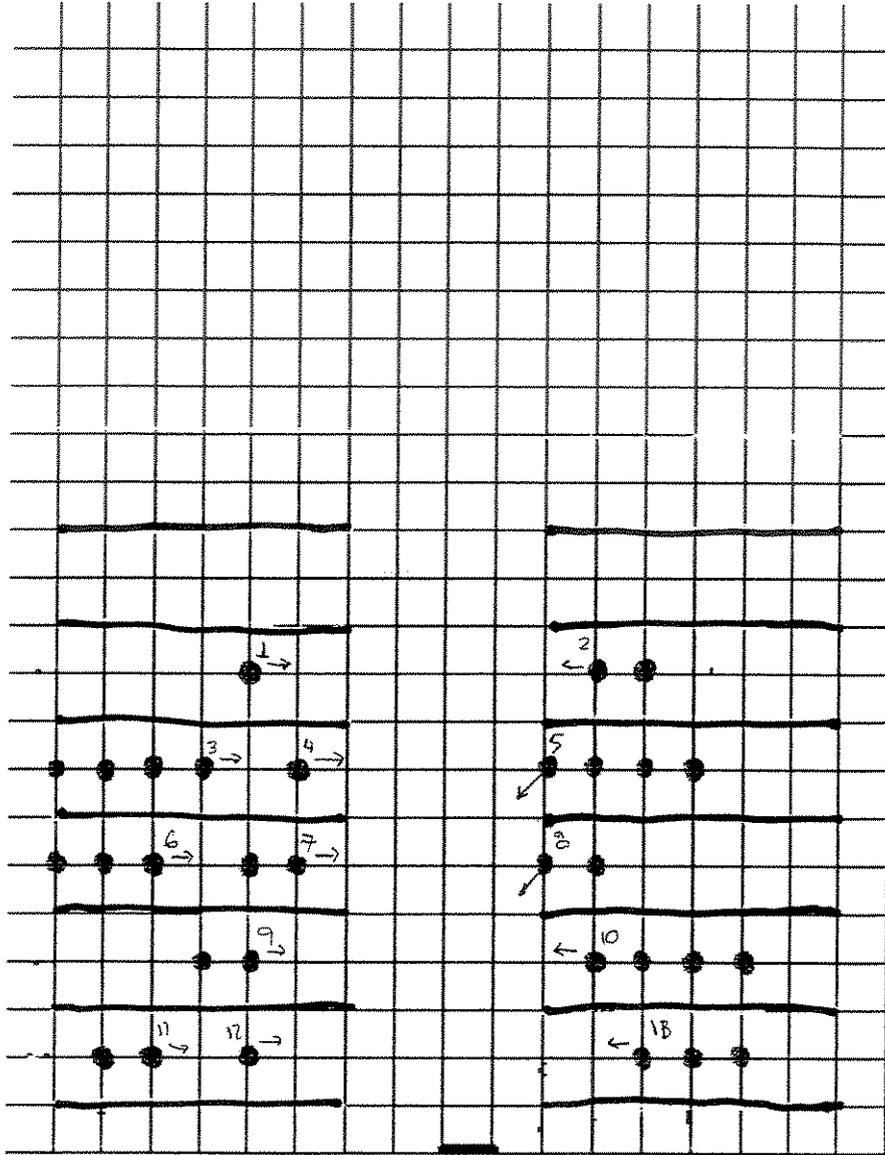
Notas de aula da disciplina de graduação “Economia e Planejamento de Sistemas de Transportes” (PTR2451) da Escola Politécnica da USP

Notas de aula da disciplina de graduação “Hidrologia Aplicada” (PHD2307) da Escola Politécnica da USP

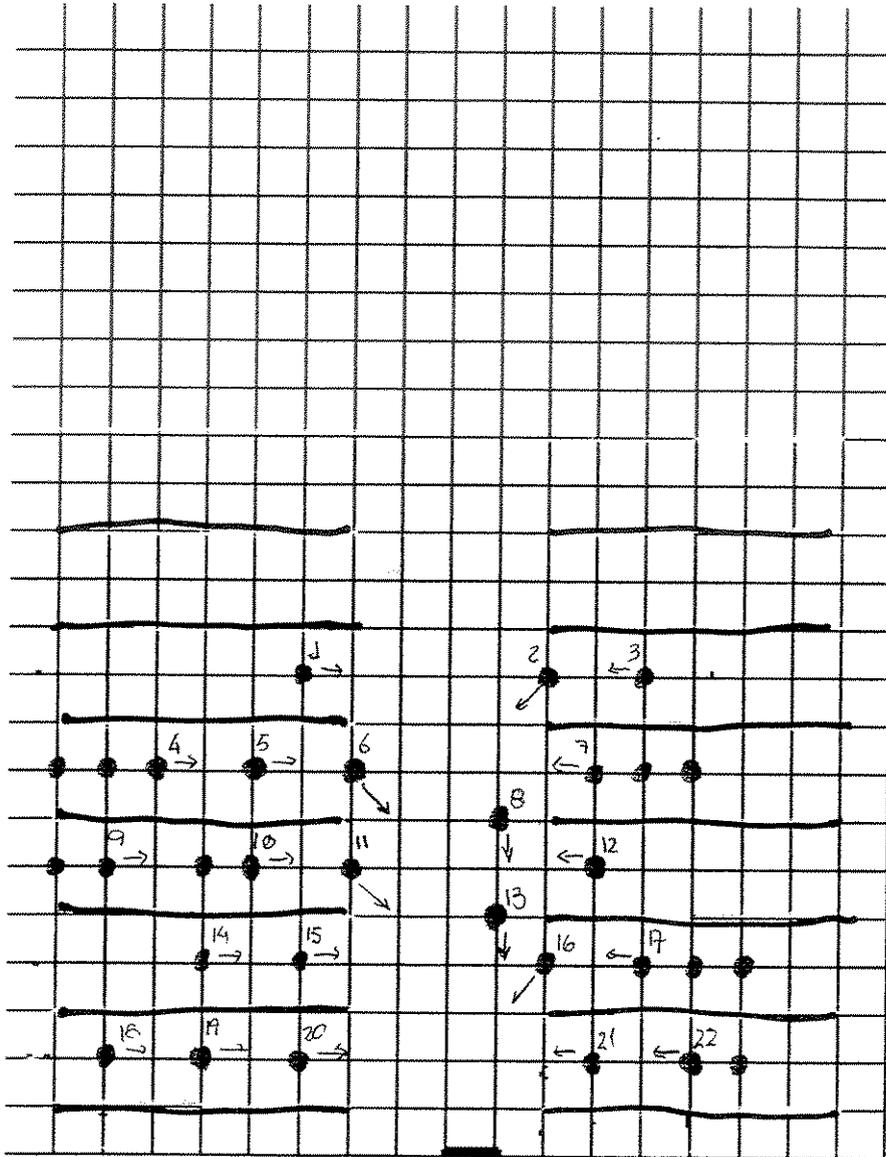
## **Anexo**

Simulação da evacuação da sala de aula da engenharia agrícola realizada pelo algoritmo proposto e iterada segundo a segundo.

