



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

MAURÍCIO GUIMARÃES DE OLIVEIRA

**ESTRUTURAS DINÂMICAS ARTICULADAS
PANTOGRÁFICAS - APLICAÇÕES EM
ARQUITETURA MEDIADAS POR SIMULAÇÕES
PARAMÉTRICAS**

CAMPINAS
2016

MAURÍCIO GUIMARÃES DE OLIVEIRA

**ESTRUTURAS DINÂMICAS ARTICULADAS
PANTOGRÁFICAS - APLICAÇÕES EM
ARQUITETURA MEDIADAS POR SIMULAÇÕES
PARAMÉTRICAS**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de Arquitetura, Tecnologia e Cidade.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO MAURÍCIO GUIMARÃES DE OLIVEIRA E ORIENTADO PELA PROFA. DRA. ANA LÚCIA NOGUEIRA DE CAMARGO HARRIS.



CAMPINAS
2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

OL4e Oliveira, Maurício Guimarães de, 1982-
Estruturas dinâmicas articuladas pantográficas - aplicações em arquitetura mediadas por simulações paramétricas / Maurício Guimarães de Oliveira. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Arquitetura. 2. Algoritmos - Métodos de simulação. 3. Arquitetura - Simulação por computador. 4. Geometria dinâmica. 5. Modelos geométricos. I. Harris, Ana Lúcia Nogueira de Camargo, 1962-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Dynamic scissor-like structures - architectural applications mediated by parametric simulations

Palavras-chave em inglês:

Architecture

Algorithms - Simulation methods

Architecture - Computer simulation

Geometry dynamics

Geometric models

Área de concentração: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Titulação: Mestre em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Banca examinadora:

Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris [Orientador]

Doris Catharine Cornélie Knatz Kowaltowski

Tales Bohrer Lobosco Gonzaga de Oliveira

Data de defesa: 29-08-2016

Programa de Pós-Graduação: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

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

**ESTRUTURAS DINÂMICAS ARTICULADAS
PANTOGRÁFICAS - APLICAÇÕES EM ARQUITETURA
MEDIADAS POR SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS**

MAURÍCIO GUIMARÃES DE OLIVEIRA

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

**Profa. Dra. Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris
Presidente e Orientadora / UNICAMP**

**Profa. Dra. Dóris Catharine Cornélie Knatz Kowaltowski
UNICAMP**

**Prof. Dr. Tales Bohrer Lobosco Gonzaga de Oliveira
UFMG**

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se
no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 29 de agosto de 2016

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

À Ana Lúcia, minha orientadora, por toda a colaboração e imensa paciência comigo ao longo dos três anos e meio de aprendizado na Unicamp.

À Nina, por todo amor e companheirismo dedicados a mim, que me permitiram iniciar e finalizar esse trabalho.

À minha família, por todo o carinho e incentivo para realização dessa pesquisa.

Às amigas Ana Paula Rocha e Renata Beltramin pelas conversas, jantares, vinhos, desabafos, trabalhos, elucubrações, fofocas e articulações "malévolas".

À Márcia Anaf por me apresentar o "fantástico mundo de Hoberman"!

Aos Professores Tales Lobosco, Daniel Moreira e Doris Kowaltowski pelas incontáveis e preciosas contribuições a esta pesquisa.

Aos amigos Luciana Mascaro, Alexandre Palma, Elisa Cox, Doriane Azevedo, Tula Kirst, Leonardo Prazeres e Osvaldo Paris, professores da UFMT e companheiros cotidianos que me auxiliaram muito durante o desenvolvimento da dissertação.

Aos docentes integrantes do programa de pós-graduação ATC FEC/Unicamp que me abriram portas para mundos incríveis.

Ao Eduardo, ao Diego e demais funcionários da Secretaria de Pós-Graduação da FEC/Unicamp por serem sempre tão atenciosos e prestativos.

À Universidade Federal de Mato Grosso por todo apoio ao desenvolvimento desta dissertação.

À Universidade Estadual de Campinas, por três anos e meio memoráveis e transformadores.

RESUMO

Em 1961, Emílio Pérez Piñero desenvolveu a primeira cobertura dinâmica (pantográfica) na escala de edifício: uma estrutura articulada desenvolvida para espetáculos de teatro itinerante. Desde então, diversos pesquisadores têm realizado avanços na investigação e desenvolvimento dessa tecnologia, na qual temos como principais nomes: You e Pellegrino (1996), Escrig et. al. (1995), Hoberman (1988), Korkmaz (2005), Fox e Yeh (2000) e outros, realizando suas pesquisas em diversos países e numa gama cada vez maior de áreas, expandindo as possibilidades de aplicação em edificações diversas. As tecnologias desenvolvidas permitem resolver diferentes problemas envolvendo: abrigos efêmeros, edifícios dinâmicos, coberturas dinâmicas, logística, engenharia aeroespacial, entre outras. No Brasil, poucas pesquisas acadêmicas foram desenvolvidas, e menos ainda aplicadas à soluções arquitetônicas efetivamente experimentadas e construídas. Os sistemas dinâmicos se dão através de peças fixas articuláveis, sistemas pantográficos articulados (*scissor-like systems*), estruturas tensionadas e infláveis. No âmbito desse panorama histórico, este trabalho tem por objetivo secundário levantar os diversos sistemas desenvolvidos para então classificá-los segundo suas características físicas, pelos tipos de possíveis transformações e pelos tipos de articulações (*Degrees of Freedom*). Como objetivo principal serão pesquisadas as patentes envolvendo articulações pantográficas e serão selecionadas aquelas cujas transformações envolvam uma inovação geométrica, para analisar então seu funcionamento por meio de algoritmos visuais desenvolvidos em software paramétrico, além de modelos físicos reais, visando o entendimento de seu funcionamento e a expansão de sua aplicação. Pretende-se com isso contribuir com a disseminação destes sistemas para colaborar com o desenvolvimento tecnológico na Arquitetura e Construção.

Palavras-chave: Estruturas articuladas; estruturas dinâmicas; estruturas pantográficas; simulação; arquitetura; geometria.

ABSTRACT

In 1961, Emilio Pérez Piñero developed the first dynamic structure (pantograph) in building scale: an articulated structure developed for itinerant theater plays. Since then, many researchers have made breakthroughs in research and development of this technology, in which we have as main names: You and Pellegrino (1996), Escrig et. al. (1995), Hoberman (1988), Korkmaz (2005), Fox and Yeh (2000) and others, carrying out their research in several countries and a range growing areas, expanding application possibilities in various buildings. The technologies developed allow to solve different problems involving: ephemeral shelters, dynamic buildings, dynamic roofs, logistics, aerospace engineering, among others. In Brazil, few academic researchers were developed, even less applied to architectural solutions effectively built. Dynamic systems are given by fixed hinging parts, scissor-like systems, tensioned and inflatable structures. Within this historical overview, this research secondary objective is to understand the various systems developed and classify them according to their physical characteristics, the types of possible transformations and types of joints (Degrees of Freedom). The main objective of this research is to investigate patents involving pantograph joints and select those whose transformations develops a geometric innovation; then analyze its operation by visual algorithms developed in parametric software, in addition to actual physical models for understanding its operation and expanding its application. It is intended thereby to contribute to the dissemination of these systems to collaborate with technological development in architecture and construction.

Keywords: articulated structures; dynamic structures; scissor-like structures; simulation; architecture; geometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Habitações efêmeras yurts, tendas de beduínos e tipis.

Figura 2.2: Postal do Palácio de Cristal – Londres 1851.

Figura 2.3: Registro de movimento presente na pintura futurista "Dinamismo di un cane al guinzaglio".

Figura 2.4: Walking City – Ron Herron (1964 - Archigram).

Figura 2.5: Classificação de estruturas cinéticas.

Figura 2.6: Sistema de classificação de estruturas transformáveis.

Figura 2.7: Torres Al Bahar, em Abu Dhabi

Figura 2.8: Brises Al Bahar, em Abu Dhabi

Figura 2.9: Maquete e edifício: pavilhão alemão para a expo'67 em Montreal

Figura 2.10: Pavilhão alemão na expo'67 em Montreal

Figura 2.11: Guarda sol na praça da mesquita sagrada do profeta, Medina, Arábia Saudita.

Figura 2.12: Guarda sol em Medina.

Figura 2.13: The Bubble – museu Hirshhorn.

Figura 2.14: The Bubble – museu Hirshhorn.

Figura 2.15: Instalação Leviatã

Figura 2.16: Concerto musical na instalação Ark Nova.

Figura 2.17: Instalação Ark Nova.

Figura 3.1: Ilustração de um pantógrafo.

Figura 3.2: Razão e Proporção.

Figura 3.3: Segundo teorema de Tales.

Figura 3.4: Semelhança de triângulos.

Figura 3.5: Homotetia.

Figura 3.6: Semelhanças de triângulos aplicadas ao pantógrafo.

Figura 3.7: ampliação pantográfica de um quadrado

Figura 3.8: Escultura criada por Collas e Barbenienne.

Figura 3.9: Máquina de redução de Collas e Barbenienne.

Figura 4.1: Estrutura Pantográfica presente no Codex Madri

Figura 4.2: Barra pantográfica.

Figura 4.3: Desenvolvimento de par de barras pantográficas.

Figura 4.4: Desenvolvimento de estrutura articulada pantográfica.

Figura 4.5: Exemplo de aplicação de estrutura pantográfica: elevador.

Figura 4.6: Desenvolvimento de estrutura pantográfica com barras de diferentes comprimentos – contínua.

Figura 4.7: Desenvolvimento de estrutura pantográfica com barras de diferentes comprimentos – espelhada.

Figura 4.8.: Guarda-chuva pantográfico.

Figura 4.9: Barra pantográfica convencional comparada à proposta por Selden.

Figura 4.10: Alteração angular decorrente da translação das barras articuladas.

Figura 4.11: Desenvolvimento da abertura do guarda-chuva.

Figura 4.12: Emilio Piñero e sua maquete da cobertura de teatro itinerante.

Figura 4.13: Resultado da expansão das barras articuladas com junção intermediária no centro.

Figura 4.14: Expansão da estrutura através das barras de ângulo único.

Figura 4.15: Esfera de Hoberman.

Figura 4.16: investigações de Hoberman.

Figura 4.17: Desenvolvimento de sistema constituído por *single-angulated bars*.

Figura 5.1: Translação das articulações de uma porta pantográfica.

Figura 5.2: Links com um e dois graus de liberdade.

Figura 5.3: Grau de liberdade resultante de translação – em vermelho.

Figura 5.4: Junção esférica com três graus de liberdade.

Figura 6.1: Cobertura desenvolvida por Hoberman.

Figura 6.2: Escadaria para alçapão e teclado dobrável.

Figura 7.0: Icosaedro e seu equivalente pantográfico utilizando de *single-angulated bars*.

Figura 7.1 e 7.2: Três pares de barras e suas arestas possíveis / os três planos de desenvolvimento.

Figura 7.3: Primeiro quadrante rotacionado no plano XZ / Domo paramétrico finalizado.

Figura 7.4: Variação no número de arcos, permitindo maior estabilidade estrutural.

Figura 7.5: Estrutura montada em MDF.

Diagrama 7.1: Algoritmo para Hoberman 01.

Diagrama 7.2: Algoritmo para Hoberman 02.

Figura 7.6: Expansão da estrutura proposta por Selden.

Diagrama 7.3: Algoritmo para Selden 01.

Diagrama 7.4: Algoritmo para Selden 02.

Diagrama 7.5: Algoritmo para Selden 03.

Figura 7.7: barras convencionais, solução de Hoberman, solução de Selden e solução de Piñero.

Figura 7.8: Junções articuláveis com um e dois graus de liberdade propostos por Piñero.

Figura 7.9: Vista frontal e lateral esquerda das duas situações propostas por Piñero.

Diagrama 7.6: Algoritmo para Piñero 01.

Diagrama 7.7: Algoritmo para Piñero 02.

Diagrama 7.8: Algoritmo para Piñero 03.

Diagrama 7.9: Algoritmo para Piñero 04.

Diagrama 7.10: Algoritmo para Piñero 05.

Figura 9.1 e 9.2: Arco com 90 graus e X divisões – 6 / Primeira barra angulada.

Figura 9.3: Os componentes e a barra angulada resultante.

Figura 9.4: Os componentes e os X/2 pares conectados – 3.

Figura 9.5: Superfície (boundary) resultante do componente offset com arcos nas extremidades. Componente array polar aplicado à superfície.

Figura 9.6: Primeiro quadrante rotacionado no plano XZ / Domo paramétrico finalizado.

Figura 9.7: Limites de retração e expansão da estrutura contendo três segmentos por quadrante.

Figura 9.8: Alteração do parâmetro divide curve resultando em diferentes sistemas.

Figura 9.9: Raio das esferas relacionado à barra articulável.

Figura 9.10: Intersecção das esferas com os planos resultando em curvas.

Figura 9.11: Intersecção entre cone e curva resultando na junção intermediária da barra.

Figura 9.12: Desenvolvimento da primeira barra articulada.

Figura 9.13: Desenvolvimento da primeira articulação pantográfica.

Figura 9.14: Sistema pantográfico de Selden finalizado.

Figura 9.15 e 9.16: Definição do comprimento das barras / Rotação para expansão e retração do sistema.

Figura 9.17 e 9.18: Intersecção do arco com a primeira linha resultando na origem da primeira barra / Primeira barra.

Figura 9.19 e 9.20: Rotação da segunda barra / Linhas auxiliares para criação de plano.

Figura 9.21 e 9.22: Criação da 4ª. e 5. barra por espelhamento / Criação da 6ª., 7ª., 8ª. e 9ª. barras.

Figura 9.23 e 9.24: Disco resultante de intersecção de esferas / 10ª. barra resultando da intersecção de disco e circunferência.

Figura 9.25 e 9.26: Criação de 11ª. e 12ª. barras / Array polar resultando em novos conjuntos articulados.

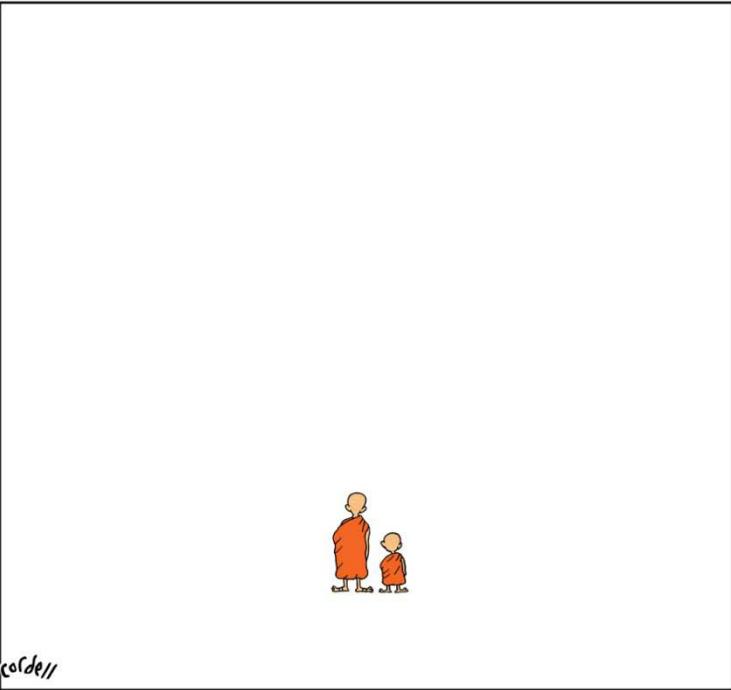
Figura 9.27 e 9.28: Intersecção de esferas resultando em círculos e junção intermediária / Criação de novo conjunto articulado.

Figura 9.29 e 9.30: Criação de conjunto articulado por espelhamento / Criação de 4 conjuntos articulados pelo componente array polar.

SUMÁRIO

1.	Introdução	16
1.1.	Justificativa	17
1.2.	Objetivos Gerais e Específicos	17
1.3.	Seqüência de trabalho	18
2.	Arquitetura Dinâmica	20
2.1.	Sobre o espírito humano e as bases das transformações	20
2.2.	Arquitetura dinâmica	26
2.3.	Estruturas articuladas	33
2.3.1.	Al Bahar Towers	33
2.4.	Estruturas de Membranas Tensionadas	35
2.4.1.	Pavilhão da Alemanha na Expo'67	36
2.4.2.	Pátio da Mesquita Sagrada do Profeta	38
2.5.	Estruturas de Membranas Pneumáticas	40
2.5.1.	The Bubble	41
2.5.2.	Ark Nova	43
3.	Pantografia	46
3.1.	Origens do Pantógrafo	46
3.2.	O segundo teorema de Tales e semelhança de triângulos.	47
3.3.	Homotetia	48
3.4.	Sofisticação geométrica do pantógrafo: pantografia tridimensional	50
4.	Sistemas Pantográficos	52
4.1.	Sistemas Articulados Pantográficos	52
4.2.	Funcionamento elementar das estruturas pantográficas.	53
4.3.	Guarda-chuva pantográfico – patente US23503.	56
4.4.	Emilio Perez Piñero - cobertura itinerante de teatro	59
4.5.	Chuck Hoberman - barra de ângulo único.	61
5.	Junções e Graus de Liberdade	64
6.	Materiais e Métodos.	67
6.1.	Pesquisa com patentes.	67
6.2.	Análise das estruturas pantográficas levantadas nas patentes	69
6.3.	Classificação das Simulações.	71
6.4.	Realização de Simulações.	72
7.	Desenvolvimento das simulações.	74
7.1.	A Single-angulated bar de Hoberman.	74
7.1.1.	Criação do algoritmo para a simulação digital da estrutura do domo paramétrico de Hoberman.	76
7.1.2.	Diagramas do algoritmo desenvolvido – C. Hoberman.	78
7.2.	Desenvolvimento da simulação do guarda-chuva de Selden.	81
7.2.1.	Diagrama com o algoritmo desenvolvido.	82
7.3.	Desenvolvimento da simulação da estrutura itinerante de teatro de Piñero.	86
7.3.1.	Diagrama com o algoritmo desenvolvido.	87
8.	Conclusão e Considerações finais.	93
	REFERÊNCIAS	95

REFERÊNCIAS IMAGÉTICAS	99
APÊNDICE A	102
Criação do algoritmo para a simulação digital da estrutura de Hoberman.	102
APÊNDICE B	106
Criação do algoritmo para a simulação digital da estrutura de Selden.	106
APÊNDICE C	111
Criação do algoritmo para a simulação digital da estrutura de Piñero.	111



colde//

“One day, son, all this will be yours.”