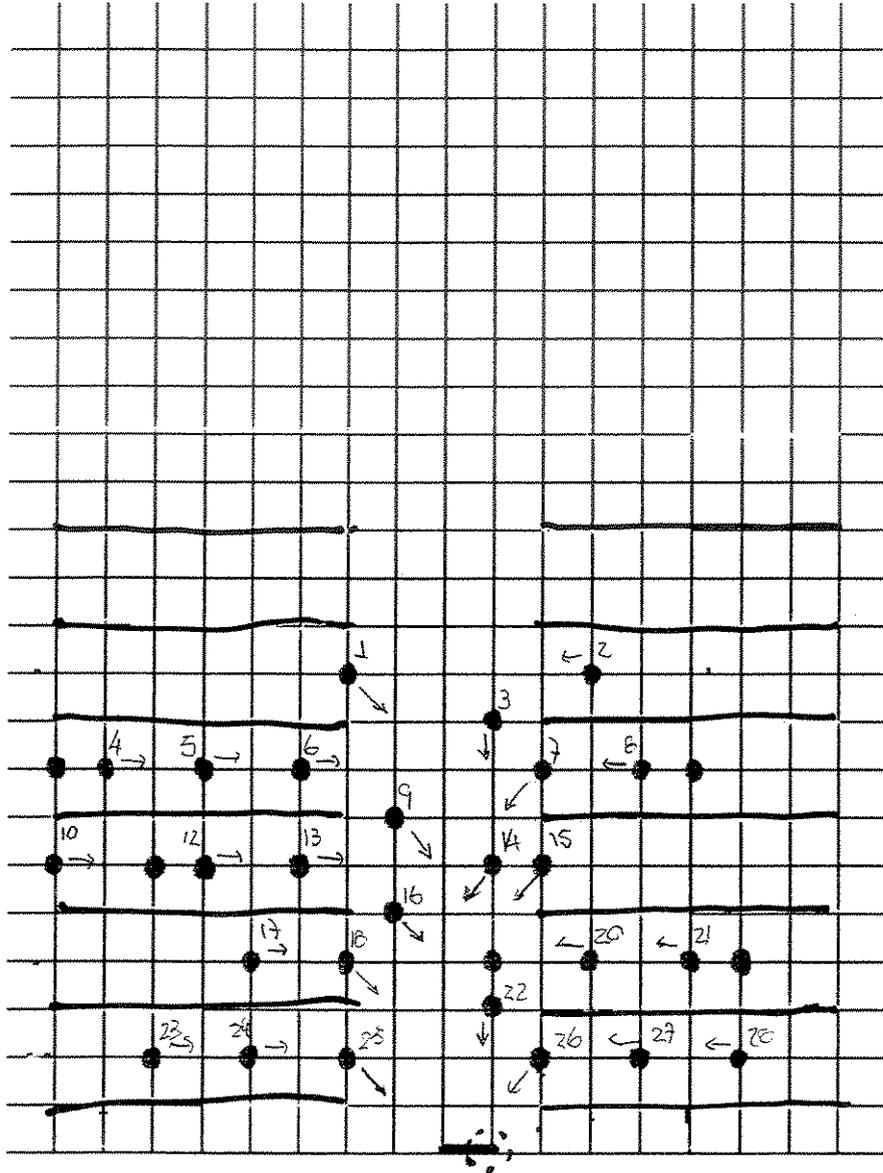
T=0,0 sec



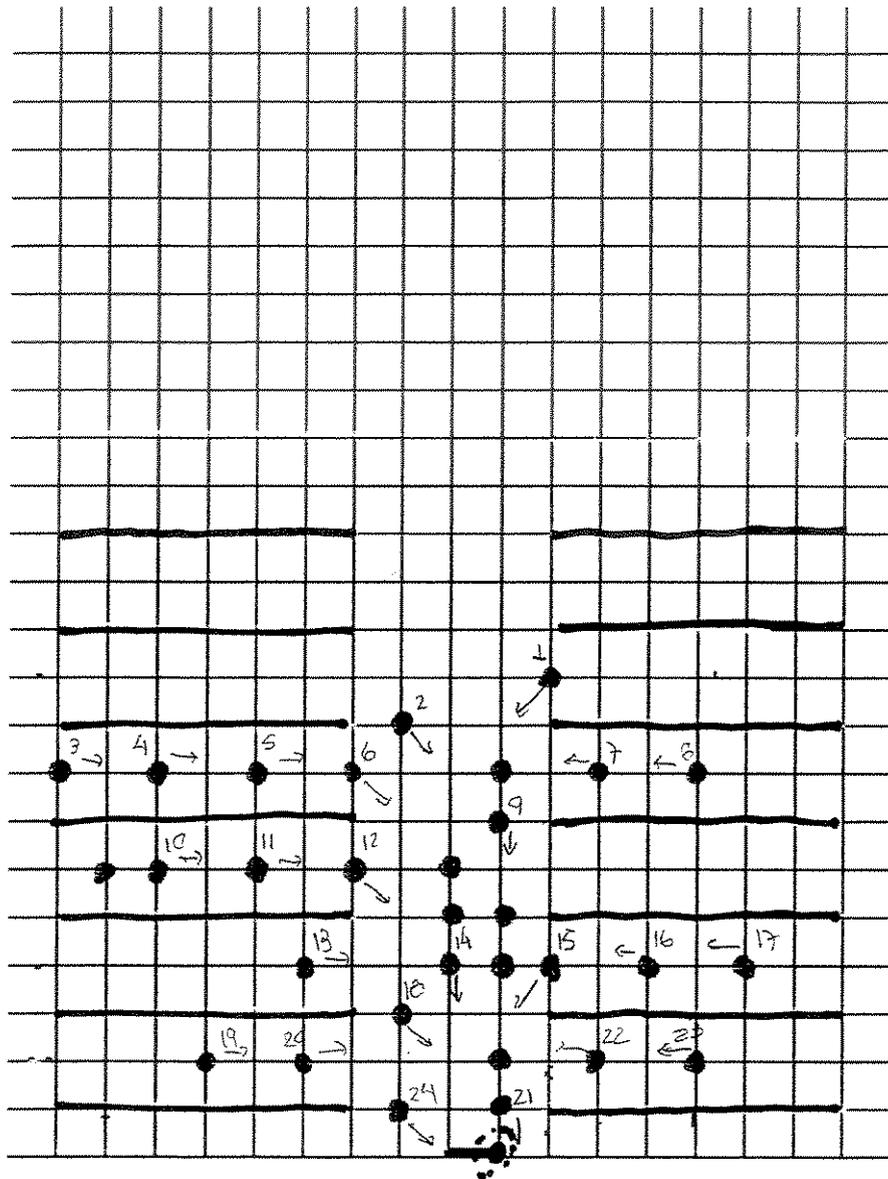
$T = LC \text{ sec}$



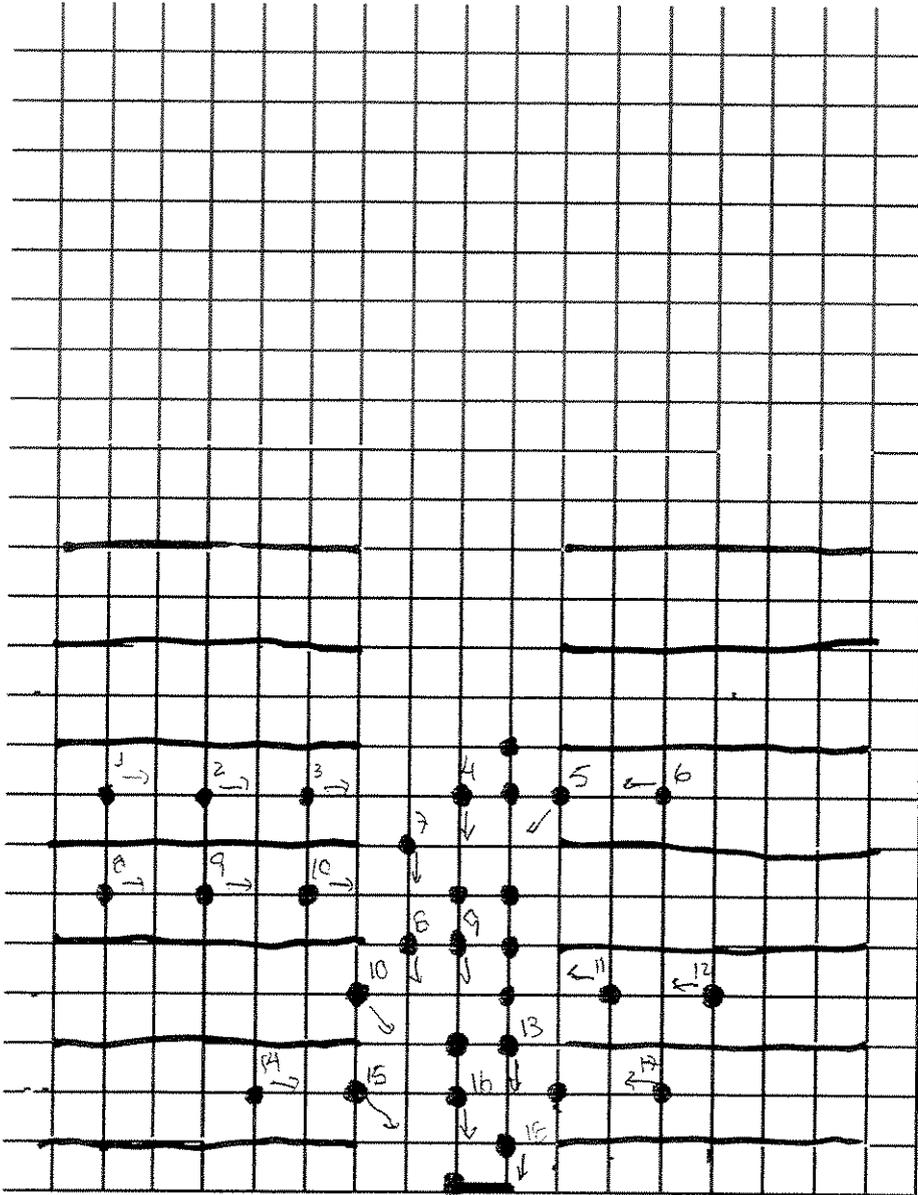
T = 20 sec



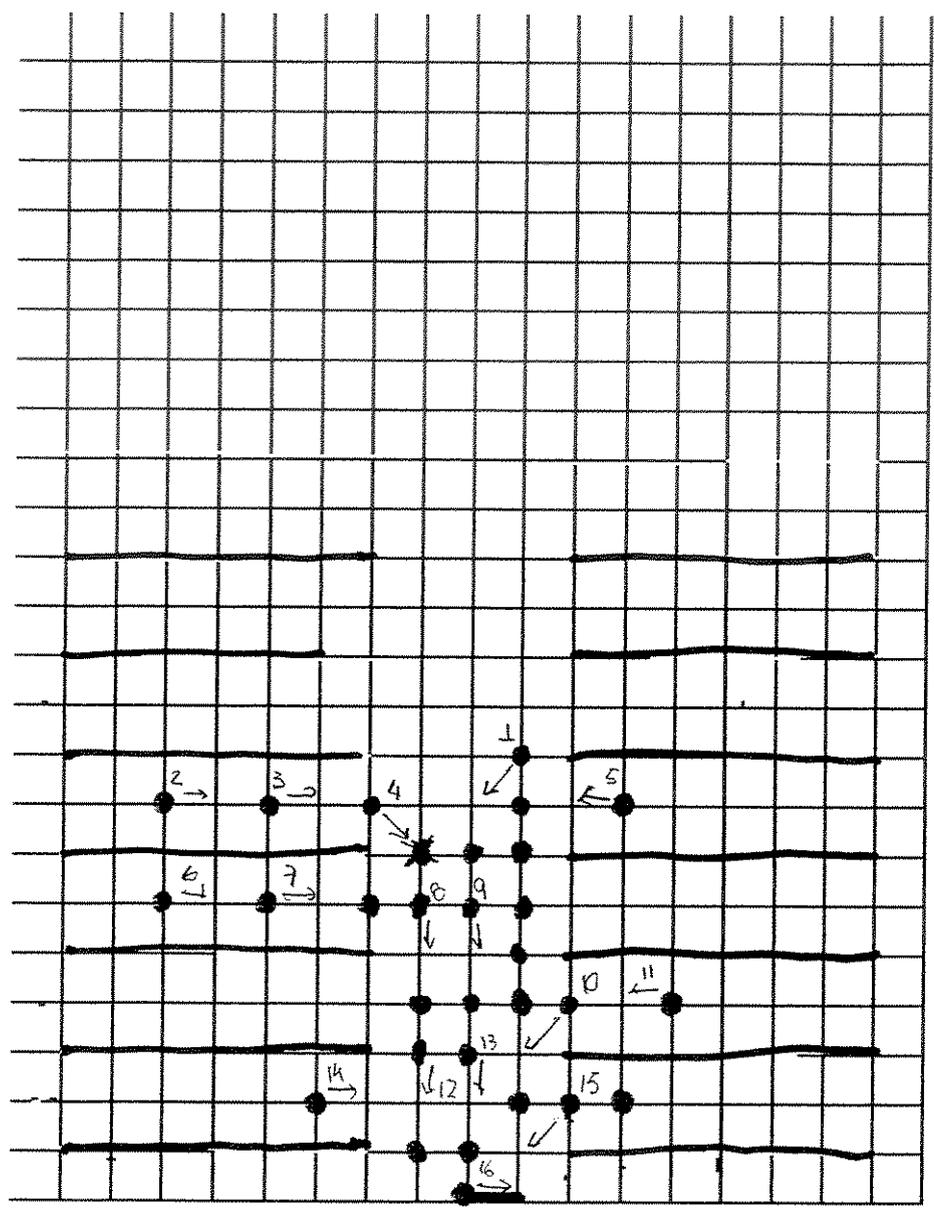
$$T = 3,0 \text{ seg}$$



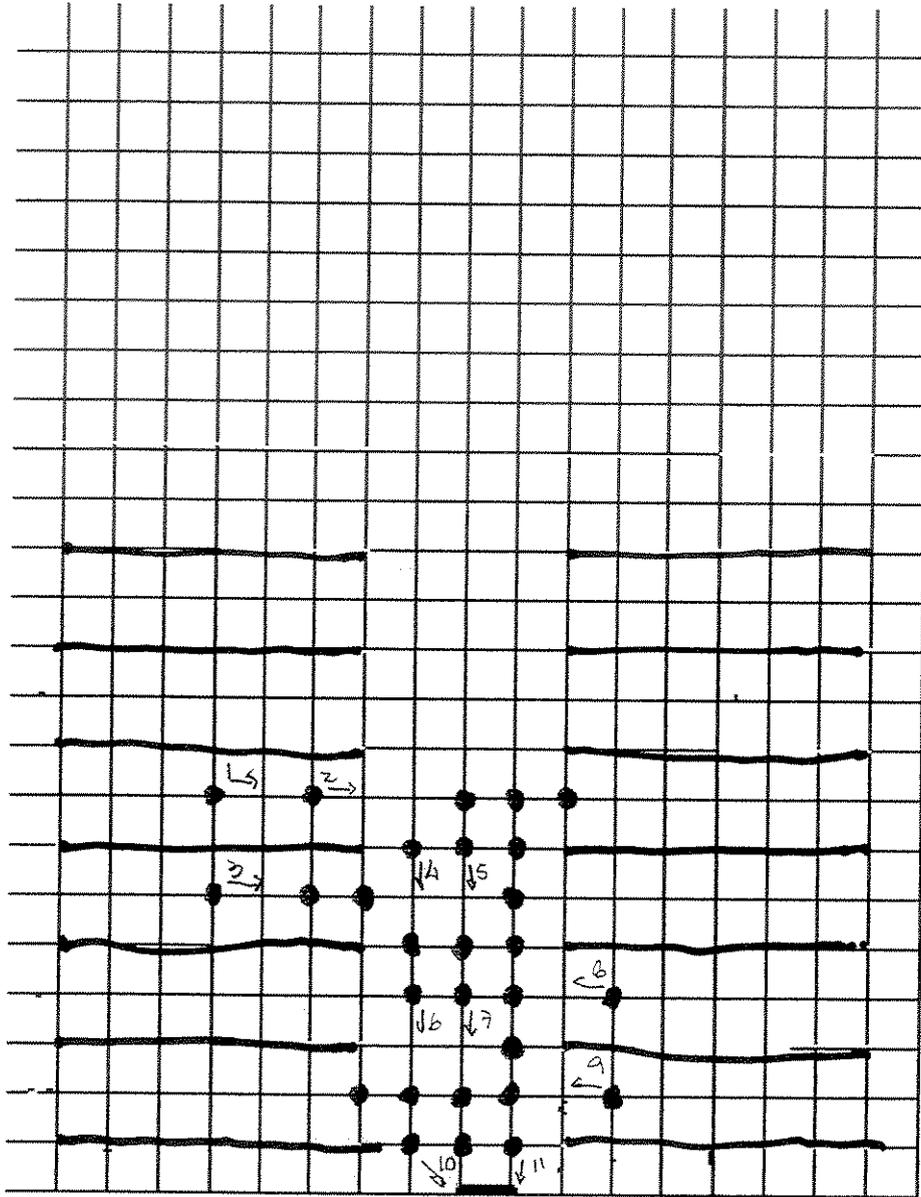
T-4000 (F. p. 1000. 1000)