1. Introdução

Este trabalho tem por intuito estudar estruturas dinâmicas articuladas pantográficas. Conceitualmente, é necessário elucidar a definição de cada parte da expressão para compreender o que esta designa globalmente, sendo a primeira definição a que se encarrega de esclarecer o termo “estrutura”. Estrutura é uma palavra que compõe o escopo de diversas áreas do conhecimento, mas em arquitetura é utilizada para um conjunto de elementos que estabelecem relações entre si, compondo um todo. Para Engel (2001) estrutura é “o primeiro e único instrumento para gerar forma e espaço na arquitetura. Por esta função, a estrutura torna-se um meio essencial para modelar o meio material do homem”. Mais do que a reunião dos elementos que compõem um sistema, se constitui uma estrutura arquitetônica quando os elementos estabelecem uma relação entre si, definindo alguma organização espacial.

Estruturas dinâmicas são estruturas nas quais o movimento é sua característica essencial: as relações são transformadas por movimentos entre os elementos da estrutura, ou pela alteração das propriedades dos elementos.

As estruturas dinâmicas estudadas são articuladas porque os sistemas possibilitam o movimento relativo de componentes rígidos da estrutura, em decorrência de alguns elementos estruturais fixos interligados entre si (através de outros que são móveis) constituindo articulações. (Podemos exemplificar estes sistemas em analogia a estruturas ósseas biológicas, que utilizam de ossos rígidos conectados uns aos outros através de junções articuláveis).

As estruturas dinâmicas articuladas estudadas são pantográficas porque, dentre o universo das estruturas dinâmicas articuladas, optou-se por estudar aquelas cujas articulações produzem transformações geométricas análogas ao funcionamento de um pantógrafo, que possui articulações não somente nas extremidades dos componentes rígidos, mas também em suas porções intermediárias, como em uma tesoura (*scissor-like structures*).

1.1. Justificativa

As estruturas dinâmicas articuladas propiciam diversas soluções arquitetônicas flexíveis e adaptáveis, como por exemplo, auxiliando a solucionar problemas de insolação; expandindo áreas e volumes construídos; facilitando a logística e a montagem de instalações efêmeras; produzindo coberturas dinâmicas; criando elementos arquitetônicos dinâmicos para fachadas entre outros.

No Brasil, são poucos os pesquisadores que se dedicam ao estudo de soluções com o uso de estruturas dinâmicas articuladas e, apesar de existirem alguns renomados pesquisadores no exterior, são raras as indicações de patentes ou registros brasileiros de aplicações práticas. Nos últimos anos, têm-se intensificado a pesquisa e a produção nos campos da arquitetura dinâmica. Como exemplo, pode-se citar os simbólicos cinco anéis olímpicos apresentados nos jogos de inverno de Sochi, na Rússia em 2014, que se tratavam de estruturas articuladas pantográficas baseadas nos anéis desenvolvidos por Hoberman (1988). Outros exemplos são: a cobertura dinâmica do estádio de Wimbledon, na Inglaterra; o palco da turnê 360 graus da banda U2 e as paredes com diafragmas eletrônicos do Instituto do mundo árabe, em Paris.

É possível notar aplicações simples e outras mais complexas dessas estruturas dinâmicas articuladas, que permitem flexibilizar elementos arquitetônicos, ampliando de forma considerável as possibilidades neste meio. No caso do Brasil, a expansão das pesquisas neste campo de estudos pode trazer muitos benefícios, principalmente quando houver a necessidade de ajustar a solução para atender situações diferenciadas.

1.2. Objetivos Gerais e Específicos

O objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver algoritmos que permitissem a exploração de estruturas articuladas pantográficas em ferramentas atualmente disponíveis para a área de Arquitetura e Construção.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Compreensão conceitual das estruturas dinâmicas, mais especificamente das pantográficas;
- Extração das raízes das estruturas pantográficas já patenteadas;
- Desenvolvimento de algoritmos para simulações virtuais das estruturas pantográficas extraídas.
- Implementação dos algoritmos desenvolvidos em um software paramétrico para modelagens dinâmicas e virtuais em tempo real;
- Geração de uma ferramenta, produto desta aplicação, que permite, além da simulação das estruturas modeladas parametricamente, simulações para a criação de novas estruturas pantográficas, aplicáveis também na área de Arquitetura e Construção

1.3. Sequência de trabalho

Este trabalho é apresentado segundo a seguinte estrutura:

O primeiro capítulo traz uma breve introdução sobre arquitetura dinâmica, enfatizando a carência de trabalhos e pesquisas nesta área no Brasil – fator motivante para o desenvolvimento do trabalho - e alguns exemplos de aplicação.

No segundo capítulo explora-se o tema abordado, contemplando sua origem histórica, os fatores que conduziram sua evolução, seus resultados, demandas e exemplos que ilustram os resultados já produzidos a respeito de estruturas dinâmicas de diversos tipos.

No terceiro capítulo aborda-se a metodologia utilizada para a condução da pesquisa e as estratégias para o seu desenvolvimento.

No quarto capítulo examina-se detalhadamente os princípios geométricos que operam no pantógrafo, e também traz seus desenvolvimentos tridimensionais posteriores.

No quinto capítulo segue-se examinando os sistemas dinâmicos pantográficos segundo as patentes estudadas.

No sexto capítulo examina-se os tipos possíveis de articulações e seus resultados práticos, expondo o princípio geométrico de cada solução.

O sétimo capítulo tem por objetivo explicar o funcionamento dos sistemas dinâmicos pantográficos das três patentes selecionadas, e examinar os princípios geométricos operantes em cada sistema.

O oitavo capítulo apresenta as conclusões, com exemplos de algumas evoluções das patentes examinadas, finalizando com uma discussão crítica sobre o trabalho desenvolvido.

2. Arquitetura Dinâmica

2.1. Sobre o espírito humano e as bases das transformações

No período Neolítico, a divisão social do trabalho e o domínio das técnicas de agricultura permitiram que comunidades errantes pudessem adotar o sedentarismo como modo de vida. Em decorrência, a busca por habitações mais sólidas, que tivessem maior durabilidade, emergiu naturalmente como resposta necessária a essa nova condição de moradia. Porém, como algumas comunidades possuem características nômades até os dias atuais, foram necessárias diferentes definições arquitetônicas, buscando uma melhor adaptação ao seu modo de vida itinerante.

O arquiteto Marcus Vitruvius Pollio escreveu o único livro de arquitetura proveniente do império romano que conhecemos nos dias de hoje. Conhecido como dez livros de arquitetura, foi dedicado ao imperador romano Augusto. Neste livro, Vitruvius define três qualidades que considera essenciais ao edifício clássico: solidez, utilidade e beleza (*firmitas, utilitas e venustas*). Mediante a necessidade de solidez do edifício, a construção em pedra se mostrou adequada a atendê-la e se tornou o principal sistema construtivo da época. Mesmo após a criação de outros sistemas construtivos mais flexíveis e leves, a característica da solidez perdura na arquitetura ocidental e europeia para além do séc. XIX.

Segundo Souza (2016), são nômades, atualmente, as comunidades que ainda se “utilizam dos recursos oferecidos pela natureza até esses se esgotarem e, com o fim desses recursos, se deslocam até encontrar outra região que ofereça as condições necessárias para a sua sobrevivência”. Nestas circunstâncias, estas comunidades desenvolveram características culturais próprias com soluções compatíveis com suas próprias demandas e, entre elas, a necessidade de habitações transportáveis que possam ser transportadas junto consigo quando a migração se torna inevitável. Podemos destacar como exemplos dessa tecnologia habitacional, as tendas *Yurts* na Mongólia, as tendas dos beduínos do Oriente Médio e norte da África e as *Tipis* dos povos indígenas norte-americanos.



Figura 2.1: Habitações efêmeras yurts, tendas de beduínos e tipis.

Fonte: Adaptado de Orient Express / Bedouin Camp / Livraria do congresso estadunidense.

Contudo, com o advento da revolução industrial a partir do séc. XIX e, conseqüentemente, a inserção de indústrias e de produtos industrializados no cotidiano das pessoas, se fomentou uma dinamização no modo de vida da sociedade. A produção em larga escala reduziu o custo de produtos que até então seriam fabricados apenas por artesãos e, também, ampliou radicalmente a população urbana, principalmente no que se refere à mão de obra para as indústrias.

A existência de tecnologias que possibilitam a produção em série, com a capacidade de produzir em escala industrial, abre também as possibilidades de fabricação na arquitetura, como, por exemplo, a indústria do ferro fundido permitiu a construção do palácio de Cristal projetado por Paxton em Londres (figura 2.2) - sede da exposição universal em 1851: o primeiro edifício da história integralmente produzido com ferro fundido e vidro a partir de peças pré-fabricadas, cuja montagem e instalação consumiram apenas 35 semanas (BRYSON, 2010).

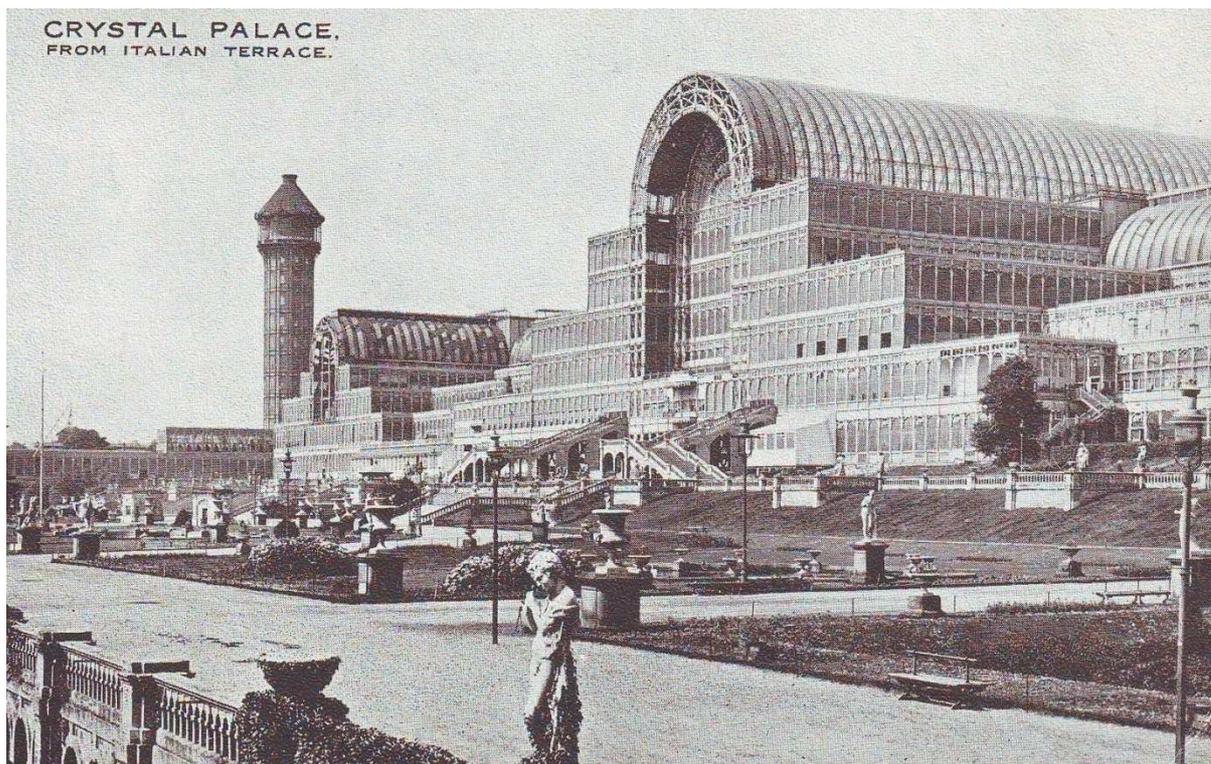


Figura 2.2: Postal do Palácio de Cristal – Londres 1851.
Fonte: Adaptado de Archexpo.net (2016).

No começo do século XX a sociedade vivencia cotidianamente a evolução do potencial das indústrias, que se tornam indissociáveis desse novo modo de vida. Cada vez mais rápida e eficiente, a racionalização requerida pelos processos de fabricação passa também a moldar as bases do pensamento dessa sociedade que se relaciona intensamente com essas transformações, sem qualquer ciência das implicações sociais resultantes.

Para os cidadãos contemporâneos a esse período de mudanças oriundas de processos embasados nessa racionalidade, vivenciar tais transformações também gerou um ambiente de grande entusiasmo. Na Itália, por exemplo, a excitação diante desse novo modelo de sociedade levou o italiano Filippo Tommaso Marinetti a redigir o manifesto futurista em 1909, conclamando os cidadãos a romperem com o passado para abrigar o novo, o “moderno”.

Nós afirmamos que a magnificência do mundo foi enriquecida por uma nova beleza: a beleza da velocidade. Um carro de corrida cuja capota é adornada com grandes canos, como serpentes de respirações explosivas de um carro bravejante que parece correr na metralha é mais bonito do que a Vitória da Samotrácia.

Nós estamos no promontório extremo dos séculos! Por que haveríamos de olhar para trás, se queremos arrombar as misteriosas portas do Impossível? O Tempo e o Espaço morreram ontem. Nós já estamos vivendo no absoluto, pois já criamos a eterna velocidade onipresente. (MARINETTI, 1909).



Figura 2.3: Registro de movimento presente na pintura futurista "Dinamismo di un cane al guinzaglio".
Fonte: BALLA, 1912 (Wikipédia).

Essa sociedade industrial, que gera constantemente novos produtos e diferentes soluções de inovação em prol de uma relativa autonomia individual - como jamais se fora vivenciado - essencialmente contrastante com a divisão social do trabalho proveniente do sedentarismo como possibilidade de sobrevivência, promove o apreço às transformações como forma de tolerar os extremos provenientes dos “complexos estímulos advindos da velocidade da vida moderna” (HARVEY, 1989).

Como resultado a arquitetura precisa se tornar cada vez mais flexível – capaz de se conformar a diferentes situações. Os espaços precisam ser adequados às novas demandas que, ao longo do século XX dão abrigo a programas arquitetônicos antes inexistentes, como estações de trem, abatedouros, hospícios, pavilhões, hangares e postos de combustível. Já no século XXI, os programas se aproximam do imprevisível dada a tamanha dinamicidade das transformações. Nesse contexto, se mostram imprescindíveis o desenvolvimento de estruturas arquitetônicas que permitam a multiplicidade de usos e a volatilidade de seus volumes e formas.

O investimento em arquitetura dinâmica é uma forma de responder às demandas de uma sociedade que está em constante mutação, com necessidades também em mutação. Nesse contexto, Herron (1964) – integrante da revista/manifesto Archigram – cria o projeto Walking City idealizando como seria um futuro modo itinerante de habitar (figura 2.4). A arquitetura precisa também responder, por exemplo, às circunstâncias sociopolíticas emergentes que exijam dela uma diferente potencialidade: que seja mais adaptável às necessidades urgentes de grupos de pessoas, como os campos de refugiados decorrentes de situações de guerra ou catástrofes.

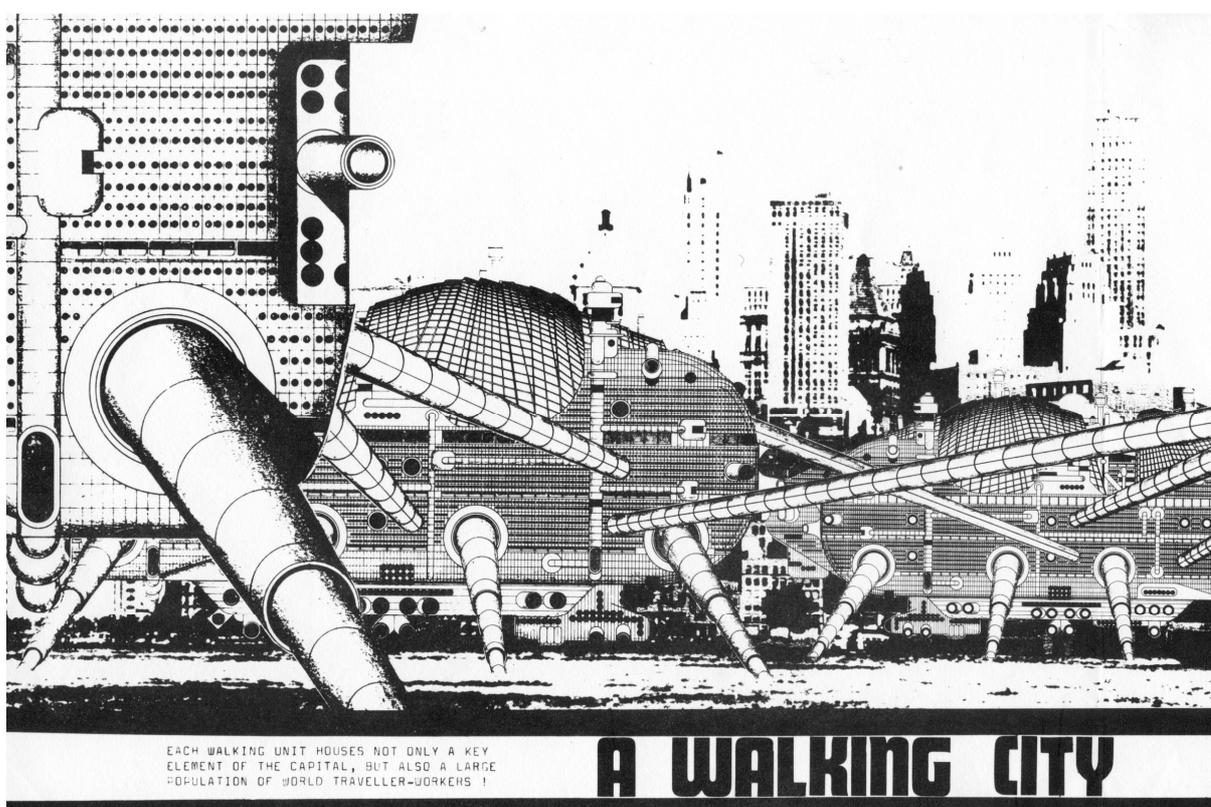


Figura 2.4: Walking City – Ron Herron (1964 - Archigram).
Fonte: HERRON, 1964.

A necessidade de uma arquitetura dinâmica é reflexo de uma sociedade essencialmente mutável, cujas demandas são instáveis. A flexibilidade espacial e funcional de um edifício, mais do que um capricho tecnológico, se torna característica primordial para atender às demandas da chamada sociedade líquida, como define Zygmunt Bauman. Sobre a concepção de liquidez ele nos esclarece que:

É a capacidade, como a de Bill Gates, de encurtar o espaço de tempo da durabilidade, de esquecer o "longo prazo", de focar

a manipulação da transitoriedade em vez da durabilidade, de dispor levemente das coisas para abrir espaço para outras igualmente transitórias e que deverão ser utilizadas instantaneamente, que é o privilégio dos de cima e que faz com que estejam por cima. Manter as coisas por longo tempo, além de seu prazo de "descarte" e além do momento em que seus "substitutos novos e aperfeiçoados" estiverem em oferta é, ao contrário, sintoma de privação. Uma vez que a infinidade de possibilidades esvaziou a infinidade do tempo de seu poder sedutor, a durabilidade perde sua atração e passa de um recurso a um risco. (BAUMAN, 2001).

O termo arquitetura dinâmica designa então todo tipo de criação espacial em que o fundamento principal é a dinâmica: a possibilidade de mutação a partir de diferentes mecanismos, tais como estruturas articuláveis e infláveis - que podem ter tamanho, forma e cor alterados conforme as necessidades ou vontades humanas. O grande diferencial desta área de desenvolvimento arquitetônico se dá justamente na vantagem de poder se adaptar às mudanças contextuais, isto é, aquilo que se deixa ou passa a ser priorizado em determinada época.

2.2. Arquitetura dinâmica

No início do seu ensaio sobre a "estética do efêmero", Christine Buci-Glucksmann interroga-se: "Verdadeiro signo da sociedade, o efêmero não se terá tornado uma nova modalidade do tempo na época da mundialização?" De facto, em praticamente todas as esferas da nossa existência parecemos cada vez mais dominados por uma ideia irredutível de efemeridade. E essa percepção mais aguda do temporário e do transitório não deixa de chocar com as nossas concepções culturais adquiridas, pouco habituadas a lidarem não só com a mutabilidade da realidade mas também com a mobilidade do próprio pensamento. Se esta efemeridade se vai manifestando nas sociedades contemporâneas, o que dizer dos seus reflexos no campo da arquitectura, por natureza, o bastião do perene? Desde o início, a arquitectura foi pensada como a disciplina da permanência. Não por acaso, de Vitruvius a Le Corbusier, a arquitectura terá procurado interiorizar tanto as geometrias do sagrado como as leis do universo. Neste sentido, a história da arquitectura dedica pouco espaço às suas manifestações efêmeras, reduzidas a referências ao mito originário da cabana primitiva ou às grandiosas encenações barrocas. No entanto, percebemos que com a modernidade algo se altera estruturalmente. A abertura projectiva ao futuro, inerente à concepção progressista da história, torna o tempo presente o lugar privilegiado da transformação e da mudança. No âmbito da arquitectura, nada o demonstra tão claramente como as exposições universais da segunda metade do século XIX, verdadeiras manifestações técnicas e sociais de fascínio com o novo mundo industrial. Nos dias de hoje, quando se fala em efêmero em arquitectura continuamos remetidos para o campo das artes ditas performativas ou para os grandes eventos culturais, revelando a manutenção dessa associação umbilical ao espectáculo. A verdade é que a arquitectura continua a ser entendida essencialmente como fenómeno material e objectual pensado para a permanência. Mas mesmo que seja concebida e construída para a eternidade, a arquitectura não deixa de ser, por natureza, efêmera. A sua ideia conceptual esmorece e dissemina-se. A sua materialidade física decai e transforma-se. A sua apropriação humana muda e adapta-se. É por isso deveras estranho que a arquitectura continue a revelar tanta dificuldade em interiorizar produtivamente essa lógica da efemeridade. Apesar desta evidência, alguns arquitectos contemporâneos têm explorado de forma criativa a ideia de efêmero através da própria materialidade da arquitectura. Se alguns, como Frank Gehry, Coop Himmelblau, Lacaton & Vassal ou mesmo Lebbeus Woods, o afirmam através da acentuação da instabilidade das formas, da informalidade das tecnologias e da precariedade dos materiais, outros, como

Herzog & de Meuron, SANAA ou Jean Nouvel, realizam-no através da procura de uma desmaterialização do objecto, num caleidoscópio espacial etéreo de transparências, reflexos e opacidades. (BAPTISTA, 2010).

Almeida (2014) sugere iniciar os estudos em estruturas dinâmicas a partir do desenvolvimento de estruturas itinerantes para práticas circenses, pois necessitam de uma estrutura que pudesse ser leve e facilmente transportada. Para isso, o militar inglês Philip Astley sistematizou no séc. XVIII o *Royal Amphitheatre of Arts*: uma estrutura baseada em andaimes que permitiam sua montagem e desmontagem facilitando seu deslocamento. Em decorrência de sua criação, “as estruturas em andaimes foram um sistema estrutural que motivaram o desenvolvimento das tendas de circo itinerantes” (DUPAVILION, 2001 apud ALMEIDA, 2014).

Segundo Kronenburg (2002, apud KIRKEGAARD e SØRENSEN 2009), o conceito de arquitetura dinâmica se refere a edificações ou estruturas cuja localização seja variável ou permita mobilidade. Porém, ainda segundo Kirkegaard e Sørensen (2009) as possibilidades de variação geométrica e de movimento da própria estrutura também constituem elementos que integram a natureza de estruturas cinéticas.

Tendo em vista a inexistência de uma classificação universal para sistemas dinâmicos em arquitetura, e compreendendo existir diferentes possibilidades de classificação dos mesmos elementos, dois sistemas de classificação foram selecionados pelos seus diferentes métodos organizacionais. Hanaor e Levy (2000) propõem um sistema hierárquico de classificação das estruturas cinéticas dividindo-as em uma tabela que cruza as qualidades dos sistemas que viabilizam sua transformação (cinemática) com a qualidade morfológica desses sistemas. Porém Stevenson (2011) propõe outro formato de tabela que cruza as qualidades do deslocamento efetuado pelo sistema (posição no espaço e direção da transformação) quando de sua movimentação com a qualidade das transformações físicas do sistema.

Na tabela (figura 2.5) de Hanaor e Levy (2000), os aspectos morfológicos das estruturas são apresentados ao longo de colunas nas quais as características cinéticas são dispostas em linhas, sendo estas as duas características primárias e

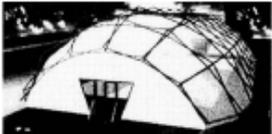
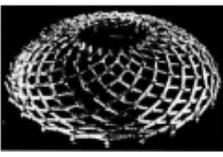
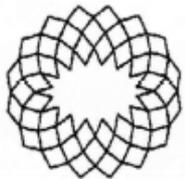
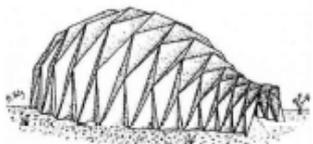
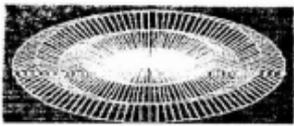
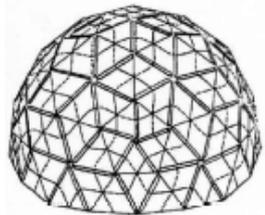
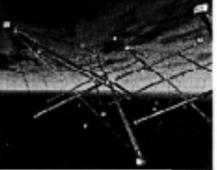
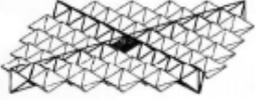
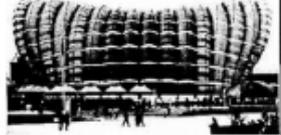
		Morfologia			
		Entrelaçadas			Contínuas
		Camada dupla	Camada única	Flexível	Chapas
Cinemática	Conexões rígidas	Pantográficas			Chapas dobradas
		 Tesouras periféricas  Tesouras radiais  Outros	 Tesouras anguladas (coberturas retráteis) 	 Mastros e arcos 	 Desdobramento linear  Desdobramento radial
Cinemática	Conexões articuladas	Barras			Superfícies curvas
		 Conexões articuladas	 Superfície regrada  Rede recíproca (desmontável)	 	
Deformáveis	Sistemas de cabos estruturais	Membranas tensionadas			
		 Tensegridade  Outros	 	Tênsil  Híbrida  Nervurada	Pneumática  Baixa pressão  Alta pressão

Figura 2.5: Classificação de estruturas cinéticas.
 Fonte: HANAOR e LEVY, 2000.

primordiais no contexto destas estruturas. Para cada uma das categorias principais de classificação, outras duas subcategorias são consideradas.

As qualidades cinemáticas são divididas entre conexões rígidas e características deformáveis. Nas conexões rígidas, os elementos constituintes dos sistemas são rígidos e suas transformações se dão por meio de articulações posicionadas nas extremidades e, em algumas situações, ao longo dos elementos. Barras pantográficas, hastes (barras) e chapas desdobráveis são elementos constituintes de sistemas que caracterizam as conexões rígidas. Nos sistemas de características deformáveis, o próprio material dos elementos permite sua modificação em decorrência de sua natureza flexível: cabos tensionados, membranas tensionadas e estruturas infláveis. Diferenciam-se então, pelo contraste entre rigidez e flexibilidade.

As duas subcategorias morfológicas maiores são divididas entre estruturas entrelaçadas: que utilizam do cruzamento e/ou conexões de hastes rígidas através de junções articuláveis ou cabos tensionados; e estruturas de superfícies contínuas: com chapas articuláveis e membranas tensionáveis ou infláveis. No contexto das superfícies contínuas, é importante notar que todas as estruturas têm uma superfície de cobertura.

Dentro das estruturas entrelaçadas com conexões rígidas, há aquelas cujas articulações são pantográficas – contém uma ou mais junções intermediárias que funcionam como uma articulação – e outras barras cujas articulações se encontram apenas nas extremidades. Em ambas as situações, Hanaor e Levy (2000) as dividem em três subcategorias morfológicas: estruturas de camada dupla – cujas conexões nas extremidades resultam em dois planos diferentes (interno e externo); estruturas de camada única – nas quais os elementos conectados descrevem apenas um plano (que pode ser coberto por uma superfície plana); e estruturas flexíveis – nas quais diferentes formas são possíveis (multiforme). Já nas estruturas entrelaçadas deformáveis, todas dependem de um sistema de cabos estruturais.

Nas estruturas contínuas, porém, a diferenciação é mais simples: naquelas cujas conexões são rígidas todas utilizam de chapas planas - que podem ser dobráveis/desdobráveis em diferentes sentidos (linear e radial) - ou desdobráveis

resultando em superfícies curvas (como na patente *laminar geodesic dome* de Buckminster Fuller, 1960). Aquelas estruturas cujas superfícies são deformáveis, todas utilizam de membranas de formas diferentes e são divididas em outros dois grupos: tensionadas e pneumáticas. No grupo das tensionadas a tabela traz sistemas híbridos – cuja estrutura é composta de mastros e cabos nos quais a membrana é fixada – e sistemas nervurados – onde a membrana é parte estrutural. No grupo das pneumáticas, há estruturas de baixa pressão – que necessitam de ventilação constante em todo o volume útil da estrutura – e alta pressão – que possui um conjunto de “tubos” com ar comprimido (HANAOR e LEVY, 2000).

Além das características formais que as separam, outra diferença entre as duas subcategorias morfológicas (entrelaçadas e contínuas) diz respeito a sua distribuição do peso: na primeira, toda a carga é direcionada apenas – através dos sucessivos elementos – àqueles distintos que tocam o solo, e na segunda, a própria superfície de cobertura já exerce esse papel. Especificamente dentro da subcategoria de membranas tensionadas há outra divisão envolvendo estruturas híbridas que contém exemplos com ambas as situações (HANAOR e LEVY, 2000).

De maneira geral, as estruturas cujos conectores são rígidos podem ser controladas com maior precisão se comparadas às estruturas deformáveis, mas ao custo de uma maior complexidade mecânica: necessitando articulações mecânicas específicas a cada situação (HANAOR e LEVY, 2000).

Stevenson (2011) propõe princípios de organização distintos aos de Hanaor e Levy, mas incorpora estruturas com qualidades equivalentes. Ela afirma que Hanaor e Levy (2000) buscam as propriedades estruturais dinâmicas das estruturas – que estão intensamente relacionadas à tecnologia que permite seu dinamismo – mas também as relaciona com seus aspectos morfológicos. Ela defende, porém, uma organização que contemple o estabelecimento de padrões globais de movimento do sistema. Para ela, “a natureza dos componentes e dos padrões é inicialmente estudada e, em seguida, reinterpretada no contexto da totalidade da forma e da transformação global” (STEVENSON, 2011, tradução do autor).

Sua proposta é baseada numa tabela criada por Frei Otto para classificar telhados retráteis, que discrimina estruturas rígidas de membranas flexíveis e

identifica padrões (direção) de movimento. Sobre a importância do desenvolvimento desses padrões Stevenson nos esclarece:

O movimento de um elemento dinâmico não é de grande importância; No entanto, quando uma série de dispositivos cinéticos se move conjuntamente ou progressivamente, o resultado final pode ser surpreendente. Assim, padrões organizacionais são de grande importância na arquitetura dinâmica. Os mesmos componentes podem ser configurados de diferentes formas para criar infinitas possibilidades de estruturas dinâmicas: dependendo de sua posição no espaço e de suas conexões, eles podem operar em duas ou três dimensões resultando em diversas formas. Embora haja uma grande variedade de padrões, características comuns persistem. (STEVENSON, 2011, tradução do autor).

Em sua tabela, as características de posição no espaço e direção de transformação agrupam-se em sete subcategorias distintas: sistemas com movimento esférico (tridimensional); sistemas com movimento circular tangencial; movimentação radial; pivotante – com eixos que fixam o movimento ao redor de si; movimento monoaxial – que translada em apenas um eixo cartesiano; movimento biaxial – que translada em um plano cartesiano e movimento multiaxial – que translada em diversos eixos. Estas características de posicionamento no espaço e de direção da transformação estão diretamente relacionadas à quantidade e a qualidade de graus de liberdade conferidos a cada sistema, criando as condicionantes responsáveis por conduzir e limitar as modificações do sistema.

Nesta tabela, a qualidade da movimentação espacial dos sistemas é cruzada com seis diferentes ações que viabilizam suas transformações físicas, sendo elas: deformação; dobra; expansão; retração; deslizamento e revolução. É importante notar que as ações de expansão e retração freqüentemente podem resultar das demais ações, identificando então uma coerente reorganização da informação.

Os aspectos morfológicos das estruturas dinâmicas arquitetônicas considerados por Stevenson (2011) estão relacionados com a transformação – movimento -- e os meios físicos – como ele ocorre – utilizados para organizar e coordenar os vários elementos da composição para conseguir um todo desejável, objetivando separar temas e tipologias recorrentes em uma variedade de edifícios com características comuns.

Apesar de existirem outras classificações para sistemas dinâmicos, as relações observadas se encontram contempladas em alguma das duas tabelas expostas. Por isso, seus conteúdos não serão abordados nesta pesquisa.