$T = 30 \text{ sec}$

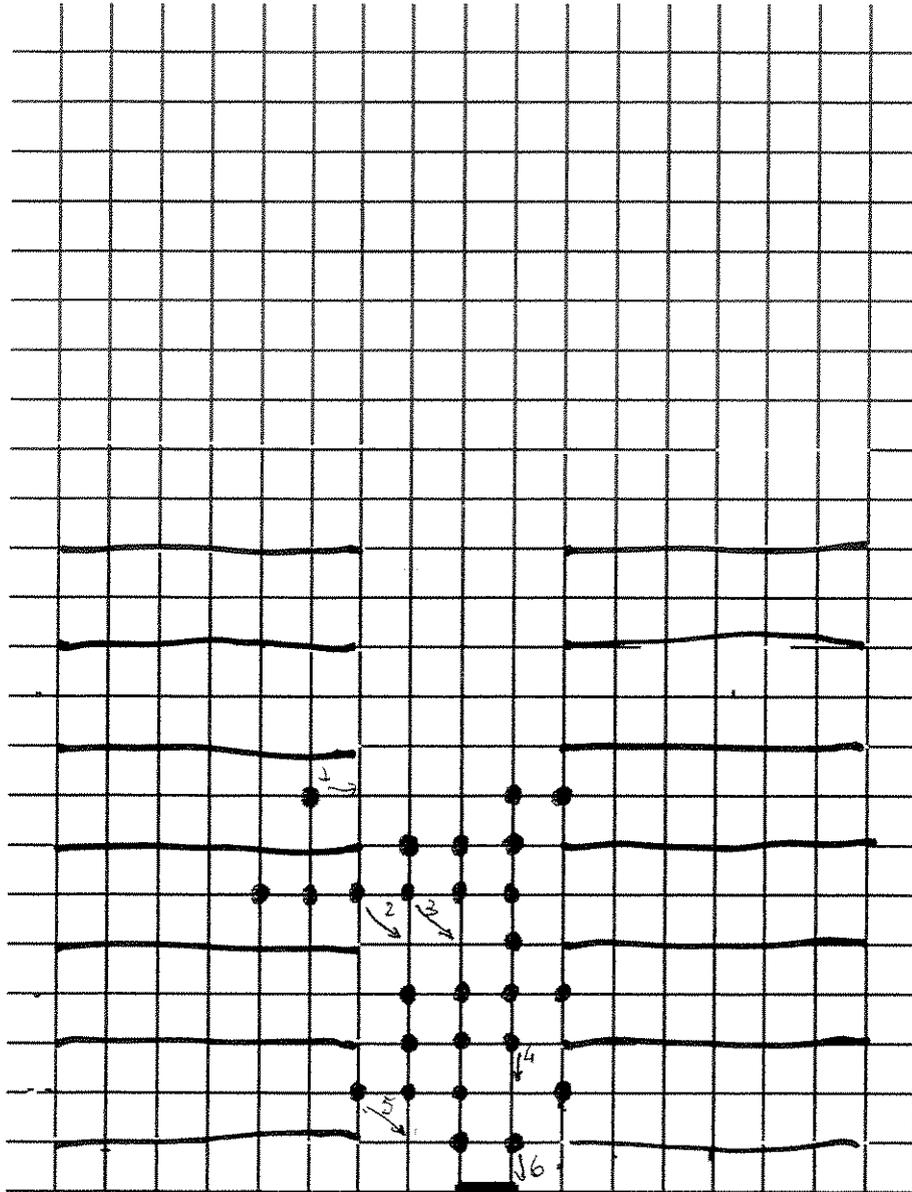


$T = 6.0 \text{ sec}$

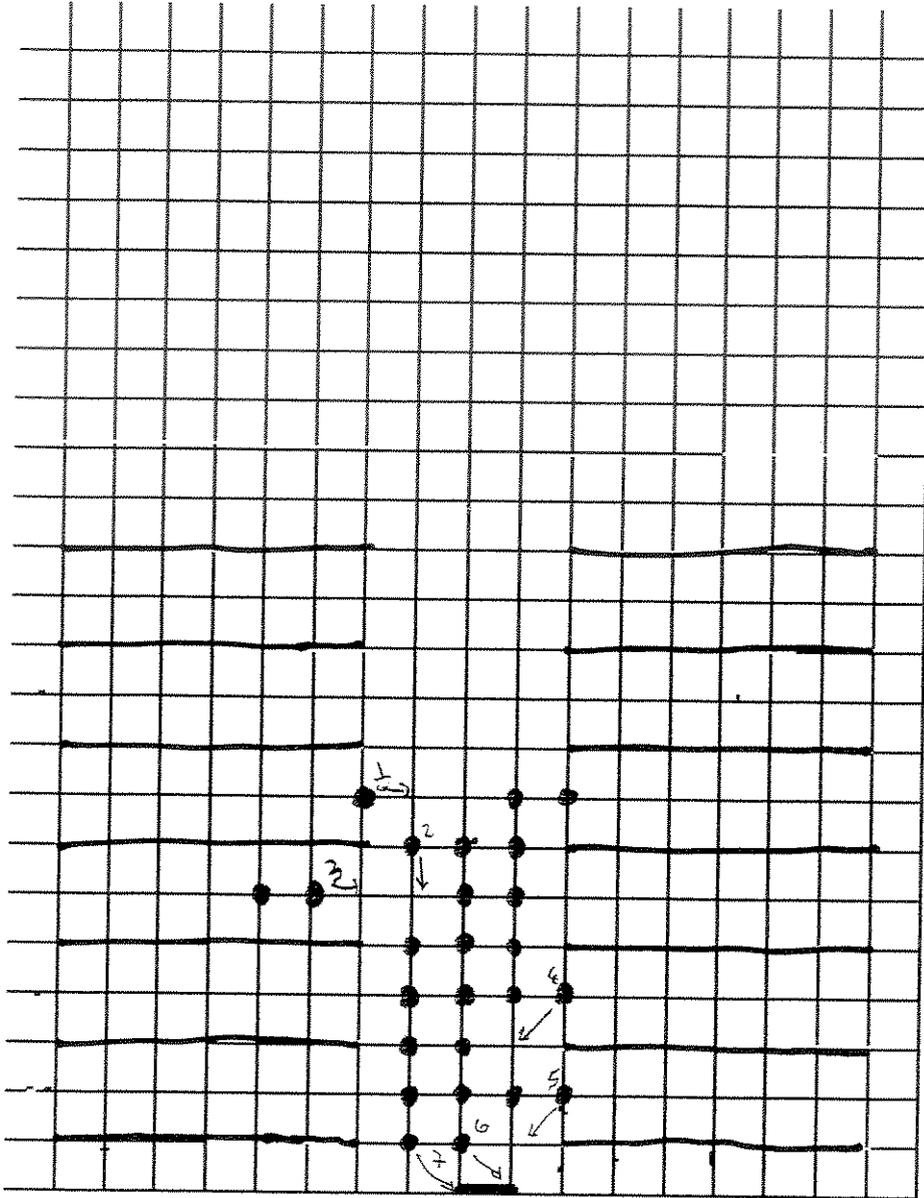




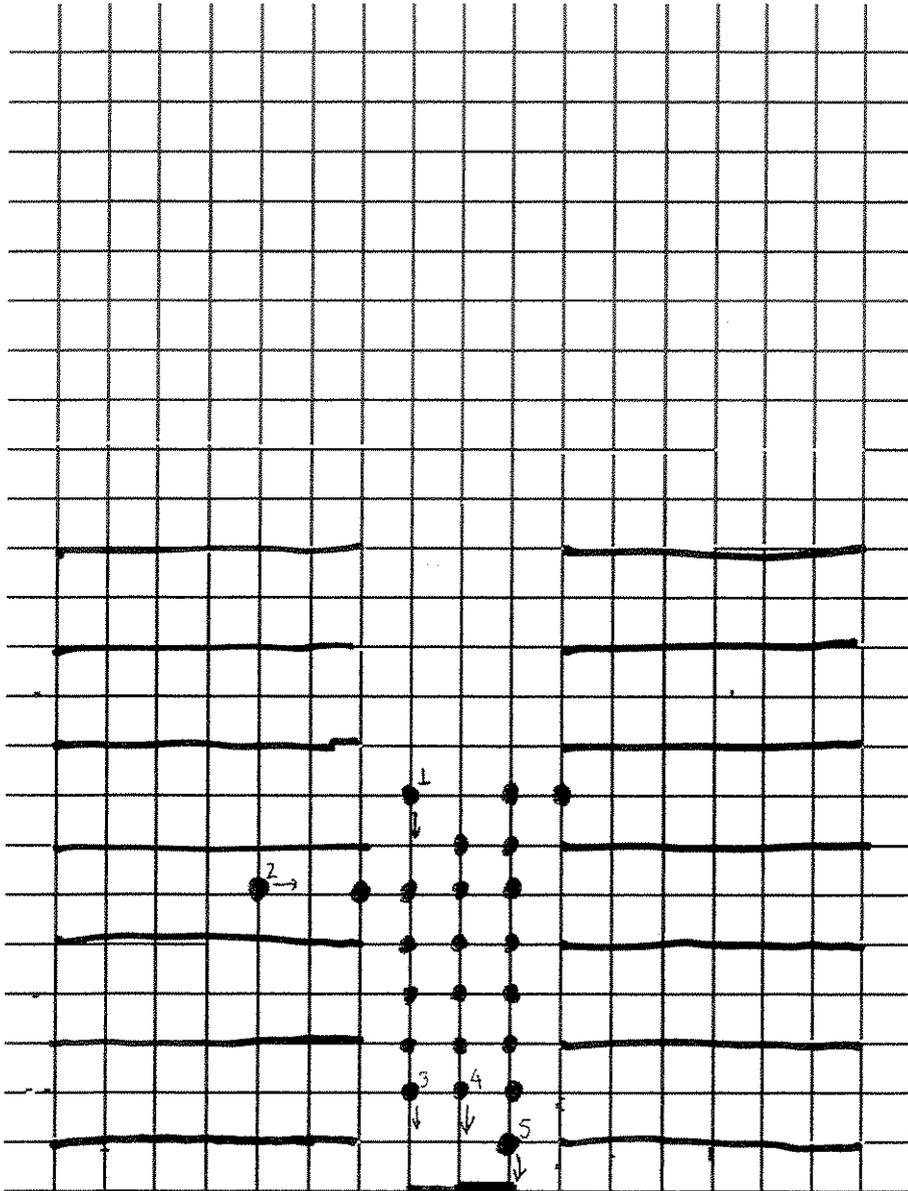