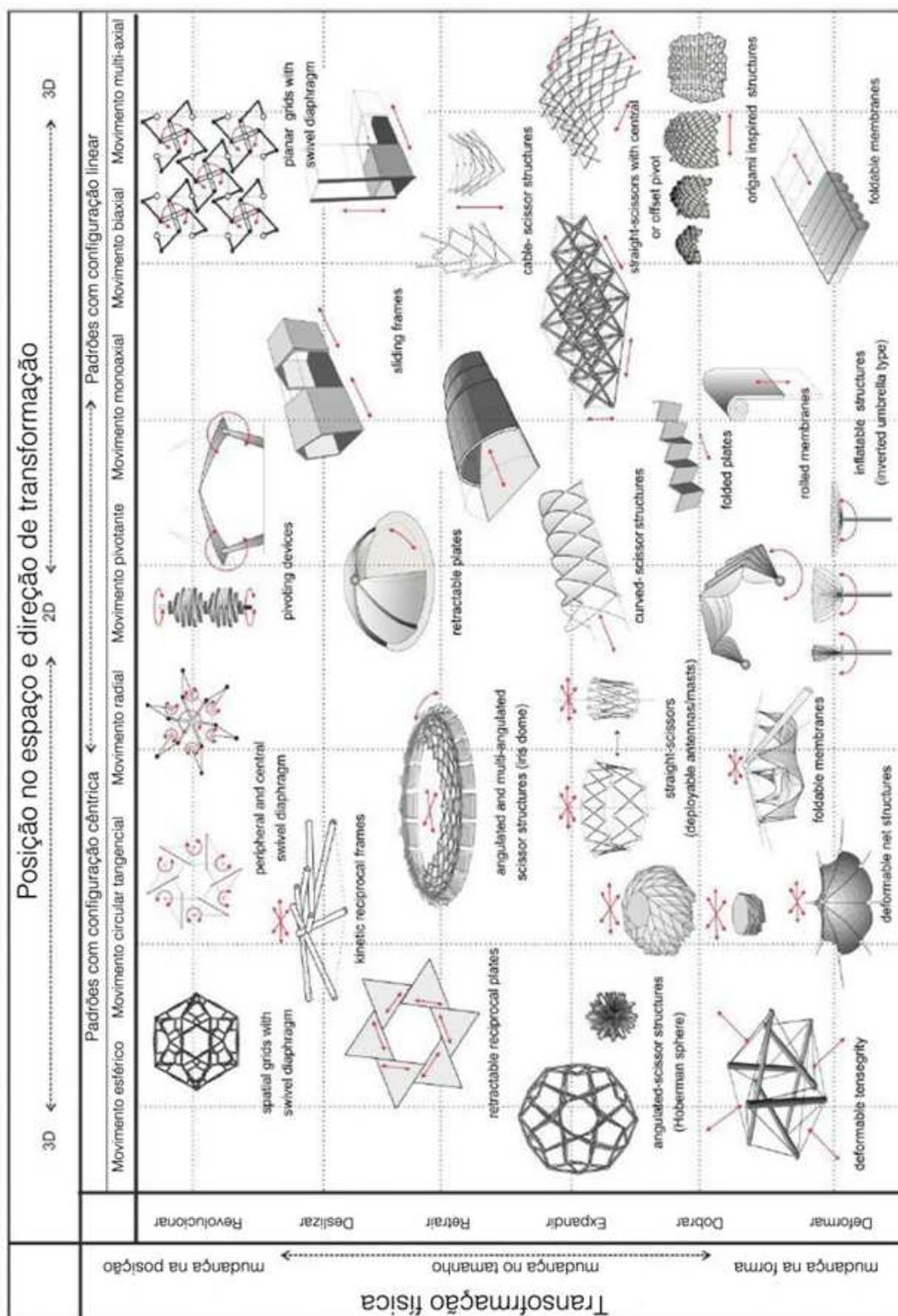


Figura 2.6: Sistema de classificação de estruturas transformáveis.

Fonte: Adaptado de STEVENSON, 2011.

2.3. Estruturas articuladas

O segmento de estruturas articuladas dentro das estruturas dinâmicas aborda tipologias estruturais cujo princípio elementar de transformação se dá por articulações mecânicas. Estas estruturas são constituídas por conjuntos de elementos rígidos – hastes – que possuem mecanismos articulados – junções – que os conectam, permitindo a interação do conjunto e viabilizando sua transformação estrutural.

2.3.1. Al Bahar Towers

As Torres Al Bahar foram projetadas pelo escritório Aedas Architects em parceria com o escritório britânico Arup. O projeto consiste na implantação de duas torres com aproximadamente 150 metros de altura cada, próximas às praias da cidade de Abu Dhabi, capital dos Emirados Árabes Unidos.

Finalizado em junho 2012, o projeto foi concebido a partir das premissas de condicionantes locais, sendo prioridade o foco nas características climáticas, por Abu Dhabi se localizar em meio a um grande deserto em região de clima temperado, com temperaturas máximas próximas a 37 graus Celsius, índice pluviométrico praticamente nulo e com tempestades de areia (CILENTO, 2012).



Figura 2.7: Torres Al Bahar, em Abu Dhabi.
Fonte: Solucionista, 2016.

Para lidar com tal ambiente desfavorável, o escritório Aedas propôs a criação de uma segunda pele no edifício. Constituída por uma estrutura afastada em dois

metros do edifício e revestida com brises-soleil dinâmicos personalizados que foram especialmente projetados para sombrear três quartos da superfície do edifício, criando uma fachada responsiva. Apenas a fachada norte não recebeu os elementos, pois há pouca insolação e também, possui vista atrativa para a cidade (BOAKE, 2014).

Considerando sua localização, a concepção formal dos brises-soleil resgata com elementos dinâmicos, tecnologia e materiais contemporâneos, a cultura árabe representada por padrões geométricos presentes originalmente em seus muxarabis, elementos arquitetônicos para minimizar o calor externo nas aberturas em suas edificações. Estes elementos modulares dinâmicos “contemporâneos” foram concebidos como um gradil contendo vários módulos, similares a estruturas de guarda-chuva de apenas três abas revestido por PTFE – Politetrafluoretileno (Teflon®).

As duas torres possuem mais de mil elementos que são acionados individualmente em suas fachadas, com abertura e fechamento pré-programado em software desenvolvido especialmente para o controle do prédio (realizando ambas as operações apenas uma vez ao dia). Apesar da programação, os elementos possuem alguns tipos de sensores que promovem sua abertura ou fechamento em caso de variações climáticas especiais, como por exemplo eventuais ventos fortes. Assim, o edifício é capaz de responder prontamente a algumas situações sem qualquer intervenção humana, garantindo a autonomia do sistema.

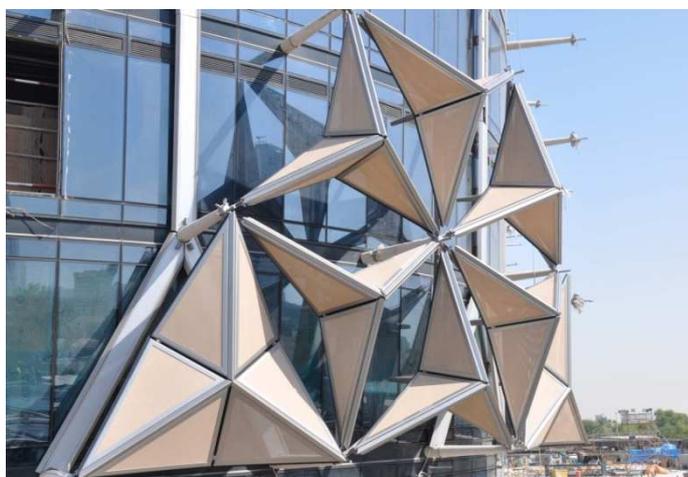


Figura 2.8: Brises Al Bahar, em Abu Dhabi.
Fonte: Solucionista, 2016.

Segundo Boake (2015), o sistema promove uma série de benefícios ao prédio, sobretudo uma intensa redução na emissão de CO₂ pela menor demanda de climatização artificial – cerca de 1.750 toneladas por ano. A implantação dos brises-soleil permitiu a utilização de fachadas de vidro na primeira pele do edifício, reduzindo também a necessidade de iluminação artificial pelo controle da iluminação natural.

2.4. Estruturas de Membranas Tensionadas

Originadas nas tendas nômades, as estruturas de membranas tensionadas se mostraram úteis para diversas aplicações civis e militares, tendo sua aplicação para acampamentos fundamental importância para o sucesso de campanhas militares ao longo da história. A partir do séc. XX, com o domínio da fabricação de materiais poliméricos e com a apropriação pela indústria dos sistemas de fabricação destas tendas, começam a produção das barracas comerciais de camping.

As estruturas de Membranas, segundo a classificação feita por Hanaor e Levy (2000), podem ser divididas em dois tipos: membranas tensionadas e membranas pneumáticas. A primeira se conforma por tensionamento (ou tracionamento) através de cabos e mastros que funcionam como estrutura para moldar a sua forma e aumentar a resistência do sistema, ou mesmo diretamente pelo tracionamento do próprio “tecido” (membrana) através de algum material que resista aos esforços. A segunda, pneumática, requer a utilização de um sistema artificial de pressurização para que mantenha sua estabilidade estrutural.

Segundo Chan (2012), o sistema de membranas tensionadas possui vantagens por sua leveza e capacidade de vencer grandes vãos utilizando poucas peças estruturais, mas também possui problemas por utilizar de membranas extremamente maleáveis, sendo afetada por fatores climáticos como chuva ou vento.

As estruturas de membranas tensionadas, conforme Hanaor e Levy (2000) podem ser divididas entre membranas híbridas e membranas nervuradas. As membranas híbridas utilizam de mastros e cabos estruturais, sobre os quais posteriormente a membrana é tensionada. Porém, nas estruturas nervuradas a

própria membrana tensionada é componente estrutural (necessitando de tecido com maior resistência) utilizando dos mastros e cabos para seu tracioná-la.

2.4.1. Pavilhão da Alemanha na Expo' 67

O arquiteto alemão Frei Otto foi um importante precursor na utilização contemporânea das estruturas de membrana. Otto pesquisou intensamente as possibilidades da membrana e de estruturas de suporte rígidas – como mastros – e flexíveis – como cabos. As estruturas de membranas necessitaram, até meados de 70, do suporte de uma malha de cabos porque os tecidos utilizados até então não possuíam resistência estrutural suficiente para suportar os esforços de tração da estrutura (CHAN, 2012). Assim, a membrana tensionada era presa na rede de cabos.

Segundo Langdon (2015), Otto foi piloto da força aérea alemã durante a segunda guerra mundial e, tendo sido capturado na França, trabalhou em um campo de prisioneiros “construindo tendas para abrigar prisioneiros usando o limitado material que estava a sua disposição”. Essa experiência com tendas motivou Otto – após o fim da guerra – a dedicar seus esforços para estudar suas aplicações em uma arquitetura otimizada e mais humanitária, que pudesse ser desenvolvida utilizando o mínimo de recursos possíveis.

Os processos de pré-fabricação se mostraram uma ferramenta conveniente para Otto, uma vez que os materiais empregados em seus estudos eram provenientes de indústrias. Otto se dedicou então ao estudo dos materiais e à projeção do método de montagem dessas estruturas para torná-las tão racionais quanto os processos de fabricação. Esperando-se como resultado deste direcionamento, a produção de uma arquitetura mais eficiente, durável, barata e flexível.

A cidade de Montreal, em 1967, foi sede de uma Exposição Universal, no Canadá. Esta Expo foi muito peculiar por ser contemplada com interessantes e promissoras experiências de arquitetura pré-fabricada. Foi apresentado o projeto Biosfera de Buckminster Fuller, que possuía uma grande Geodésica pré-fabricada que precisou de pouquíssimos recursos para sua produção; O arquiteto Moshe

Safdie apresentou seu Habitat 67, projeto de habitação concebida através de cubos de concreto pré-moldado que posteriormente foram empilhados. Para esta Expo, Frei Otto foi o arquiteto responsável por edificar o pavilhão da Alemanha.

Em parceria com o arquiteto Rolf Gutbrod, Otto desenvolveu seus estudos através de modelos que auxiliassem a compreender os esforços aos quais as membranas tensionadas são submetidas (figura 2.6). Toda sua pesquisa em arquitetura mínima e pré-fabricação foram aplicados ao projeto de montagem do pavilhão.



Figura 2.9: Maquete e edifício: pavilhão alemão para a expo'67 em Montreal
Fonte: OTTO, 1967 (Archdaily).

Segundo Langdon (2015) a cobertura foi constituída através de uma malha de cabos de aço tensionados cobertas por uma membrana de poliéster translúcida. Em vários pontos dentro do perímetro do pavilhão, a superfície tensionada é tracionada ao solo formando cavidades na membrana em forma de funil, contrapondo o tracionamento da membrana pelos mastros. Se o sistema de Otto era tecnologicamente sofisticado, em contrapartida era também conceitualmente muito simples, e permitia grande liberdade de composição (LANGDON, 2015).

“Sensível às necessidades flexíveis dos ocupantes e o impacto nas questões de sustentabilidade, Otto também se dedicou à necessidade de estruturas temporárias simples de montar, simples de desmontar e reciclar. Com poucos componentes, todos os quais podem ser adaptados a praticamente qualquer local e terreno, seus sistemas de mastros e membranas foram uma simplificação radical dos métodos de construção tradicionais que valorizavam rigidez e permanência. Uma vez projetado e pré-fabricado, o pavilhão alemão em Montreal foi montado no local em apenas seis semanas, apenas para ser desmontado logo após a feira”. (LANGDON, 2015)

Em 2015, Frei Otto recebeu o prêmio Pritzker de Arquitetura como reconhecimento pelas suas pesquisas em membranas tensionadas e contribuição para a Arquitetura (PRITZKER, 2015).



Figura 2.10: Pavilhão alemão na expo'67 em Montreal
Fonte: OTTO, 1967 (Archdaily).

2.4.2. Pátio da Mesquita Sagrada do Profeta

Desde os anos 50, várias estruturas cujo funcionamento é similar ao de guarda-chuvas foram construídas como coberturas retráteis. O princípio de funcionamento do guarda-chuva é conhecido há séculos: uma membrana tensionada é associada a nervuras rígidas que por sua vez são conectadas a uma haste central.

Segundo Walter (2006) Frei Otto desenvolveu nos anos 50 um novo tipo de estrutura de membrana baseada no princípio da superfície mínima, no qual a membrana em formato de funil foi fixada abaixo da estrutura. Também, para a exibição de paisagismo de Colônia, em 1971, numa parceria com Bodo Rasch, criou

a primeira estrutura guarda-chuva com um diâmetro de 19 metros e que também foi construído de acordo com os mesmos princípios.

Da autoria de Bodo Rasch, grandes estruturas guarda-chuva foram instaladas em dois pátios da Mesquita Sagrada do Profeta em Medina, na Arábia Saudita. Elas são abertas durante o dia e fechadas durante a noite, contribuindo para a regulação do clima no edifício. Depois de alguns dias a temperatura das superfícies sombreadas tornou-se significativamente mais amena que seus arredores.



Figura 2.11: Guarda sol na praça da mesquita sagrada do profeta, Medina, Arábia Saudita.
Fonte: Nabawi, 2016.

Originalmente, em 1992 (SL-RASCH), doze grandes estruturas guarda-chuva de projeção quadrada (com 25 metros de aresta) foram instaladas; porém, tendo em vista a intensa peregrinação religiosa à cidade em períodos como o ramadã – a segunda mais importante para o islamismo – outras duzentos e cinquenta estruturas guarda-chuva foram instaladas nos arredores da mesquita ao longo dos dez anos subsequentes.

Com funcionamento similar ao de um guarda-chuva convencional, um cilindro hidráulico fixado no centro do mastro move os braços do guarda-chuva durante a abertura e o fechamento. A proteção da membrana quando fechada é realizada por leves abas de carbono que estão conectadas aos braços do guarda-chuva. Durante o fechamento, eles dão suporte ao dobramento da membrana e, quando a estrutura

está completamente fechada, ela provê uma cobertura sólida para o tecido. (WALTER, 2006).



Figura 2.12: Guarda sol em Medina.
Fonte: Design-like, 2016.

2.5. Estruturas de Membranas Pneumáticas

Estruturas pneumáticas são estruturas de membrana estabilizadas pela pressão de ar comprimido, comportando-se como um “sólido homogêneo elástico” (ENGEL, 2001). Apesar de também utilizarem cabos como as membranas tensionadas, sua função nas membranas pneumáticas é diferente: fornecer uma contenção para delimitar seu volume de expansão e fixá-la no solo.

Existem dois tipos de estruturas de membrana pneumática: estruturas infláveis e estruturas suportadas por ar (alta pressão e baixa pressão, segundo Hanaor e Levy (2000)). Estruturas infláveis são compostas por no mínimo duas camadas de membranas flexíveis costuradas e seladas, para que posteriormente o ar seja injetado entre ambas as camadas enrijecendo a estrutura, como em coletes

salva-vidas. Já as estruturas suportadas por ar possuem apenas uma camada de membrana flexível, e se torna utilizável através de fluxo constante de ar internamente à estrutura fazendo com que a pressão do ar interna a membrana seja maior que a externa, tornando o ambiente pressurizado. As estruturas suportadas por ar precisam de uma constante injeção de ar devido ao inevitável vazamento de ar decorrente de suas aberturas (YELLAPRAGADA, 2015).

Uma estrutura pneumática, assim como balões, tende a resultar em volumes análogos a esferas, uma vez que o ar comprimido injetado dentro no sistema confere pressão uniforme nas membranas da estrutura.

2.5.1. The Bubble

O projeto chamado “The Bubble” foi concebido pelo escritório de Arquitetura Diller Scofidio + Renfro para a expansão do museu Hirshhorn em Washington, DC.

O prédio original do museu Hirshhorn foi terminado em 1974, sendo um dos últimos grandes projetos de Gordon Bunshaft, arquiteto do modernismo pós-guerra estadunidense. Embora tenha suas características e relevância para o movimento moderno, trata-se de um edifício arquitetônico que possui muitas limitações para a realização de qualquer intervenção que venha a modificar tanto sua estrutura quanto suas vedações (OUROUSSOFF, 2009).

O prédio original, modernista, é formalmente concebido como um aparente cilindro de concreto cinza e sem aberturas em sua superfície revolucionada, dando ao edifício uma aparência massiva. Esse cilindro possui um grande pátio circular levemente deslocado do centro, cujo perímetro atravessa todos os pavimentos e cobertura acima, convertendo o cilindro em uma forma de “tubo”.

A proposta idealizada traduz-se em uma membrana pneumática suportada por ar (baixa pressão) com um tecido levemente azulado e translúcido – sem forma estática. A conformação de seus espaços se dará por uma série de cabos de aço que envolverá “a bolha”, de modo a se condicionar formalmente às intenções dos arquitetos. Uma vantagem do sistema é que este permite ainda que a ocupação dos espaços seja extremamente flexível, bastando apenas reconfigurar o tensionamento dos cabos (DILLER SCOFIDIO + RENFRO, 2009).

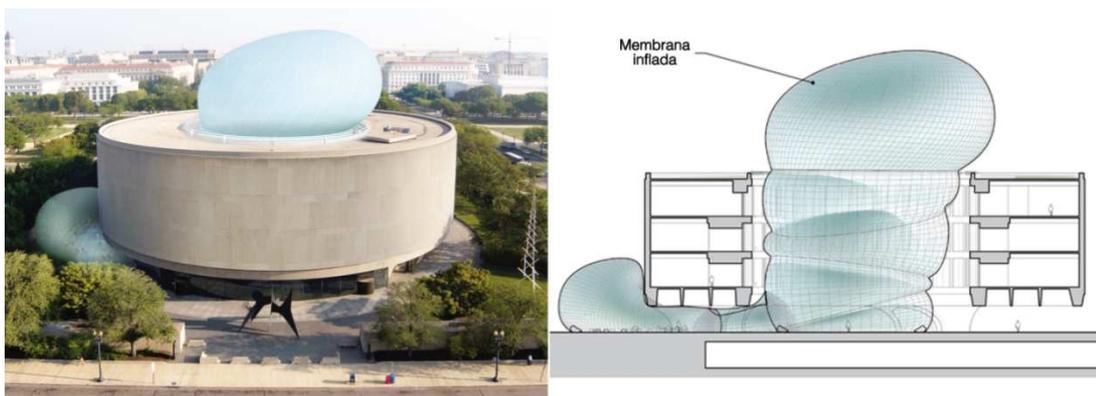


Figura 2.13: The Bubble – museu Hirshhorn.
Fonte: Diller Scofidio + Renfro, 2009.

A amarração idealizada para a estrutura permitirá que esta “escorra” por baixo do “tubo” de concreto do museu original gerando espaços adicionais na implantação e, também, conterà a estrutura para que esta se erga como uma torre a aproximadamente 45 metros de altura, para então apoiar-se na cobertura do edifício original, criando uma protuberância acima da cobertura a ser utilizada como uma área de descanso. Além da estrutura de cabos que conterà a instalação, para estabilizá-la no solo um reservatório com água foi inserido internamente a estrutura para aumentar seu peso, mantendo-a mais firme ao chão. (OUROUSSOFF, 2009).



Figura 2.14: The Bubble – museu Hirshhorn.
Fonte: Diller Scofidio + Renfro, 2009.

O espaço principal da estrutura ocupará o pátio interno, contendo um auditório que poderá comportar cerca de 800 pessoas na platéia em formato semicircular e um palco, para apresentações de palestras, artes cênicas, filmes, leituras e debates. Tendo em vista a qualidade semitransparente do tecido, o público terá plena permeabilidade visual aos espaços do prédio tradicional. (CHIN, 2009).

O projeto foi concebido para ser uma estrutura efêmera, sendo programada para ser instalada (inflada) duas vezes por ano - em maio e outubro – podendo ser guardada sem que interfira no prédio original do museu. “A Bolha’ produz um edifício macio inserido dentro de outro rígido, no qual espaços existentes e novos, tanto internos quanto externos estarão entrelaçados como se brincassem um com o outro.” (DILLER SCOFIDIO + RENFRO, 2009).

Intensos debates foram realizados a respeito da instalação dessa estrutura pneumática dentro de um museu modernista, inserido em uma cidade conservadora (OUROUSSOFF, 2009) e com um custo muito elevado, resultando então no cancelamento do projeto em 2013.

2.5.2. Ark Nova

Ark Nova é um auditório criado a partir de uma estrutura inflável que se assemelha a um grande balão de ar, com formato de esfera achatada. O projeto foi desenvolvido pelo arquiteto Arata Isozaki em parceria com o artista plástico Anish Kapoor, baseado na escultura/instalação Leviatã que o artista havia criado para a exposição “Monumenta” no edifício Grand Palais, em Paris. A instalação possuía 35 metros de altura e se estendia ao longo dos 13.500m² do palácio, tendo a aparência de uma grande pele roxa por fora contendo, porém, o interior na cor vermelha e semi-opaco (FREARSON, 2011).



Figura 2.15: Instalação Leviatã
Fonte: Adaptado de TUCHILA, 2016.

Em decorrência da devastação causada pelo tsunami ocorrido no Japão em março de 2011, a organização do festival suíço “Lucerne” em parceria com a

agência japonesa Kajimoto de gestão artística propuseram a criação de uma estrutura dinâmica que pudesse comportar apresentações artísticas de diversas áreas para a população atingida pelo tsunami. O projeto foi nomeado de Ark Nova em referência à história bíblica da arca de Noé, a qual foi criada para trazer uma nova esperança aos habitantes da terra. “Naturalmente, os moradores da região ainda estão sofrendo das consequências diretas e indiretas dessa trágica catástrofe e estão de luto pelas perdas familiares e de amigos. O projeto tem o objetivo de trazer uma nova esperança para as pessoas através de música e arte.” (FREARSON, 2011).

Sob a direção de Arata Isozaki, o espaço foi projetado para comportar apresentações artísticas especiais, sendo necessário o auxílio de consultorias específicas nas áreas de projeto acústico e cênico. O espaço possui aproximadamente 1000m² e foi projetado para admitir cerca de 500 pessoas, distribuídas em assentos coletivos feitos com madeira reaproveitada dos escombros do tsunami.



Figura 2.16: Concerto musical na instalação Ark Nova.
Fonte: KAPOOR, 2013.

A estrutura é constituída por uma membrana elástica inflável similar à da instalação Leviaã, de material elástico, porém equipada com dispositivos cênicos e de som. A estrutura é deslocada vazia e dobrada, ocupando espaço físico mínimo e facilitando seu transporte entre os sítios. Quando finalizado o evento, a estrutura é

esvaziada e colocada na caçamba de um caminhão, junto ao equipamento desmontado, podendo ser transportada a outros espaços.



Figura 2.17: Instalação Ark Nova.
Fonte: KAPOOR, 2013.

3. Pantografia

A palavra pantografia é derivada de duas palavras de origem grega, sendo o primeiro *panto*, que significa todo, e o segundo *grafia*, que significa escrita. A união destes radicais se deu para a criação de um instrumento de cuja função era a de copiar, ampliar ou reduzir qualquer tipo de desenho.

3.1. Origens do Pantógrafo

O pantógrafo foi criado pelo matemático e astrônomo alemão Christoph Scheiner – que teria sonhado em 1603 com um instrumento capaz de realizar cópias (GALILEI e SCHEINER, 1613) – após o evento, teria continuado a sofisticá-lo para aprimorar seu funcionamento, publicando-o pela primeira vez em seu livro *Pantographice*.

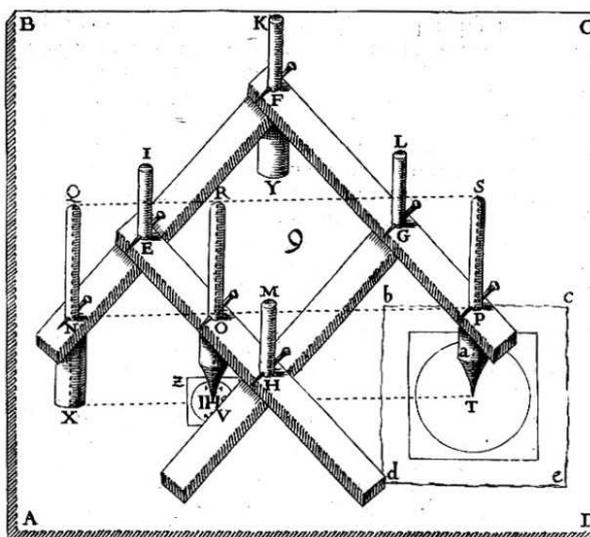


Figura 3.1: Ilustração de um pantógrafo.
Fonte: SCHEINER, 1613.

Seu funcionamento se baseia fundamentalmente no conceito de semelhança de triângulos e a razão de sua ampliação ou redução se dá por homotetia, podendo estes conceitos serem conjuntamente compreendidos através de um teorema elementar da geometria, conhecido como segundo teorema de Tales.

3.2. O segundo teorema de Tales e semelhança de triângulos.

Tales de Mileto era um matemático e filósofo pré-socrático sobre o qual pouco se sabe, porém, seus teoremas geométricos influenciaram o desenvolvimento de toda a matemática desde a clássica até a moderna.

Os teoremas de Tales trazem dois conceitos fundamentais para seu entendimento: razão e proporção. Razão em matemática é a relação obtida pela divisão de uma grandeza qualquer por alguma outra; proporção é a coincidente igualdade de duas razões de origens distintas, ou seja, uma constante entre razões de diferentes procedências (figura 3.2).

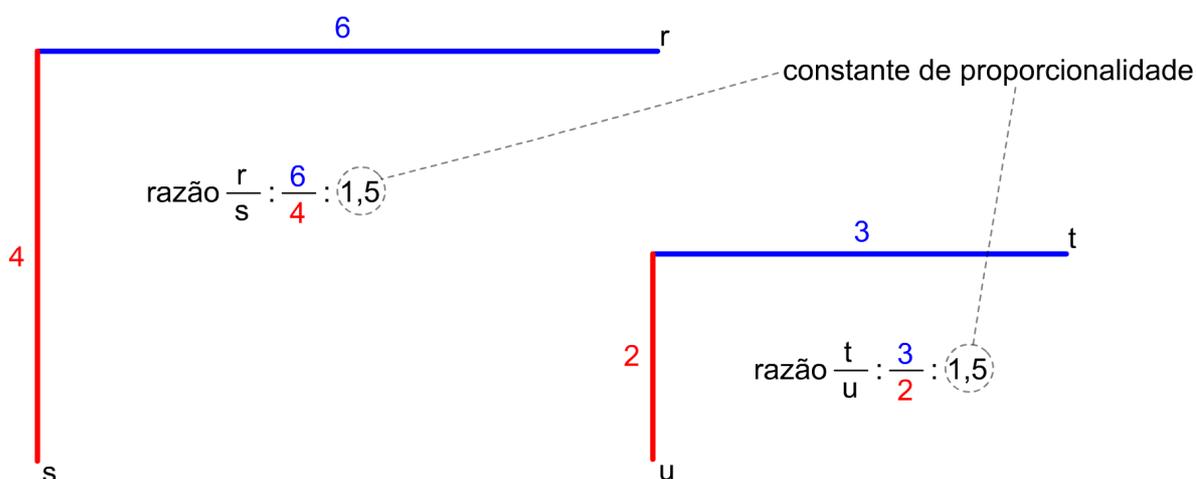


Figura 3.2: Razão e Proporção.
Fonte: elaborado pelo autor.

A partir destas concepções, pode-se então analisar o segundo teorema de Tales cuja descrição “um feixe de paralelas determina, sobre duas secantes quaisquer, segmentos proporcionais”. Simplificando, significa dizer que em um desenho qualquer, se este possuir um conjunto com algumas retas que sejam paralelas (r, s, t) entre si – ou seja, que jamais se cruzem – podemos traçar outras retas que sejam secantes (m, n) a este conjunto de retas paralelas, ou seja, duas novas retas que não possuem qualquer relação entre si, mas que cruzem em qualquer ângulo com àquelas do conjunto anteriormente citado. Como resultado deste cruzamento, obtemos diversos segmentos de retas que serão sempre proporcionais entre si, na mesma secante. E também, a razão existente entre qualquer segmento extraído de uma destas retas secantes, com o segmento correspondente na outra reta secante, será sempre igual - constante. (figura 3.3).

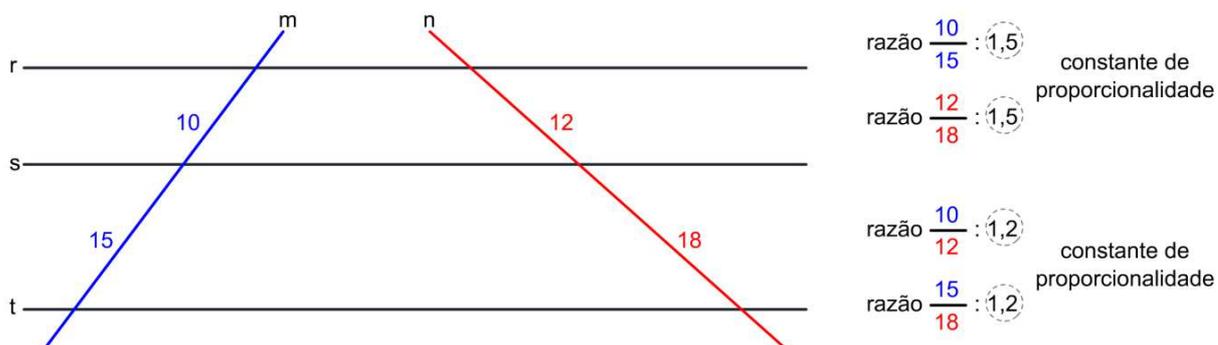


Figura 3.3: Segundo teorema de Tales.
Fonte: elaborado pelo autor.

As relações matemáticas estabelecidas por Tales de Mileto em seu teorema são precisamente as mesmas percebidas em semelhança de triângulos. Porém, é necessário que as retas secantes descritas se cruzem em algum ponto que ocasione um vértice comum a ambas e, em consequência, resulte em triângulos (figura 3.4).

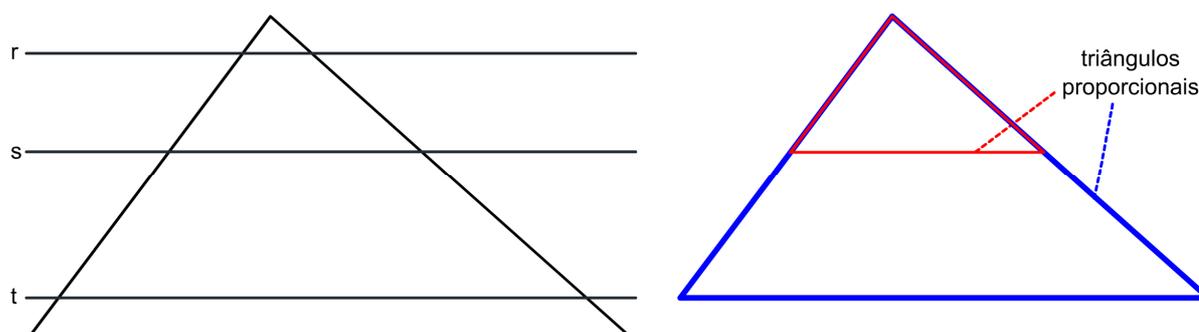


Figura 3.4: Semelhança de triângulos.
Fonte: elaborado pelo autor.

3.3. Homotetia

Segundo Fainguelernt e Nunes (2012), homotetia (homo: similar + tetia: posição), é uma relação matemática através da qual uma figura pode ser ampliada ou reduzida a partir da figura original, estabelecendo-se um ponto fixo “O” como vértice da transformação, a ser chamado de centro de homotetia, e com uma razão “k” para ampliação ou redução determinada, como na figura 3.5.

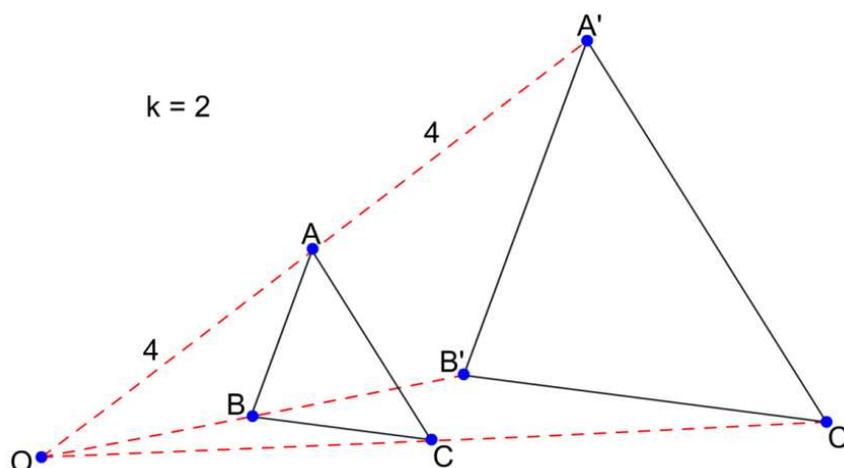


Figura 3.5: Homotetia.
Fonte: elaborado pelo autor.

O instrumento pantógrafo é concebido através de um modelo matemático no qual dois triângulos semelhantes possuem um vértice “O” em comum e cujas arestas congruentes entre os dois triângulos sejam paralelas. Assim sendo, as duas arestas que partem do ponto “O” serão colineares entre triângulos e a relação entre suas dimensões serão precisamente a razão “k” de homotetia (figura 3.6).

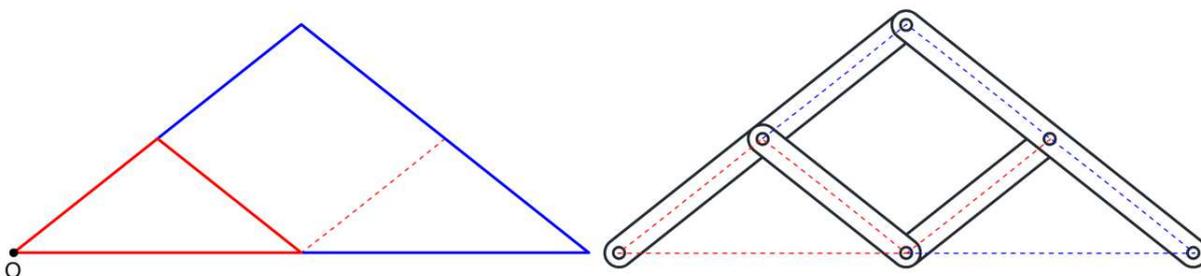


Figura 3.6: Semelhanças de triângulos aplicadas ao pantógrafo.
Fonte: elaborado pelo autor.

A analogia entre os parâmetros de homotetia e o funcionamento do pantógrafo não são meramente coincidentes: a homotetia constitui a base fundamental para funcionamento de um pantógrafo, alternando seus vértices apenas para sua utilização em reprodução, ampliação ou redução.

A figura 3.7 ilustra o funcionamento de um pantógrafo realizando a ampliação de um quadrado. Em cada etapa descrita – 1, 2, 3 e 4 – uma das arestas do quadrado menor é ampliada para criação do maior quadrado.