$T = 30 \text{ seg.}$



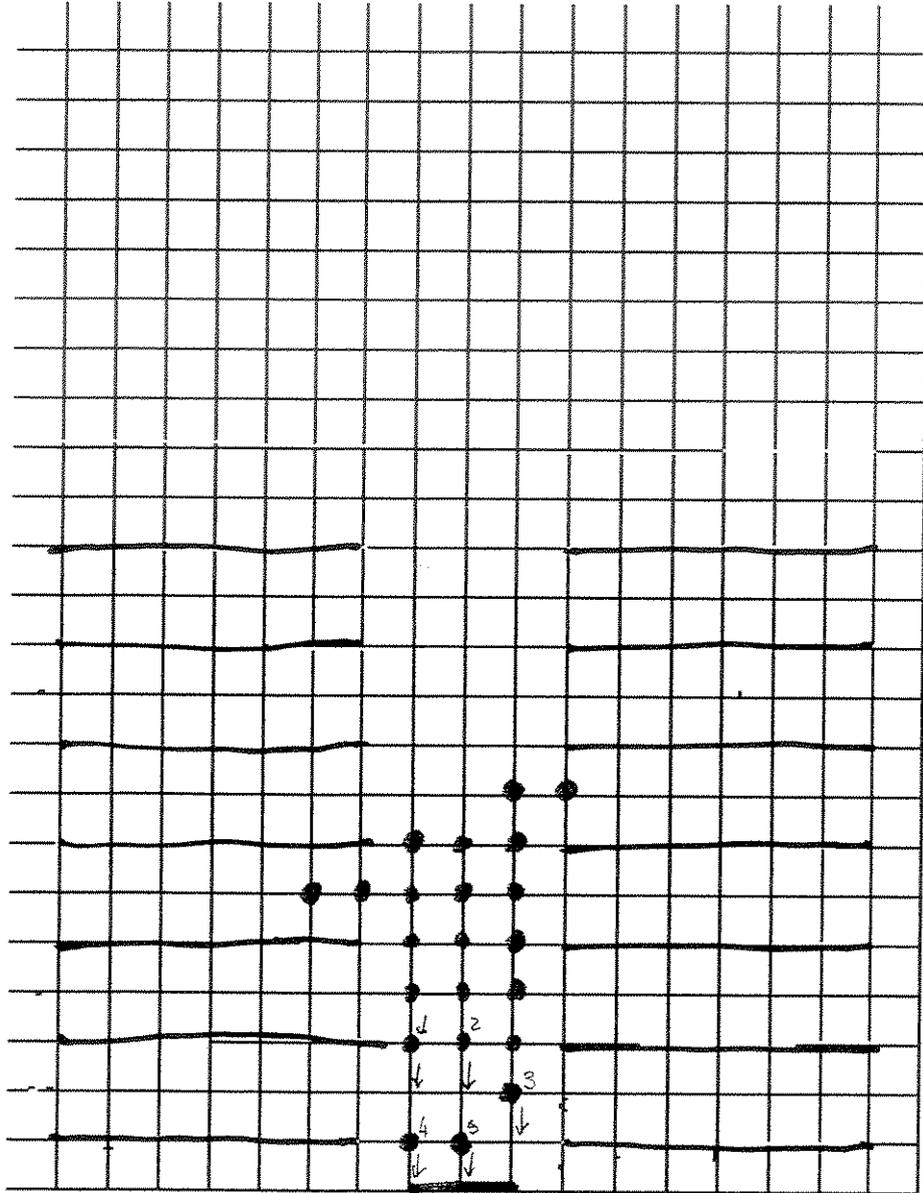
$$T = 9,0509$$



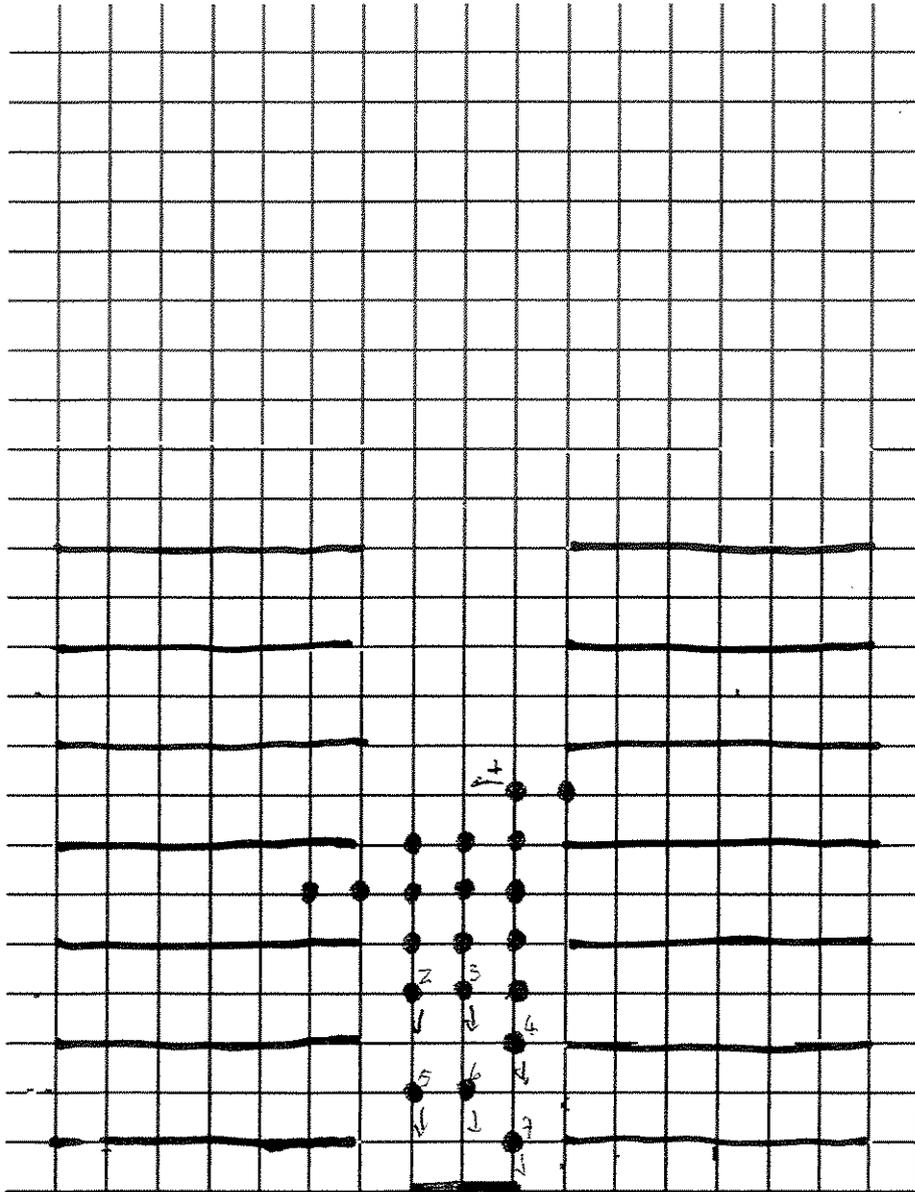
$T = 10,0 \text{ seg}$  (A segunda parte se abre)