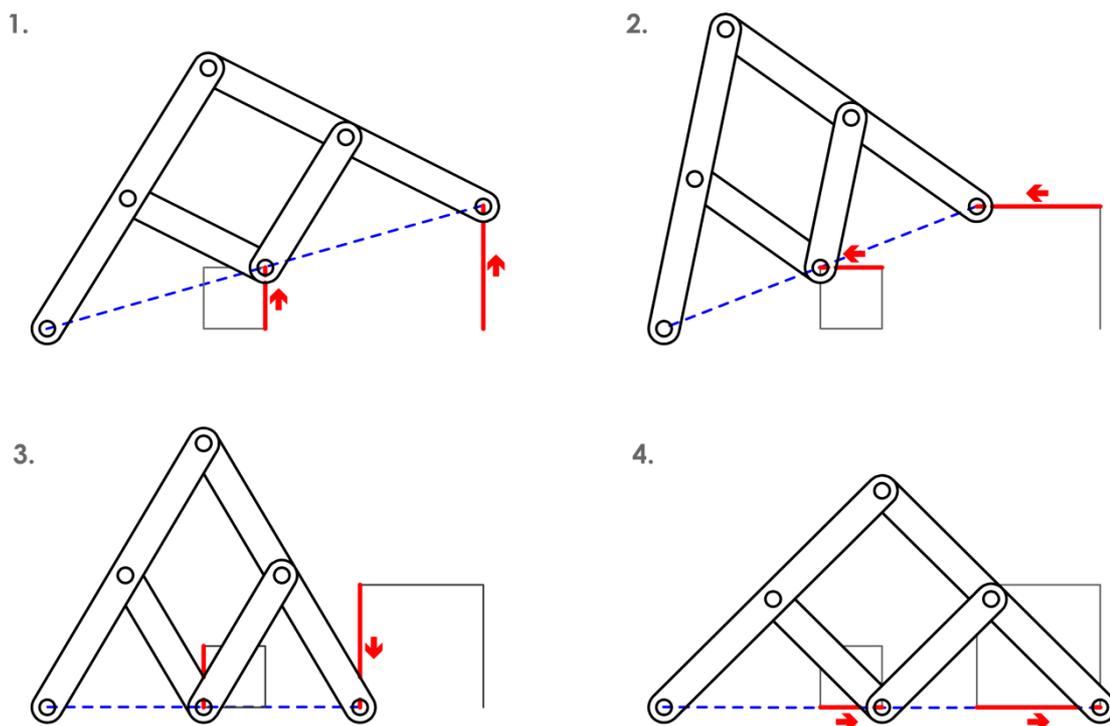


Figura 3.7: Ampliação pantográfica de um quadrado
Fonte: elaborado pelo autor.

3.4. Sofisticação geométrica do pantógrafo: pantografia tridimensional

A partir da invenção de Scheiner e seu contínuo desenvolvimento, no século XIX dois franceses apaixonados por esculturas – Achilles Collas e Ferdinand Barbenienne - criaram uma empresa para realizar reproduções de esculturas em escala reduzida (figura 3.8), a partir de um mecanismo baseado no pantógrafo e sua geometria.

O instrumento desenvolvido por Collas (figura 3.9) possuía duas bases circulares giratórias e transladáveis sobre uma régua de madeira. Estas estavam conectadas através de uma transmissão com fuso (engrenagens ligadas a uma barra roscada) e com uma manivela em uma de suas pontas: Ao girar a manivela o fuso também era rotacionado, acionando as engrenagens que, por sua vez, rotaciona ambas as bases com igual distância angular. A translação das bases sobre a régua permite alterar a razão de homotetia, uma vez que a posição destas funciona analogamente aos vértices de um triângulo. Na segunda base rotatória – mais distante do centro de homotetia - era colocada a matriz (escultura a ser

copiada) e na primeira, a matéria prima a ser esculpida. Era imprescindível que as bases giratórias estivessem perfeitamente sincronizadas uma com a outra.



Figura 3.8: Escultura de Collas e Barbenienne.
Fonte: Expertissim, 2016.

Este mecanismo permitiu a realização de reduções perfeitas de diversas esculturas, como a Venus de Milo (REINIS e BARYE, 2007). A invenção adicionou um terceiro eixo de operação em um sistema pantográfico para que o instrumento pudesse também operar em profundidade e trabalhar o volume das peças.

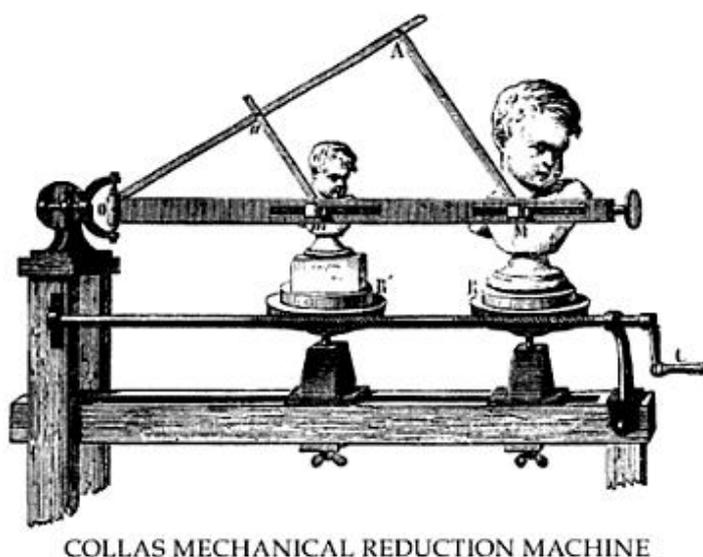


Figura 3.9: máquina de redução de Collas e Barbenienne
Fonte: REINIS e BARYE, 2007.

4. Sistemas Pantográficos

Este capítulo aborda o funcionamento dos três sistemas articulados pantográficos selecionados por serem marcos na evolução dos sistemas pantográficos. Estes foram analisados segundo suas patentes de origem, que explicam o funcionamento de cada invento, sendo eles:

- US23503A: *Umbrella* de L. K. Selden, 1859;
- US3185164A: *Three dimensional reticular structure* de E. P. Pinero, 1961;
- US4942700: *Reversibly expandable doubly-curved truss structure* de C. Hoberman, 1990.

Durante a investigação nos sistemas de buscas de patentes, percebeu-se uma grande diversidade de aplicações nas quais o sistema geométrico não apresenta nenhuma inovação: Seu registro se dá majoritariamente por qualidades como o contexto de utilização, material, escala de trabalho, entre outros.

Contudo, as três patentes selecionadas possuem inovações geométricas no desenvolvimento/retração de suas articulações, ampliando as possibilidades de utilização das estruturas articuladas pantográficas em áreas diversas, incluindo Arquitetura.

4.1. Sistemas Articulados Pantográficos

A partir da invenção do pantógrafo e da compreensão de sua geometria, suas propriedades puderam ser aplicadas a outros dispositivos além da ilustração e escultura, dando início a vasta aplicação em campos da arquitetura, medicina e mecânica, por exemplo.

Não é possível determinar com precisão quando uma estrutura pantográfica foi criada pela primeira vez. Porém, em 1493, Leonardo da Vinci redigiu um manuscrito chamado codex Madrid que já continha uma ilustração de um sistema articulado pantográfico (figura 4.1). Apesar de a ilustração ser anterior à criação do instrumento pantógrafo – que dá origem à denominação destas estruturas – seu

funcionamento geométrico é análogo, o que permitiu a estas estruturas que se tornassem conhecidas como pantográficas.

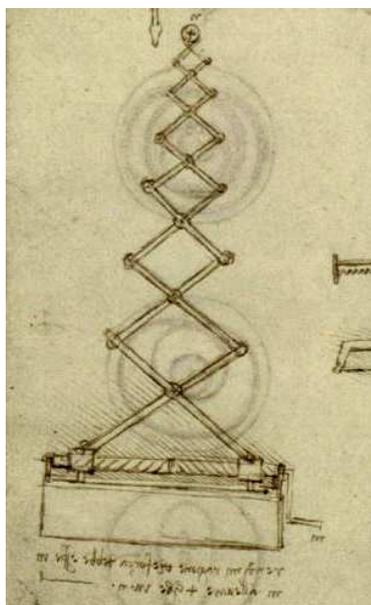


Figura 4.1: Estrutura Pantográfica presente no Codex Madri
Fonte: VINCI, 1974.

4.2. Funcionamento elementar das estruturas pantográficas.

Diversos tipos de articulações pantográficas foram desenvolvidas, sendo que o momento de criação de cada se deu em decorrência das diferentes necessidades onde sua utilização se fez necessária.

Apesar dessas variações, as barras pantográficas possuem elementos comuns a todas para seu funcionamento. Para fins de nomenclatura definiremos cada haste da articulação como barra pantográfica e para cada junção (*joint*) articulável chamaremos de junção, sendo uma em cada extremidade da barra pantográfica e outra junção intermediária posicionada no centro ou próximo deste (figura 4.2).

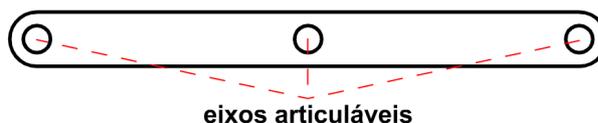


Figura 4.2: Barra pantográfica.
Fonte: elaborado pelo autor.

Todas as estruturas patenteadas que foram utilizadas nesta pesquisa se baseiam em diferentes utilizações desta barra, sempre conectadas a outras idênticas

formando pares ou trios articulados e cuja junção intermediária tenha posição variável ao longo da barra. Porém, sua utilização mais elementar, cuja origem não é identificável, utiliza um par de barras com desenvolvimento sempre simétrico e com junção intermediária precisamente posicionada na mediatriz da barra.

Para este par, seu desenvolvimento será análogo ao de retângulos cujas arestas adjacentes possuirão diferentes proporções, de acordo com o ângulo de rotação de suas barras articuladas através da junção central. Apenas quando as barras articuladas se encontrarem em posição específica que estejam perpendiculares entre si, as arestas adjacentes possuirão o mesmo tamanho e descreverão então um quadrado (figura 4.3).

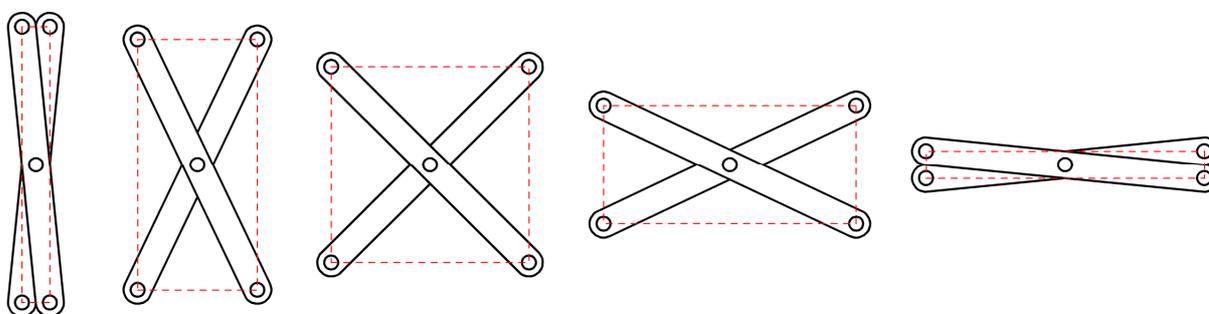


Figura 4.3: Desenvolvimento de par de barras pantográficas.
Fonte: elaborado pelo autor.

As junções articuláveis situadas nas extremidades permitem que outros pares de barras pantográficas possam ser conectadas sequencialmente. Uma vez que o conjunto dessas barras conectadas seja constituído por pares idênticos, as dimensões do desenvolvimento da estrutura será precisamente o resultado do somatório das arestas dos retângulos/quadrados (figura 4.4). Essa estrutura, comumente chamada de *lazy-tong* tem aplicação, por exemplo, na patente US4175644 (figura 4.5), um elevador pantográfico (SIKLI, 1979).

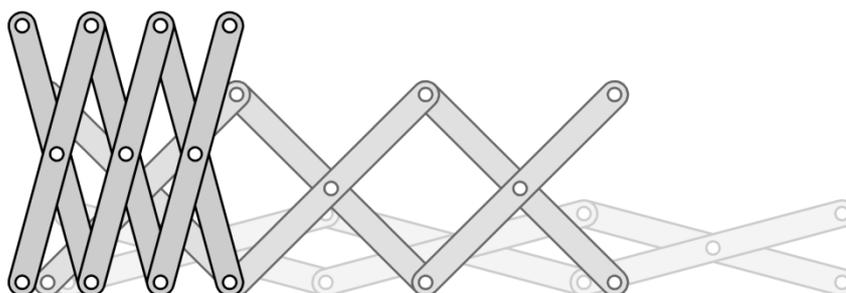


Figura 4.4.: Desenvolvimento de estrutura articulada pantográfica.
Fonte: elaborado pelo autor.

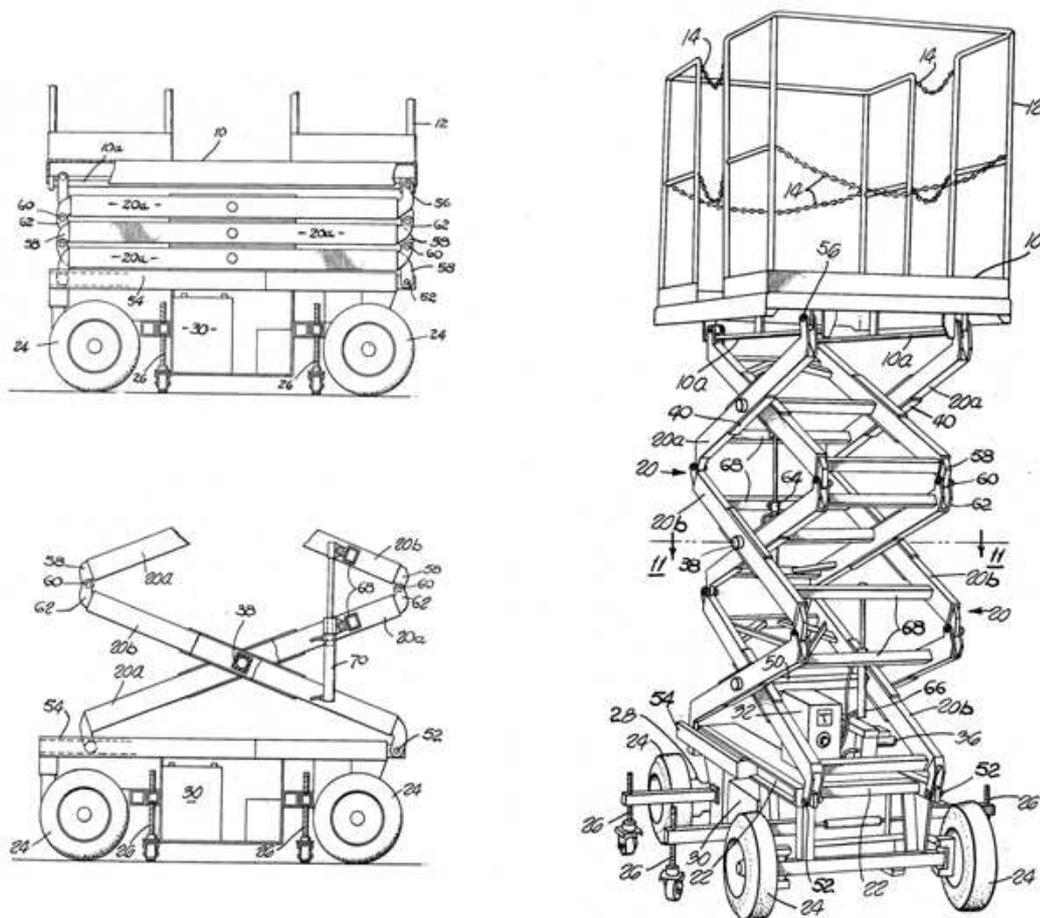


Figura 4.5.: Exemplo de aplicação de estrutura pantográfica: elevador.
Fonte: SIKLI, 1979.

Quando uma das barras articuladas possuir dimensão diferente, mas preservar sua junção intermediária no cruzamento das mediatrizes de ambas as barras, então sua forma será de um paralelogramo de diferentes proporções ao longo do desenvolvimento do par de barras. Quando conectados sequencialmente, dois comportamentos diferentes se desenvolverão de acordo com a seqüência de conexão das barras menores. Se as barras seguintes forem conectadas de forma a repetir o comportamento das barras anteriores, então seu desenvolvimento será equivalente a soma das arestas colineares dos paralelogramos (figura 4.6). Porém, se as barras menores se conectarem apenas a outras barras menores, então seu desenvolvimento se dará pelo espelhamento dos paralelogramos (figura 4.7).

Nesta segunda situação, como as barras menores estão todas diretamente conectadas, quando estas atingirem o maior comprimento possível na expansão do sistema – as barras se encontrarão colineares – a continuidade do desenvolvimento

acarretará uma retração no sistema até o ponto em que as barras maiores limitem a rotação das barras menores.

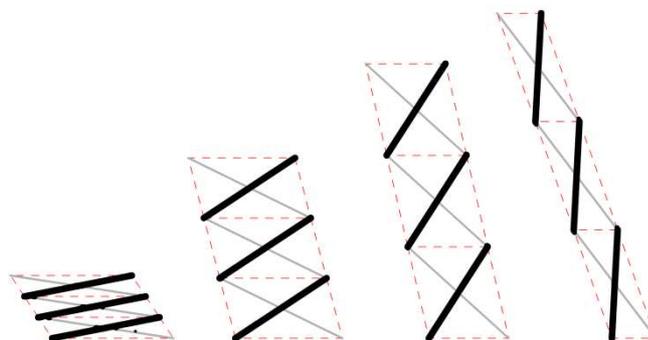


Figura 4.6.: Desenvolvimento de estrutura pantográfica com barras de diferentes comprimentos – contínua.

Fonte: elaborado pelo autor.

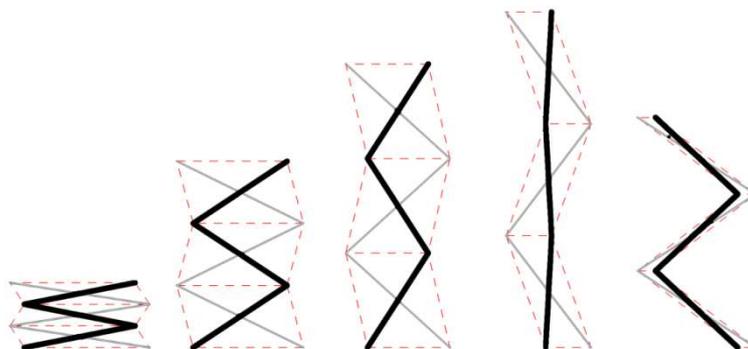


Figura 4.7.: Desenvolvimento de estrutura pantográfica com barras de diferentes comprimentos – espelhada.

Fonte: elaborado pelo autor.

Diversas outras formações são possíveis variando as dimensões das barras, a posição das junções, a forma das barras, o tipo de articulação – junção – e a quantidade de articulações. Algumas delas foram imprescindíveis para viabilizar as patentes selecionadas para este trabalho e serão desenvolvidas a seguir.

4.3. Guarda-chuva pantográfico – patente US23503.

Selden (1859) ampliou as possíveis aplicações nas articulações do pantógrafo e sua respectiva geometria. Em abril de 1859, patenteou um novo tipo estrutura para ser utilizada como um guarda-chuva (ou guarda-sol) cuja expansão - para ser utilizada como proteção - e retração - para sua compactação - ocorrem através de barras articuladas pantográficas (figura 4.8).

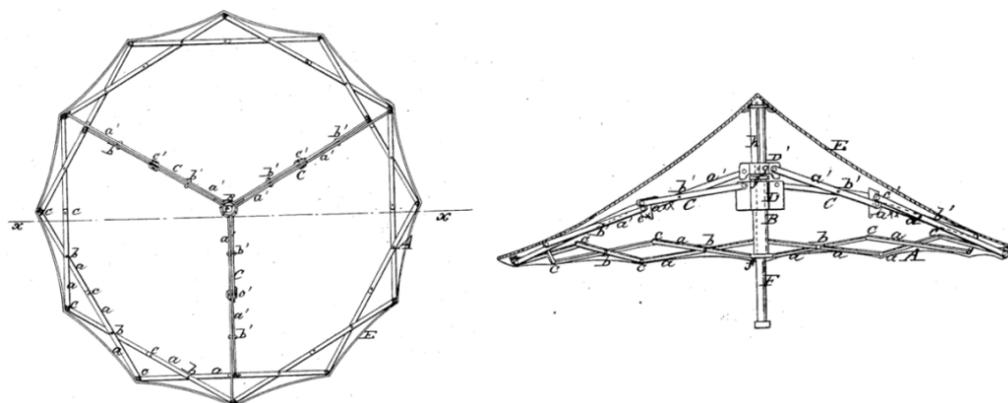


Figura 4.8.: Guarda-chuva pantográfico.
Fonte: SELDEN, 1859.

Diferentemente do pantógrafo de Scheiner, as articulações necessárias para os movimentos de expansão e retração de seu guarda-chuva precisavam compor um sistema pantográfico cuja transformação ocorresse de forma radial, utilizando diversas barras pantográficas unidas por junções que funcionem como raios da mesma circunferência. Ou seja, conforme o guarda-chuva fosse aberto, sua circunferência aumentaria mantendo o mesmo centro.

Selden percebeu que uma articulação pantográfica convencional, com barras simétricas contidas em um plano cartesiano, não poderia ser utilizada porque a transformação produzida ocorre com simetria em dois eixos, resultando em uma transformação linear e paralela entre as extremidades da barra – um retângulo de diferentes proporções. Ciente da convergência necessária nas transformações exercidas pelas extremidades, Selden solucionou o problema da estrutura deslocando a posição da junção intermediária nas barras das articulações. Dessa forma, a estrutura mantém a relação de simetria aplicada a apenas um eixo – este também convergente ao centro da circunferência e sendo a bissetriz do ângulo formado (figura 4.9).

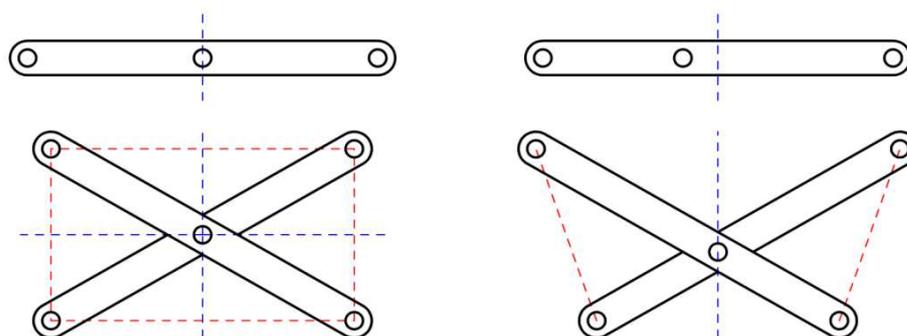


Figura 4.9: Barra pantográfica convencional comparada à proposta por Selden.
Fonte: elaborado pelo autor.

A utilização de barras pantográficas com junções intermediárias deslocadas de suas mediatrizes permite a criação de **estrutura articulada com formação radial convergente ao centro de uma circunferência, porém, com inevitável transformação nos três eixos cartesianos**. Se utilizada para uma estrutura cuja formação seja circular – análoga a um anel – e com transformação restrita apenas a um plano cartesiano, esta se tornará rígida devido à necessária variação angular das retas radiais, em decorrência de sua expansão/retração angular (figura 4.10). Para que esta estrutura seja exeqüível, é imprescindível que o centro da circunferência possa ser deslocado através de um eixo fixo e perpendicular ao plano no qual a expansão/retração seja projetável (figura 4.11).

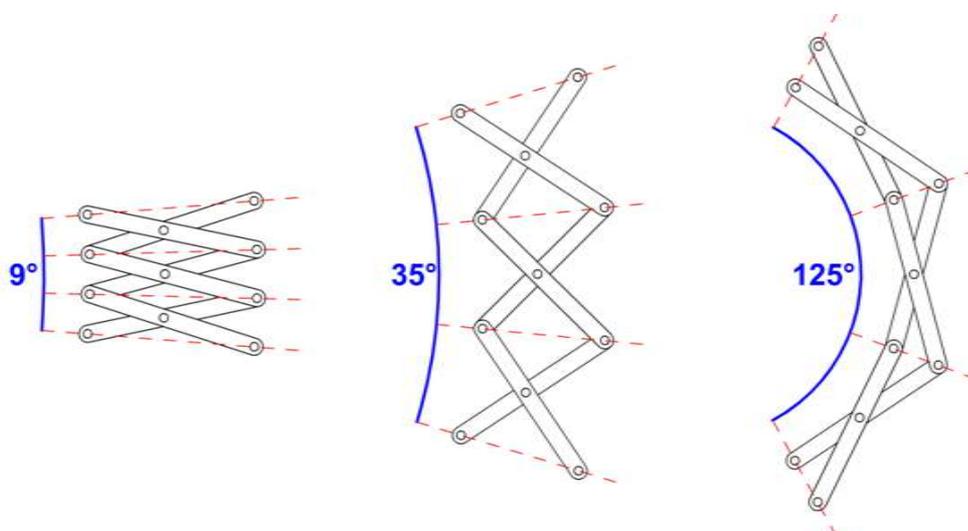


Figura 4.10: Alteração angular decorrente da translação das barras articuladas.
Fonte: elaborado pelo autor.

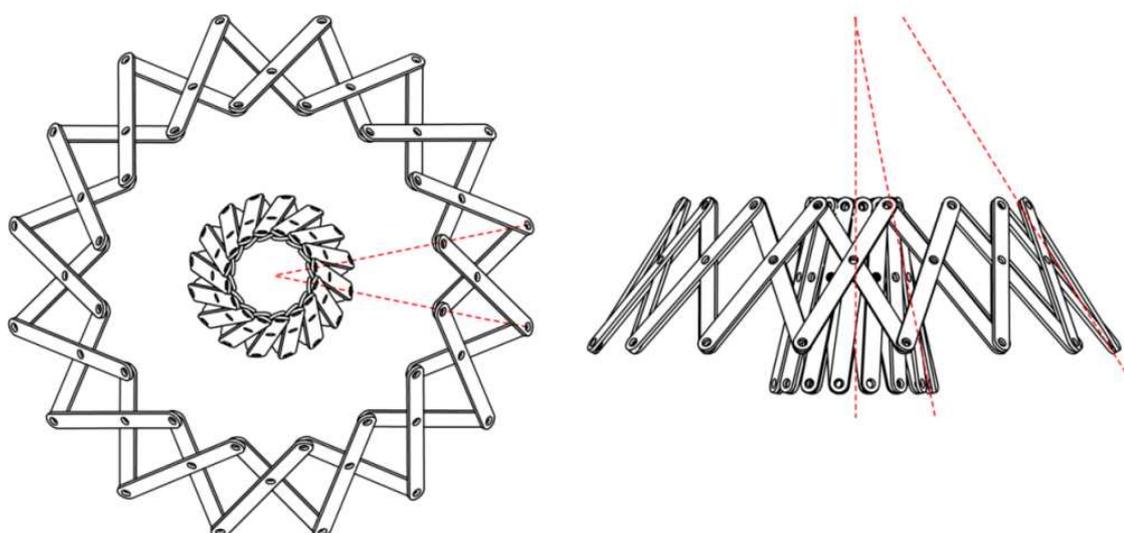


Figura 4.11: Desenvolvimento da abertura do guarda-chuva
Fonte: elaborado pelo autor.

4.4. Emilio Perez Piñero - cobertura itinerante de teatro

Em 1961, Emilio Perez Piñero venceu um concurso do VI encontro da União Internacional de Arquitetos em Londres, cujo tema pretendia que se projetasse uma instalação para teatro ambulante. Piñero propôs uma estrutura cuja cobertura é expansível através de articulações pantográficas para facilitar seu transporte e sua instalação. Ele concebe sua forma global a partir de uma fração da superfície de uma esfera, de modo que possa funcionar como abrigo ao tempo (FUNDACION EMILIO PEREZ PIÑERO, 2016).

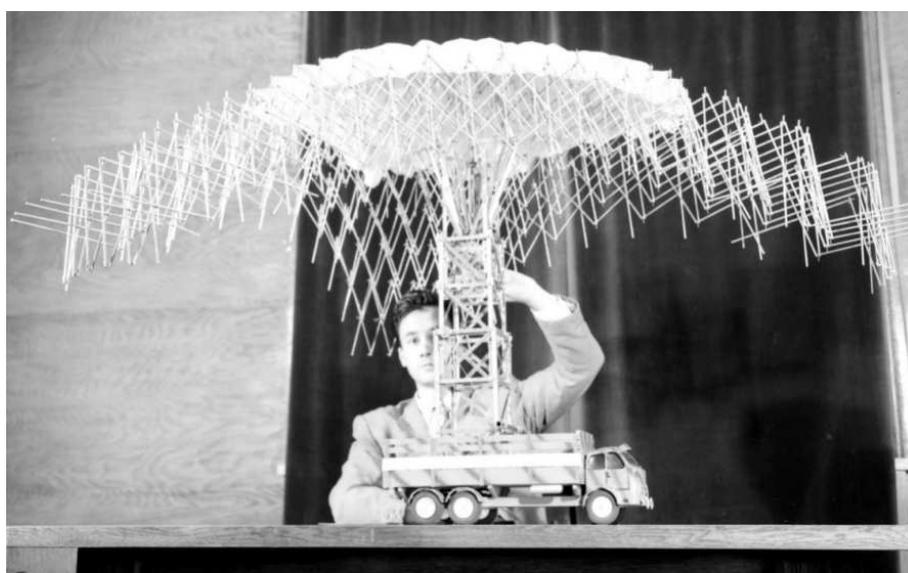


Figura 4.12: Emílio Piñero e sua maquete da cobertura de teatro itinerante.
Fonte: RAMON, 2016.

O princípio de funcionamento das articulações para retrair e expandir segundo uma formação esférica é similar ao guarda-chuva de Selden: Piñero desloca a junção intermediária de suas barras articuladas para que, ao serem rotacionadas, possam recursivamente funcionar como arcos expansíveis, aumentando o ângulo de curvatura e a projeção da cobertura em solo, conseqüentemente. (FUNDACION EMILIO PEREZ PIÑERO, 2016)

Apesar dessa semelhança, as demais características diferem das pantográficas convencionais, pois a estrutura proposta por Piñero em sua patente se baseia em **articulações pantográficas tridimensionais compostas por três barras**, todas interligadas a junção intermediária por uma peça com três pivôs uniformemente distribuídos através de igual rotação - 120 graus. Diversas cópias desse conjunto são então conectadas pelas junções das extremidades das barras.

Não obstante sua utilização para uma superfície esférica, Piñero descreve também em sua patente a utilização do mesmo sistema com a junção intermediária alocada na mediatriz das barras pantográficas, criando uma superfície plana, como na figura 4.13.

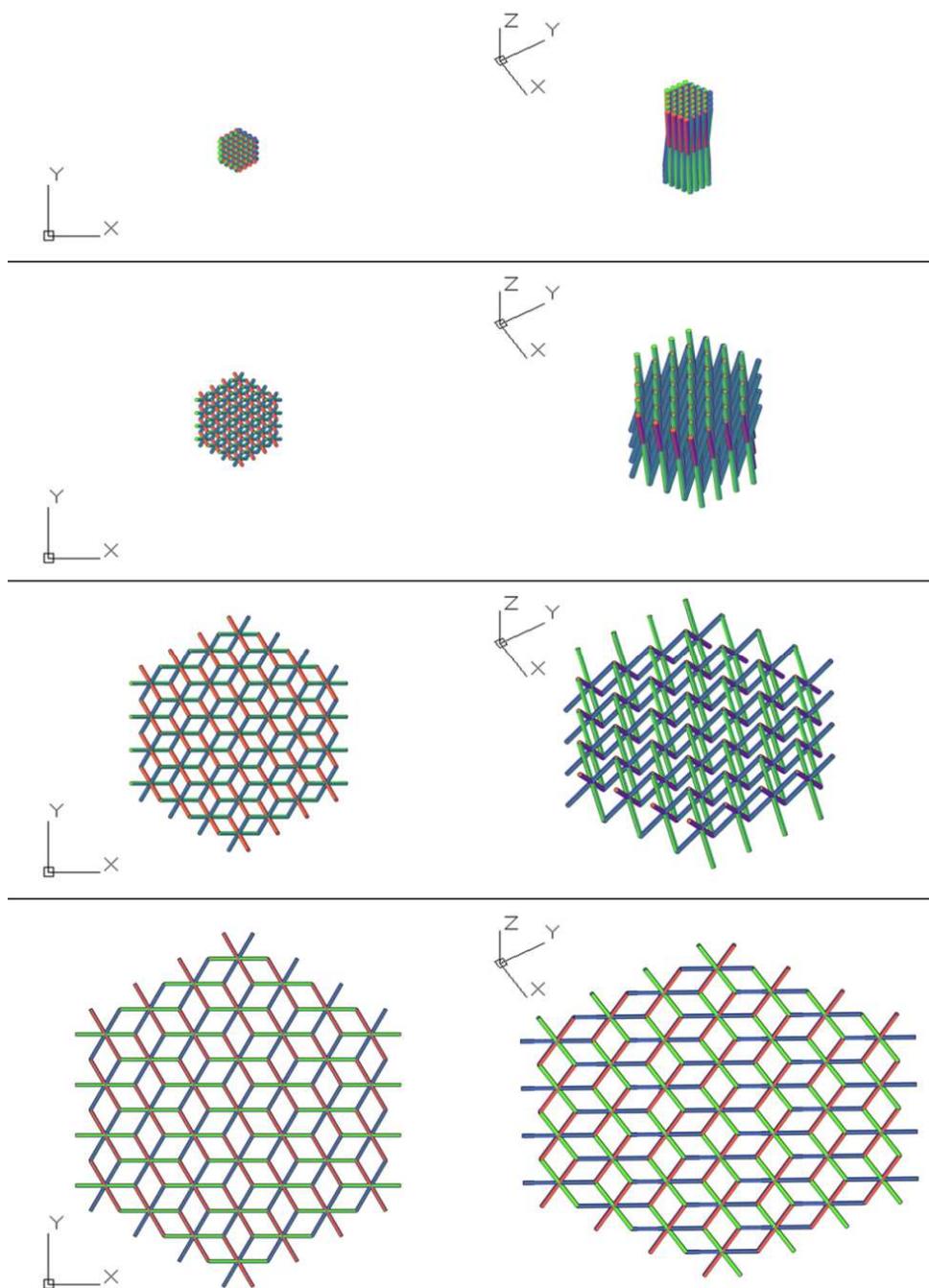


Figura 4.13: resultado da expansão das barras articuladas com junção intermediária no centro.
Fonte: elaborado pelo autor.

4.5. Chuck Hoberman - barra de ângulo único.

Em 1990, Hoberman introduziu um grande avanço na pesquisa de articulações pantográficas com a invenção de sua estrutura treliçada expansível e reversível de dupla curvatura (*Reversibly expandable doubly-curved truss structure*). Essa estrutura tornou Hoberman mundialmente conhecido e seu funcionamento incitou intensamente novas pesquisas na área das estruturas pantográficas.

A principal inovação presente nessa patente foi a criação da *Single-angulated bar* (barra de ângulo único). Hoberman, ao invés de utilizar as tradicionais barras pantográficas retilíneas, criou novas estruturas a partir de barras anguladas, ou seja, formada por duas semi-retas convergentes não paralelas, unidas pela junção intermediária (figura 4.14). A vantagem de sua utilização se deu por possibilitar, pela primeira vez a uma estrutura pantográfica, a transformação destas articulações restritas a **planos radiais de expansão sem variação angular**, ou seja, restrita a dois eixos cartesianos – diferentemente das criações anteriores, nas quais as expansões radiais ampliam o ângulo de curvatura da estrutura - como na obra de Piñero - ou, para impedir de fazê-lo, operam transformações em três eixos cartesianos - como na invenção de Selden.