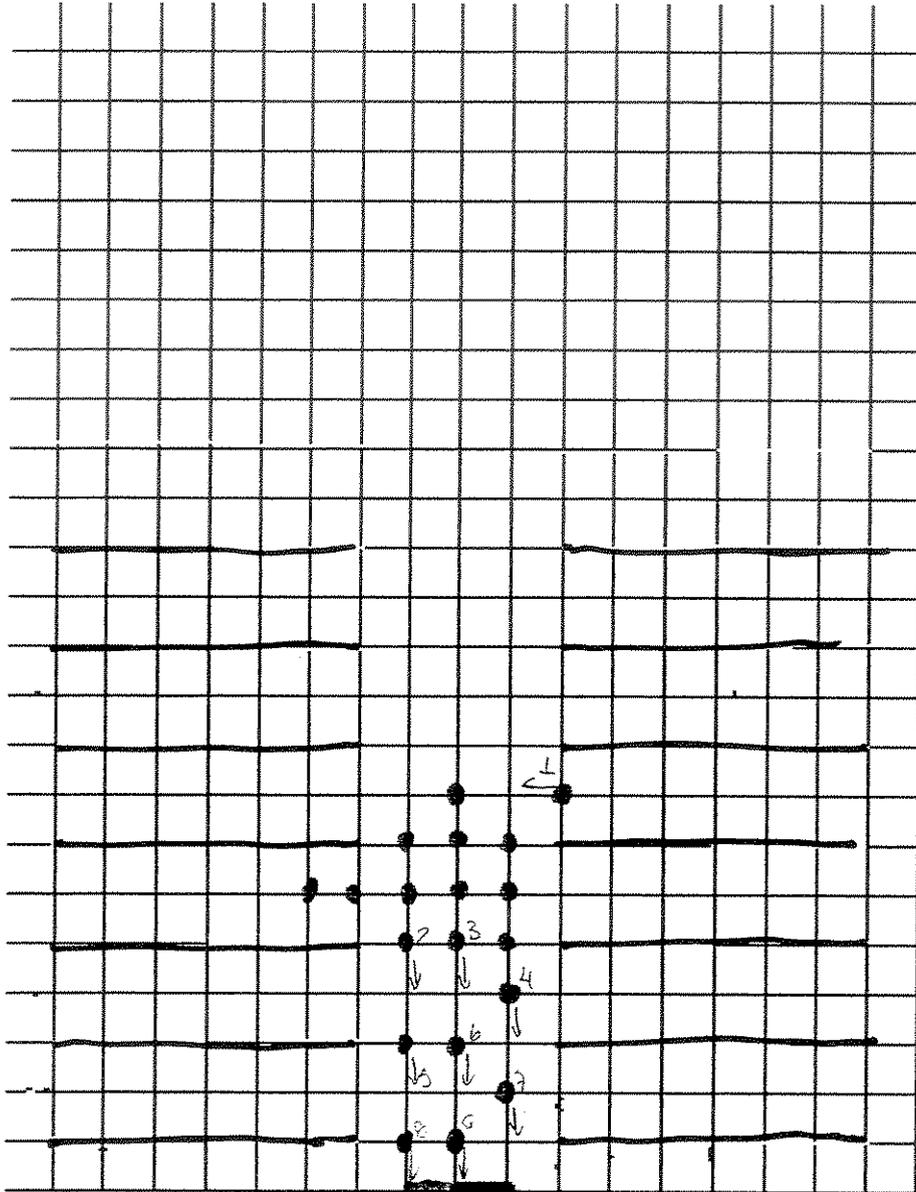
$T = 11,0 \text{ seg}$



$T = 12.0 \text{ sec}$

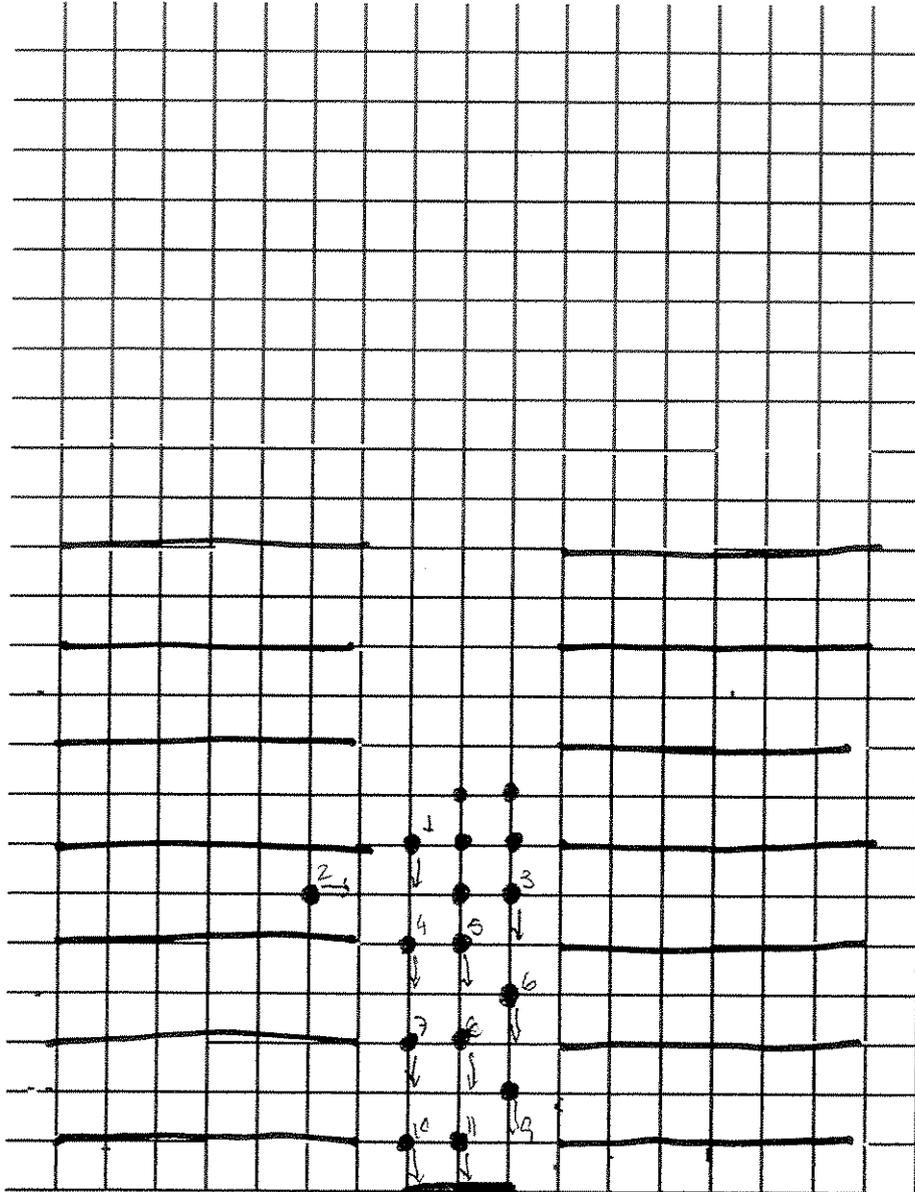


$\nabla = 13,0$  

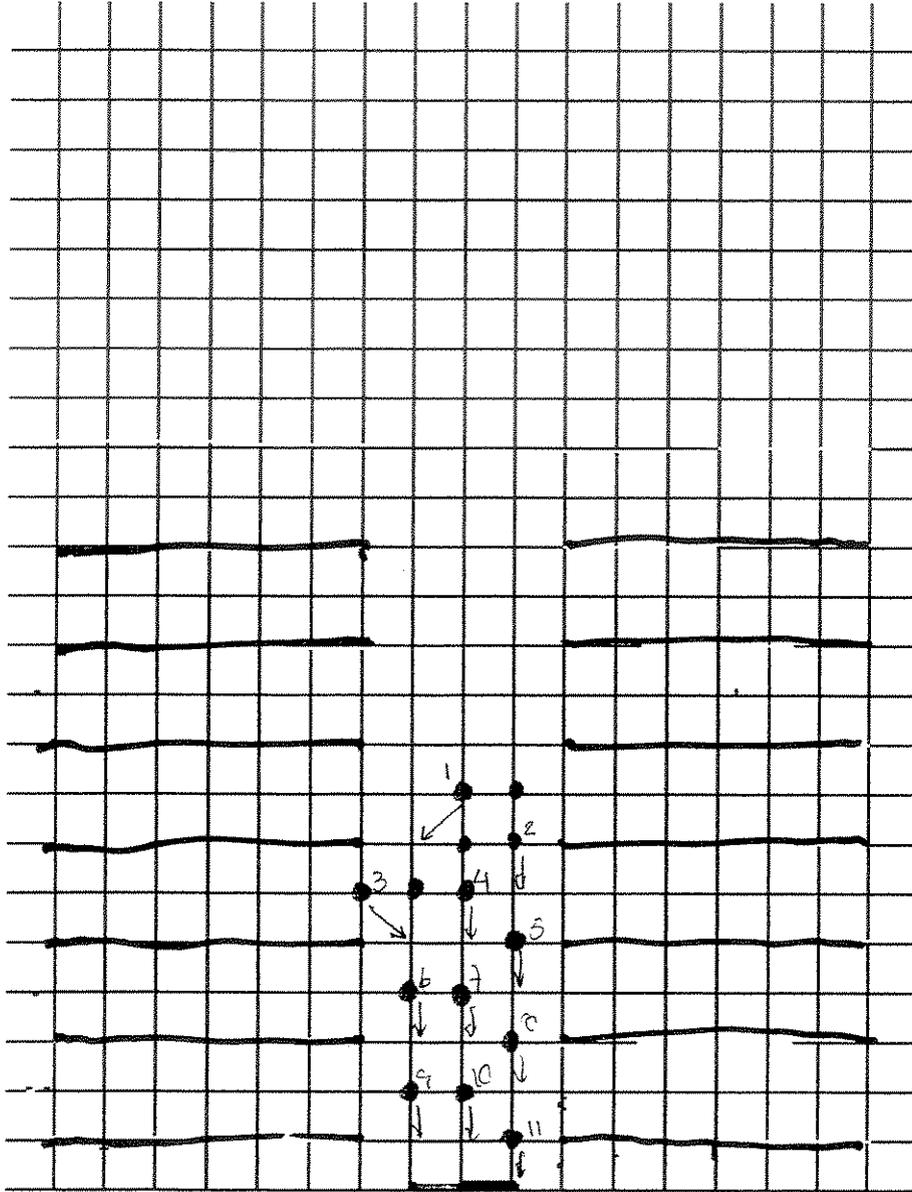




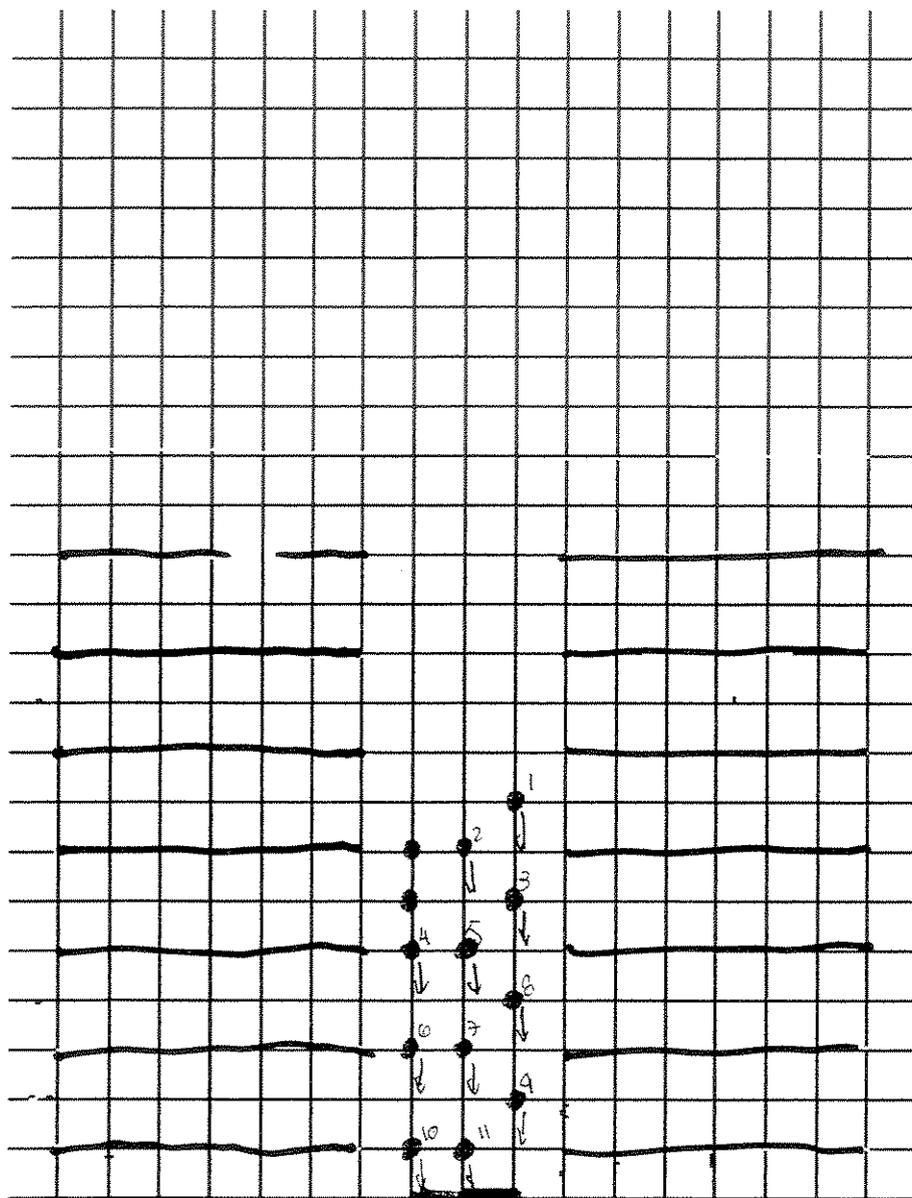
$$T = 15,0 \text{ cal/g}$$



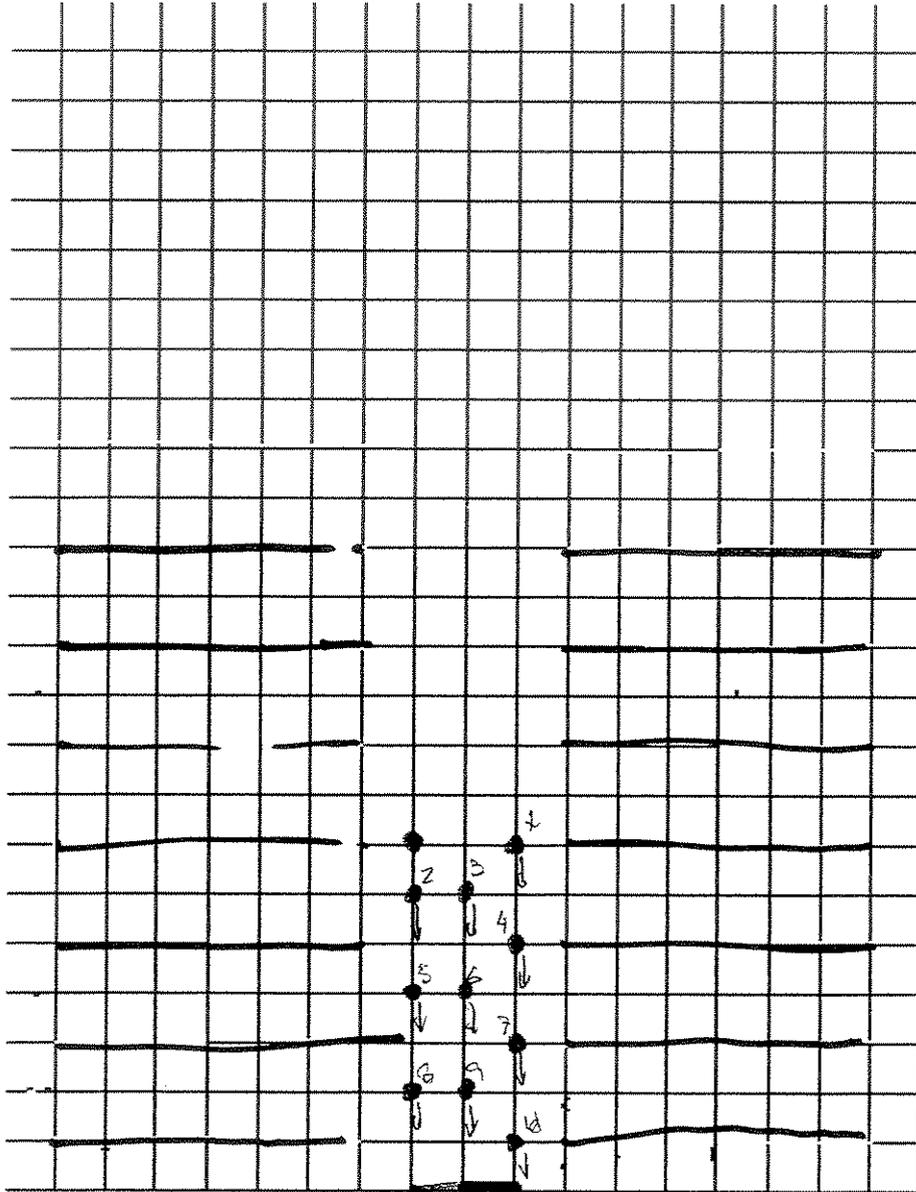
$$T = 16,0 \text{ seg}$$



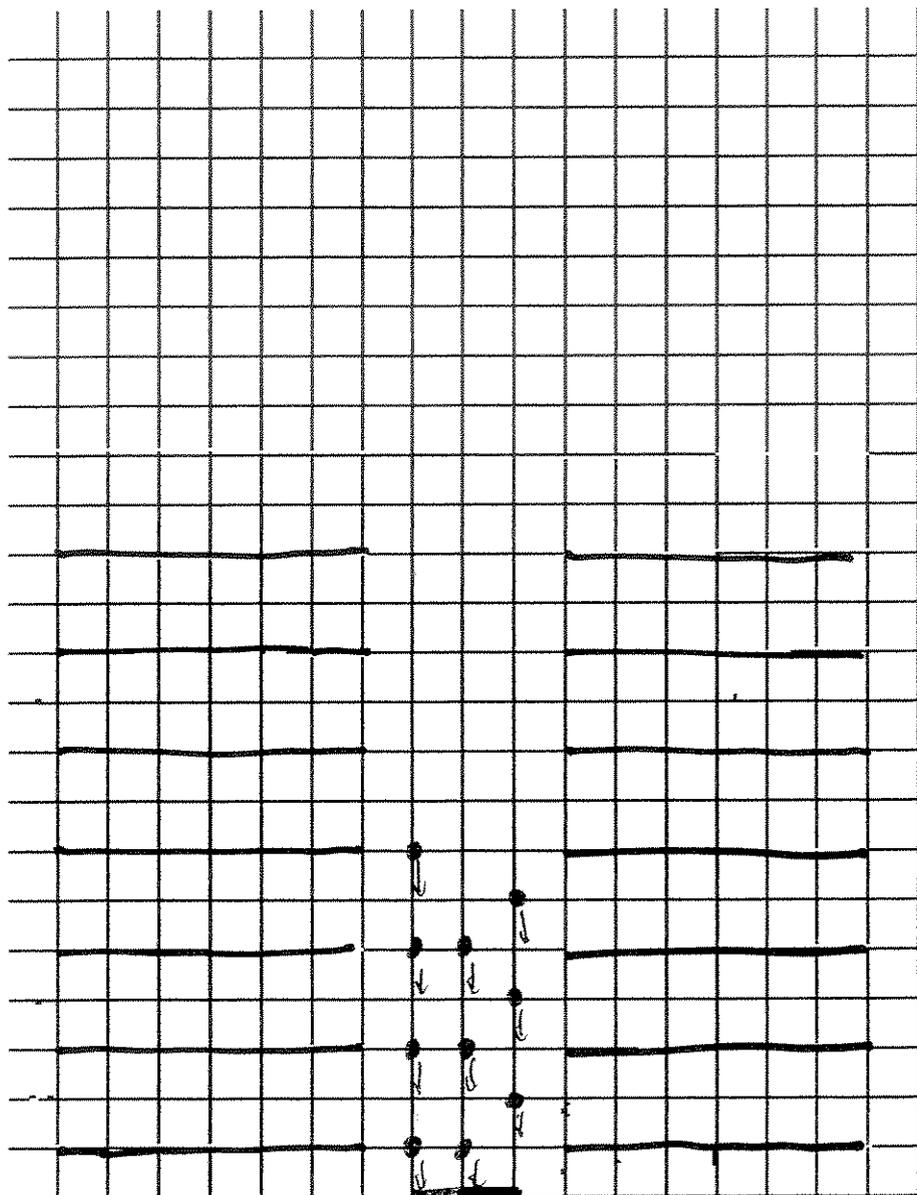
$$T = 17,0 \text{ seg}$$



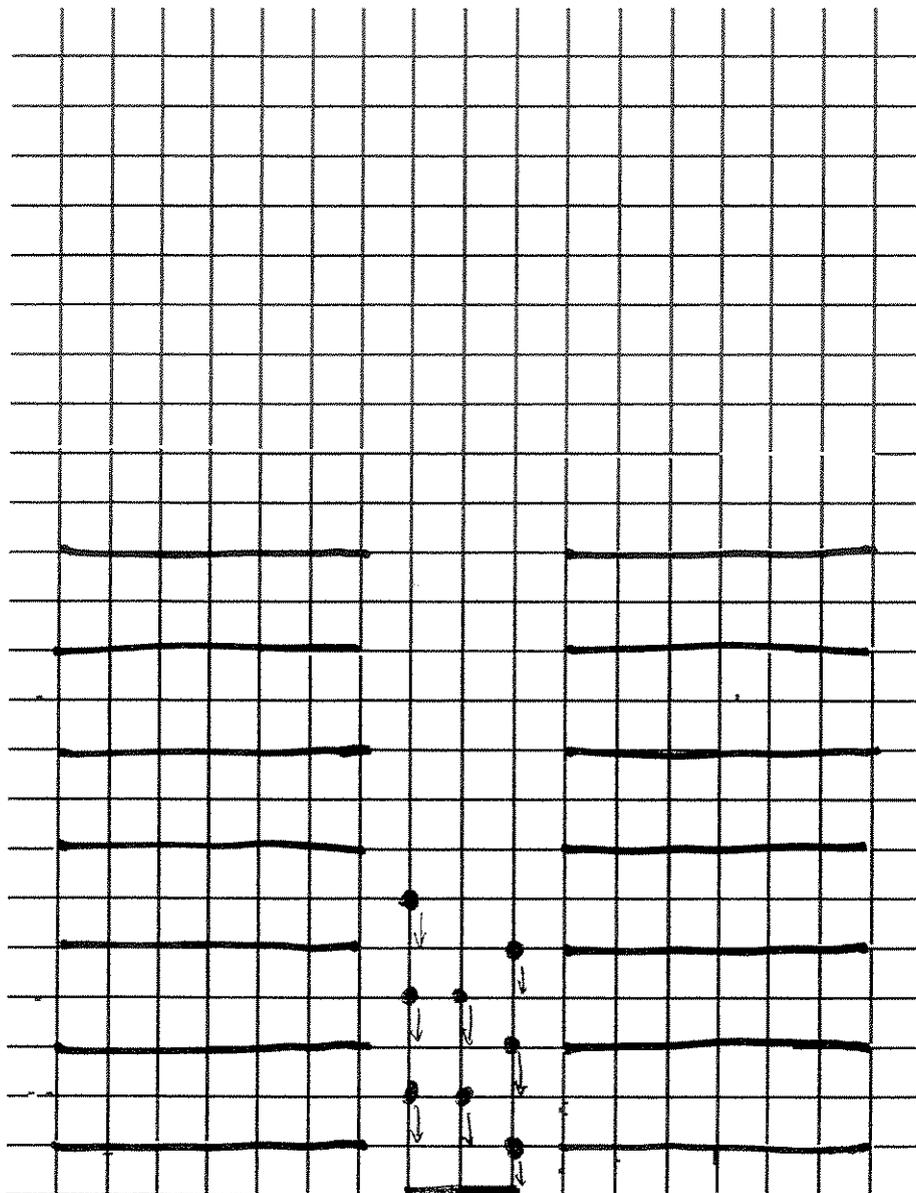
$T = 100 \text{ seg}$



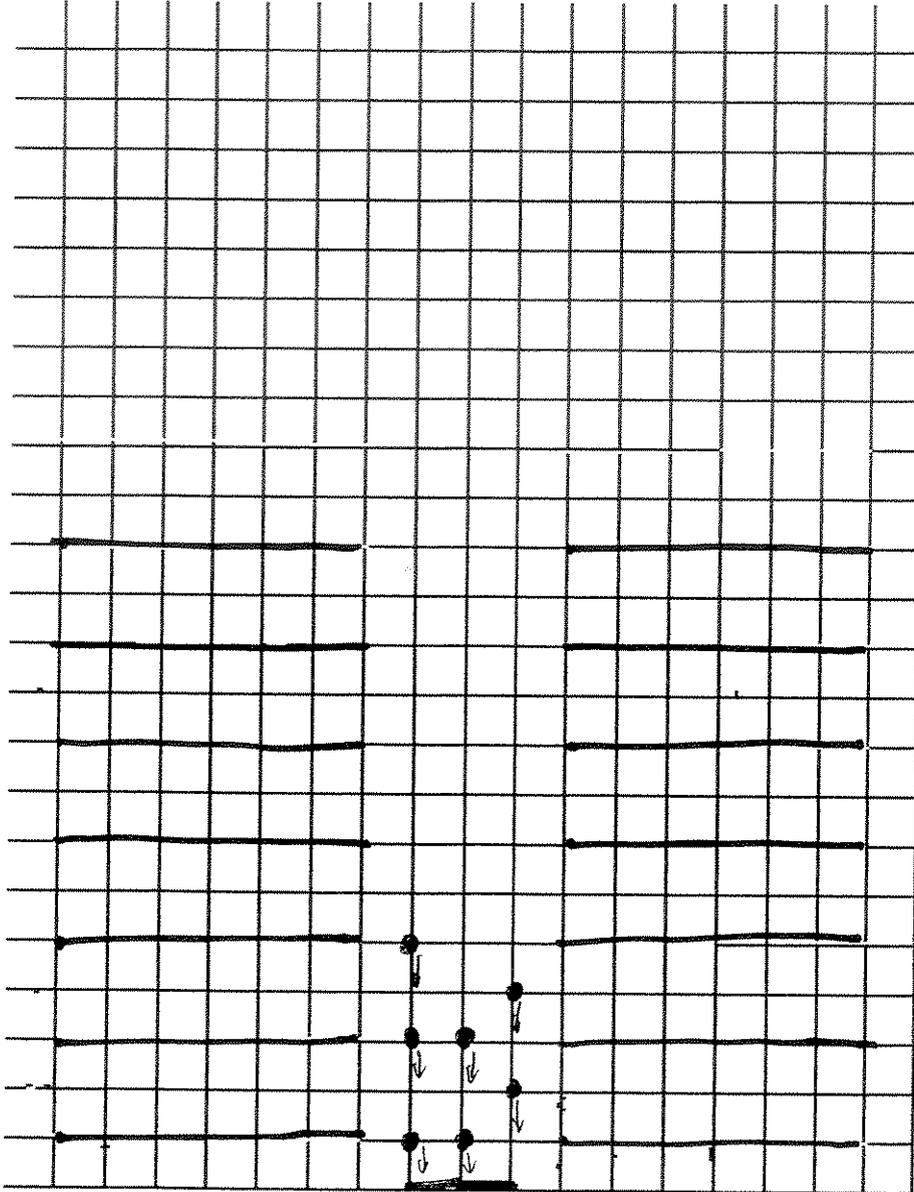
T = R, Q seq



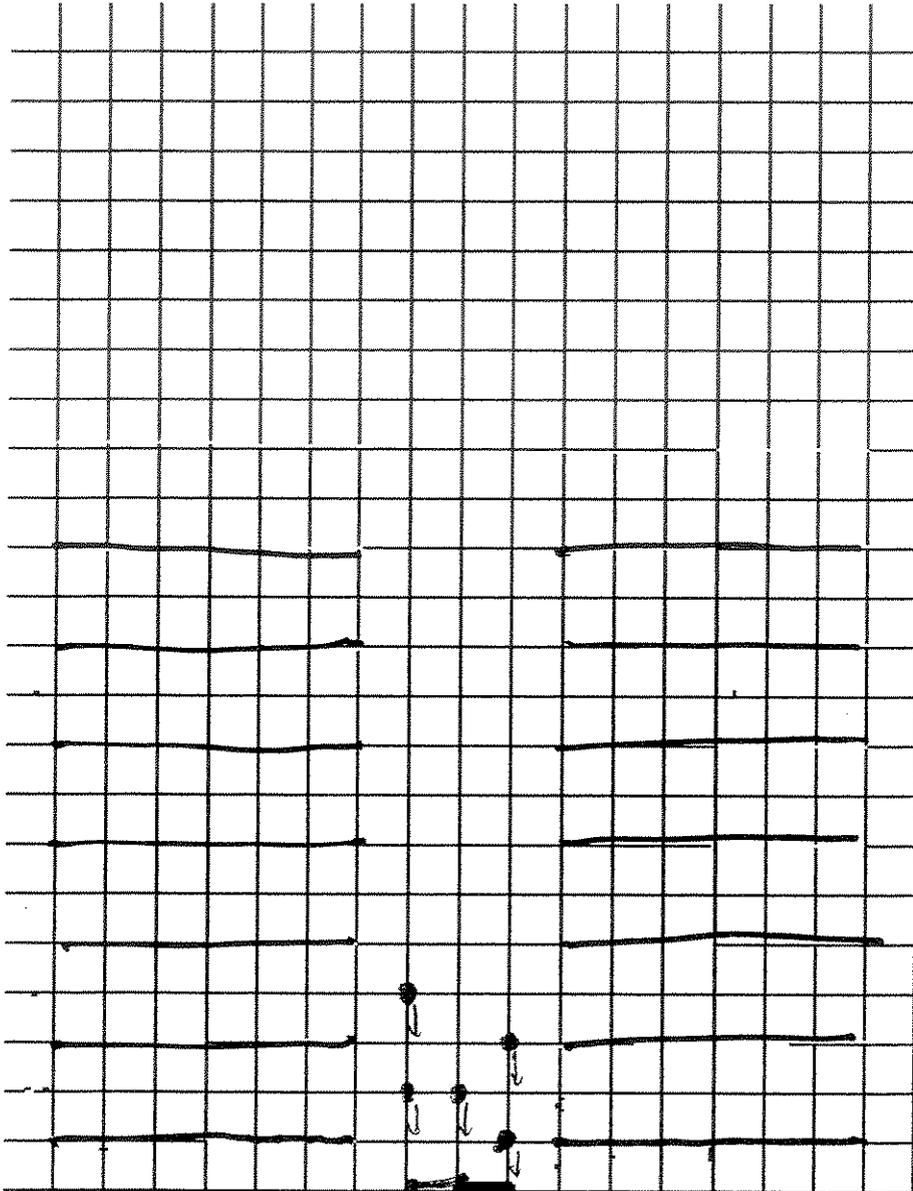
$T = 20.0 \text{ s}$



$$T = 21,0 \text{ seg}$$

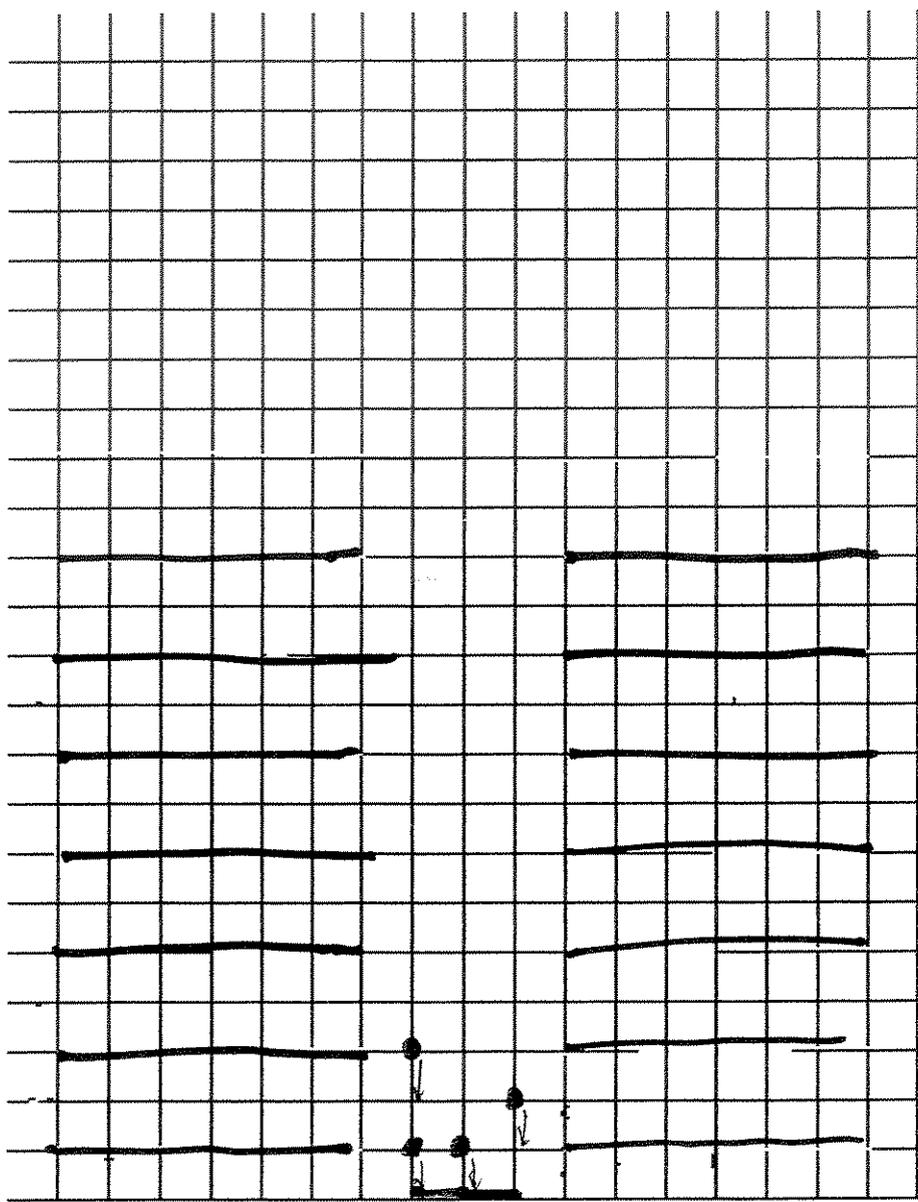


$T = 22.0 \text{ sec}$

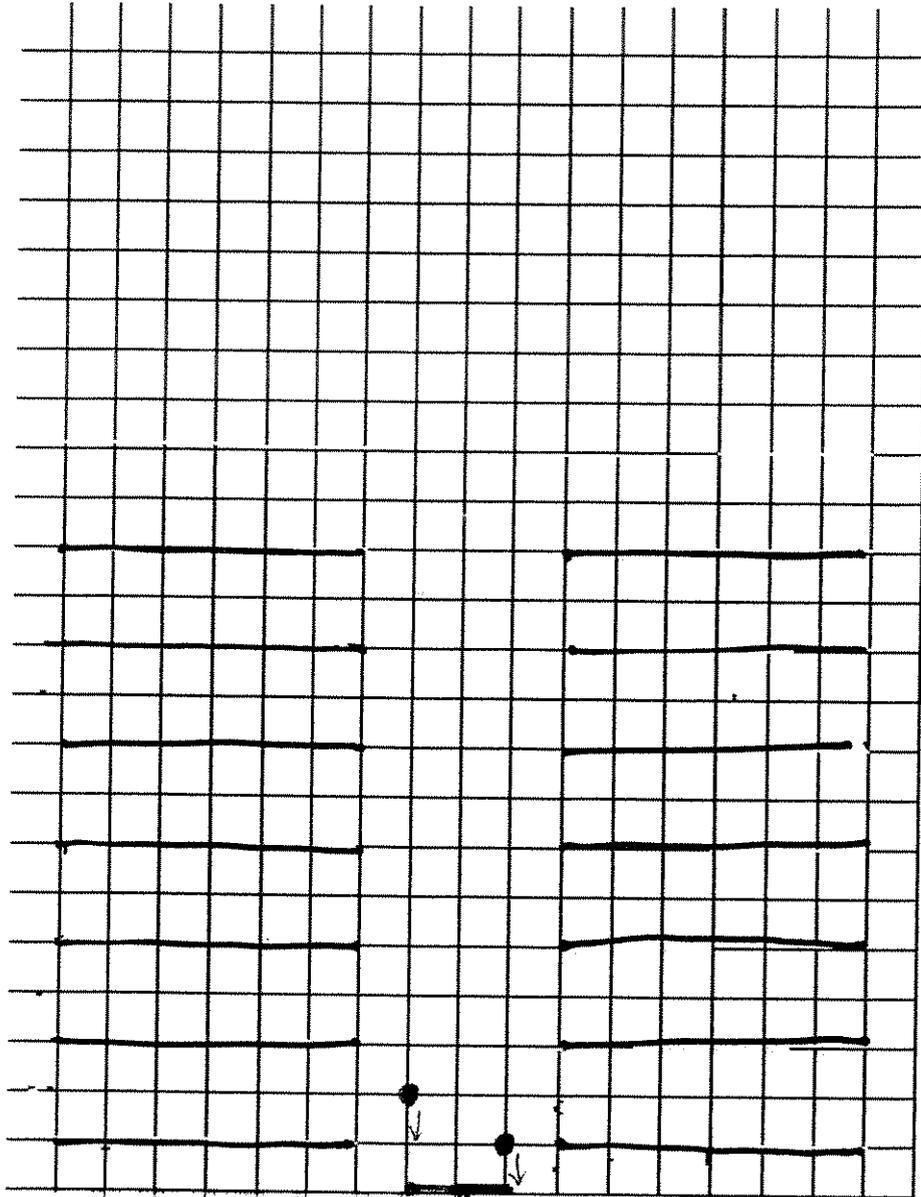


Handwritten text at the top of the page, possibly a title or header.

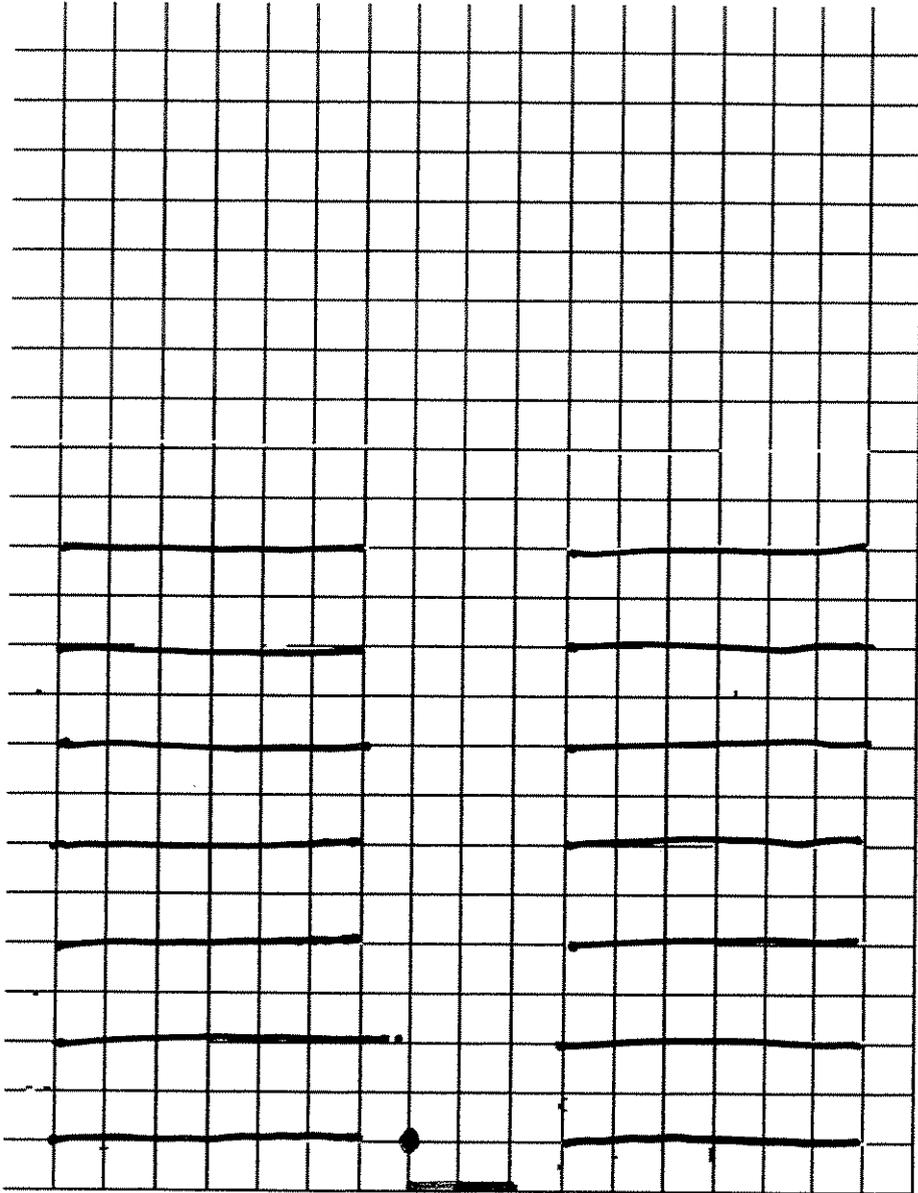
$$T = 23,0 \text{ sec}$$



$\Delta = 248$  100



$T = 23,0 \text{ sec}$



$T = 76,0 \text{ seg}$  (FWA/DA EVACUACAO)