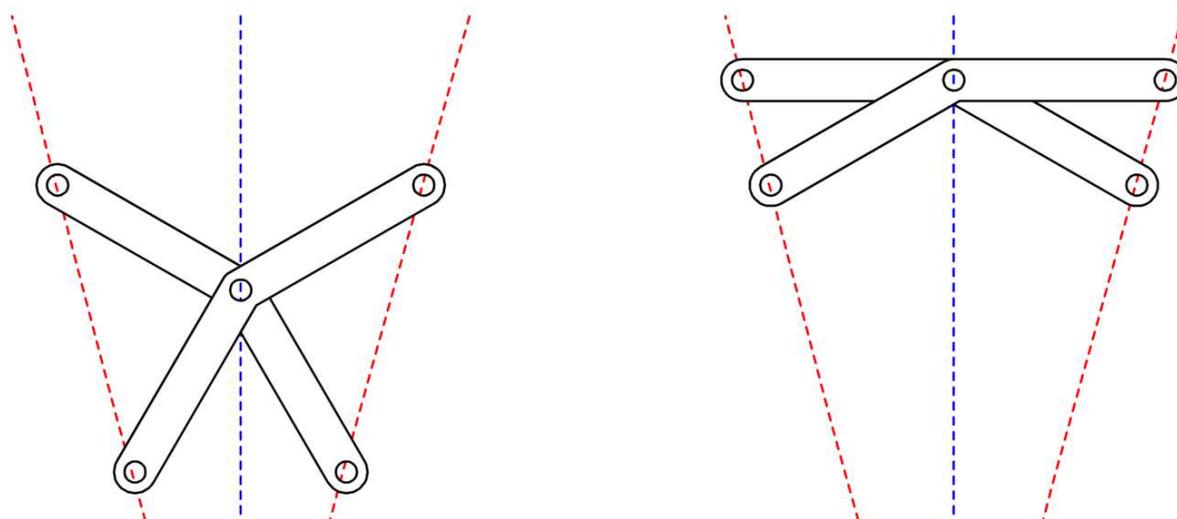


Figura 4.14: Expansão da estrutura através das barras de ângulo único.
Fonte: elaborado pelo autor.

Hoberman utilizou deste princípio para investigar e criar diversos poliedros expansíveis, como a esfera de Hoberman, construída em estruturas de grande porte, mas também, desenvolvida como brinquedo infantil (figura 4.15).

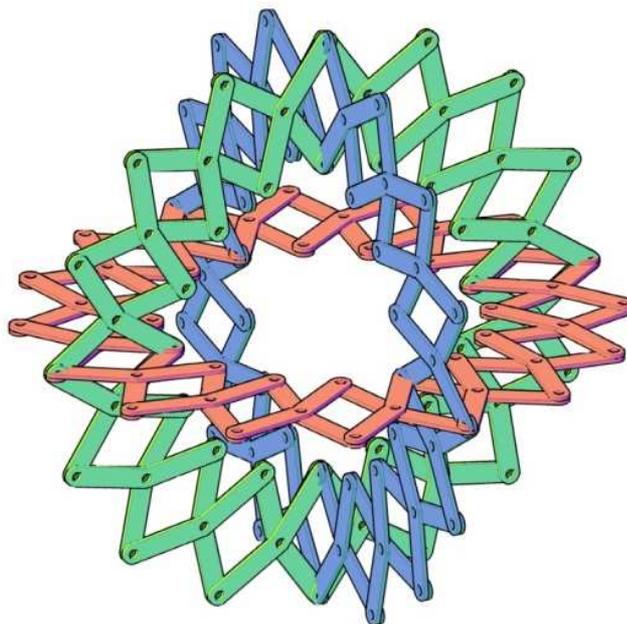


Figura 4.15: Esfera de Hoberman.
Fonte: elaborado pelo autor.

Na descrição de sua patente, Hoberman investiga algumas variações possíveis de sua barra de ângulo único e também, diferentes formações decorrente de variações destas. Na figura 4.16, por exemplo, Hoberman utiliza barras de diferentes tamanhos para gerar uma estrutura anelar irregular, e em sua representação insere as linhas de convergência que perpassam todas as junções nas extremidades da barra. Utilizando de quaisquer duas linhas convergentes, se estabelece o plano de transformação de cada segmento do conjunto.

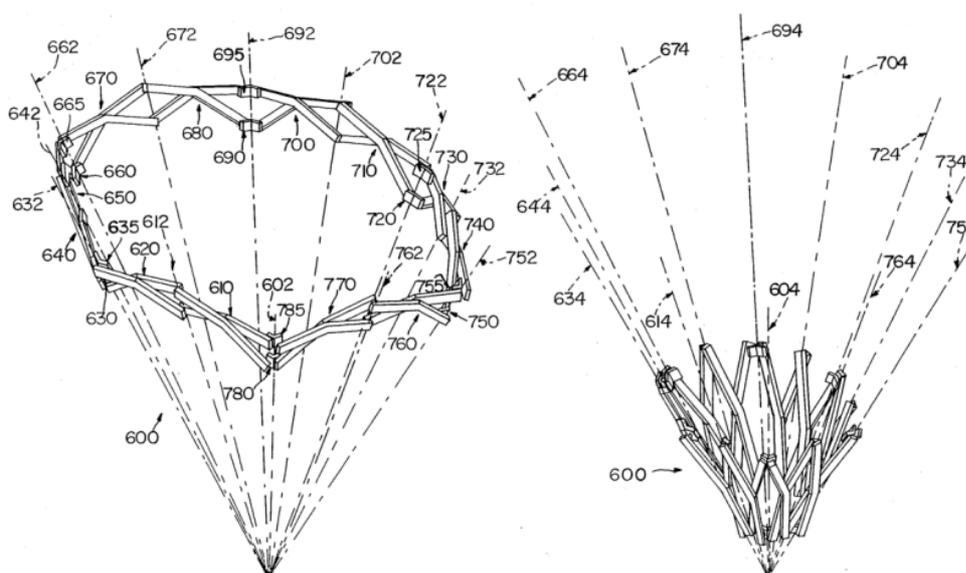


Figura 4.16: investigações de Hoberman.
Fonte: HOBBERMAN, 1990.

Hoberman contribuiu significativamente para ampliar as possibilidades de utilização de estruturas articuladas pantográficas, uma vez que, agora, qualquer aresta de algum plano ou sólido geométrico pode ser substituída por um conjunto de articulações pantográficas, sendo este desenvolvimento fixo em apenas um plano cartesiano (figura 4.17). Decorrente de sua criação, pesquisadores e inventores têm se dedicado ao estudo destas estruturas e concebido novas possibilidades e aplicações a topologias esféricas, arqueadas e cupulares ao longo dos últimos vinte e cinco anos.

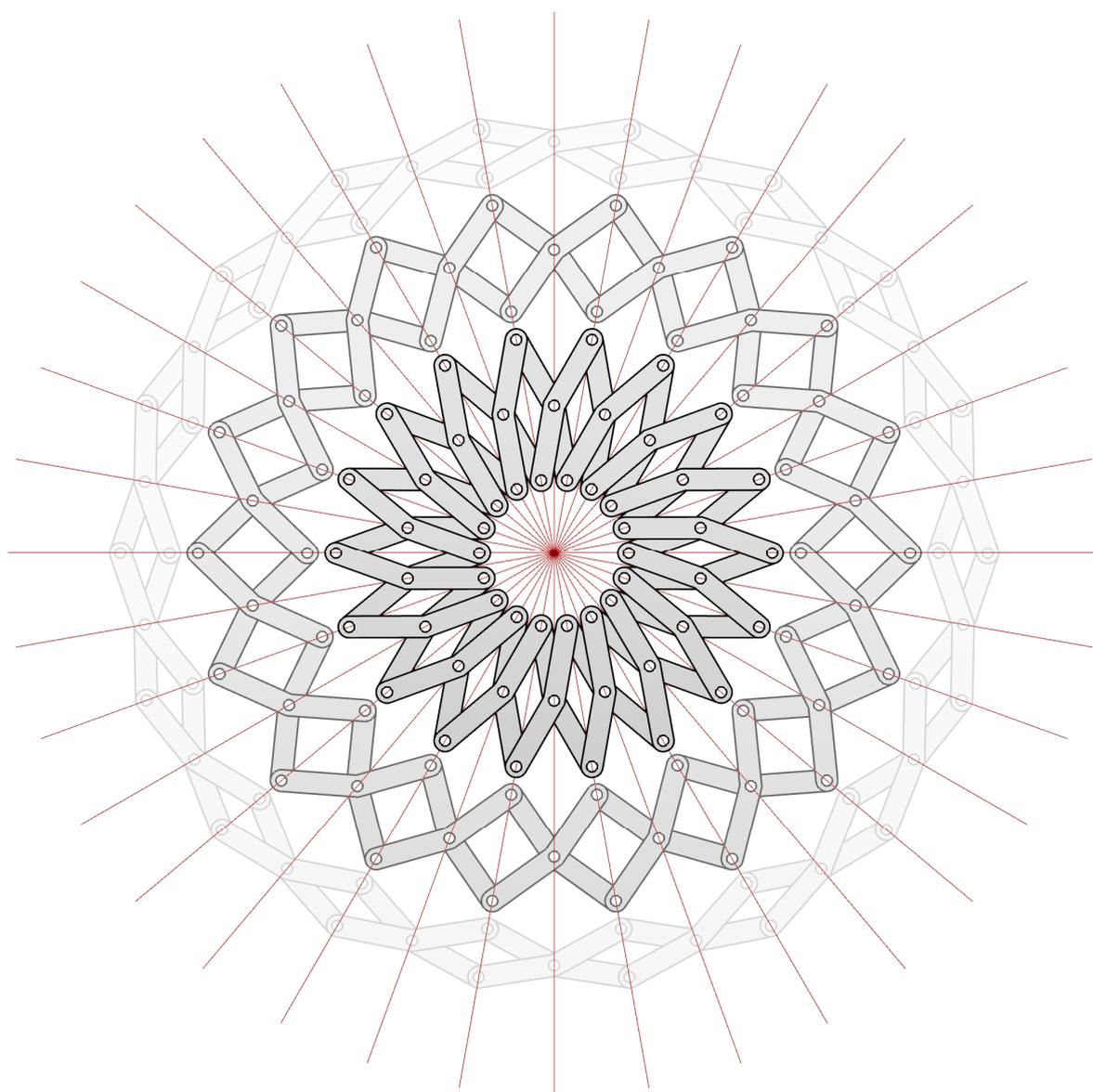


Figura 4.17: Desenvolvimento de sistema constituído por *single-angulated bars*.
Fonte: elaborado pelo autor.

5. Junções e Graus de Liberdade

Os sistemas geométricos desenvolvidos neste trabalho possuem junções articuladas – *links* – que conectam elementos rígidos. A compreensão dos tipos de junções e de suas possibilidades geométricas para realização de simulações de sistemas já existentes é interessante por viabilizar sua fabricação. Porém, para a produção de novos sistemas articulados, sua compreensão contribui com o repertório de soluções possíveis, se mostrando uma importante ferramenta para facilitar uma maior liberdade criativa no desenvolvimento de novos modelos.

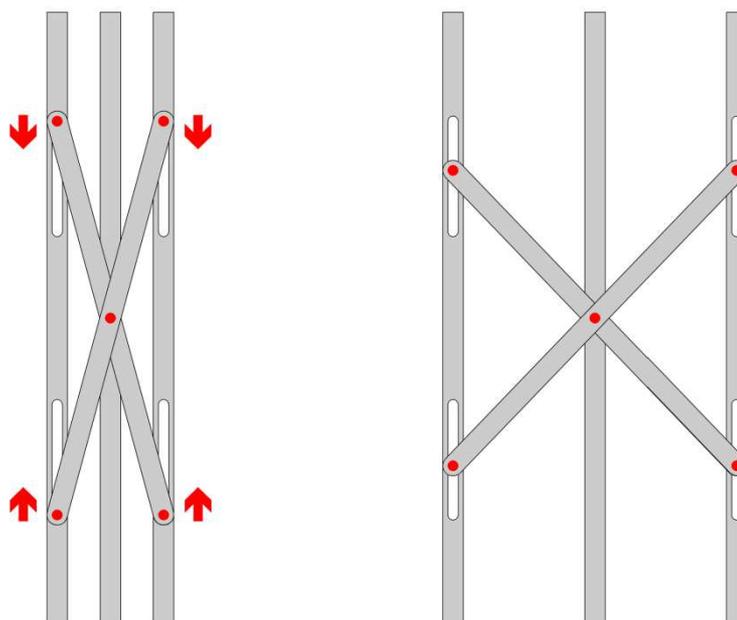


Figura 5.1: Translação das articulações de uma porta pantográfica.
Fonte: elaborado pelo autor.

Em termos gerais, grau de liberdade é um conceito que designa a qualidade da mobilidade de uma articulação; dessa forma, quanto maiores suas possibilidades de translação ou rotação, maior será a liberdade que esta articulação possui – com desvantagem de ocasionar uma menor estabilidade da estrutura.

(...) os links que estudamos podem ser vistos - simplificada - como construídos a partir de duas junções elementares, uma dobradiça chamada de junção com revolução, e junção deslizante linear, também conhecida como junção prismática. Estas junções permitem movimento com um grau de liberdade entre os dois links que se conectam. A configuração variável de uma dobradiça se dá pelo ângulo mensurado entre os dois elementos em torno do eixo de rotação, e para a junção deslizante é a distância deslizável ao longo da corredeira linear da junção. (MCCARTY e SOH, 2011, tradução do autor).

Considerando, por exemplo, um objeto hipotético que tenha sua base fixa, mas possua uma junção articulada que permita um movimento de rotação através de apenas um eixo. Nestas condições a articulação possui então apenas um grau de liberdade. Porém, se nesta mesma situação o objeto permitir em sua base uma rotação em outro eixo – em torno de si mesmo, por exemplo – então esta articulação possuirá dois graus de liberdade (figura 5.2).

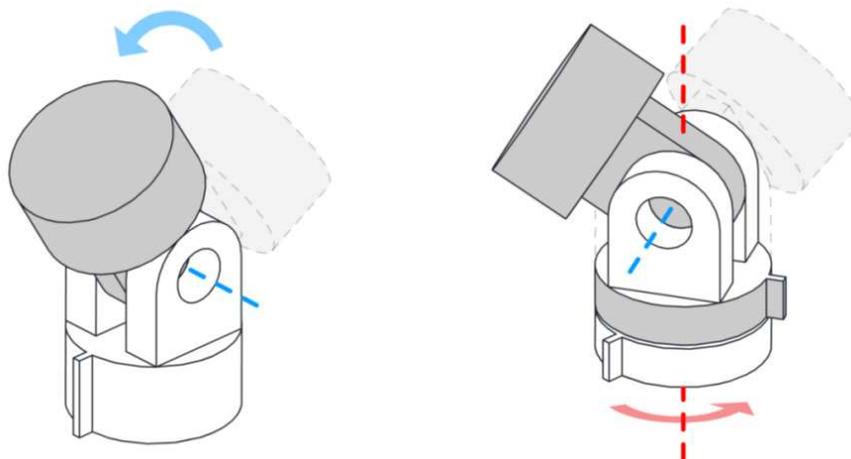


Figura 5.2: Links com um e dois graus de liberdade.
Fonte: elaborado pelo autor.

Além dos movimentos de rotação, há também a possibilidade de movimentos de translação – junção prismática – facilitados por guias (figura 5.3), como no caso da porta pantográfica cujo funcionamento só é possível em decorrência da rotação e translação de suas junções, o que permitiu a expansão em um eixo horizontal sem que houvesse a retração em um eixo vertical. Assim, a translação em cada um dos eixos cartesianos adiciona um novo grau de liberdade à articulação.

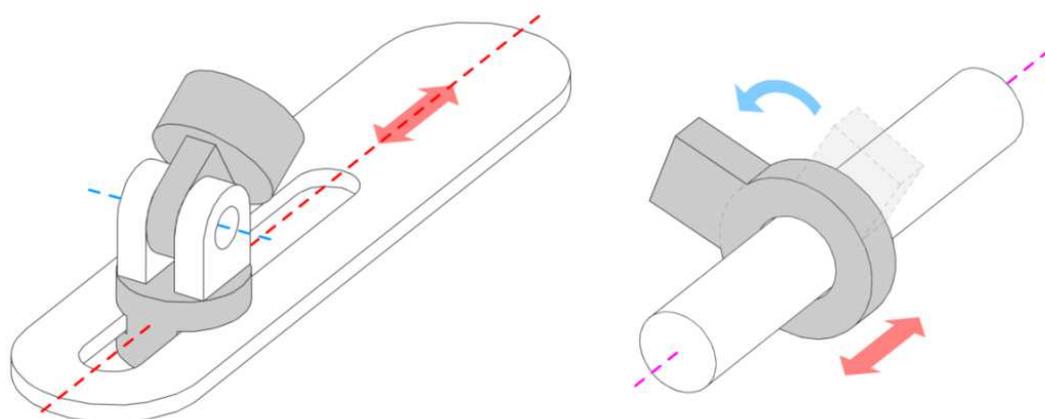


Figura 5.3: Grau de liberdade resultante de translação – em vermelho.
Fonte: elaborado pelo autor.

Quanto à qualidade destas junções articuladas, é necessário ponderar que existem diversas formas de viabilizar seu funcionamento. Necessitando de apenas um eixo de rotação fixo, um sistema similar ao de uma dobradiça será suficiente e conferirá maior estabilidade estrutural ao sistema. Porém, é possível utilizar de junções esféricas – uma esfera contida dentro de um hemisfério maior – que permitirá uma maior mobilidade para os elementos rígidos (figura 5.4) ao custo de uma menor estabilidade estrutural.

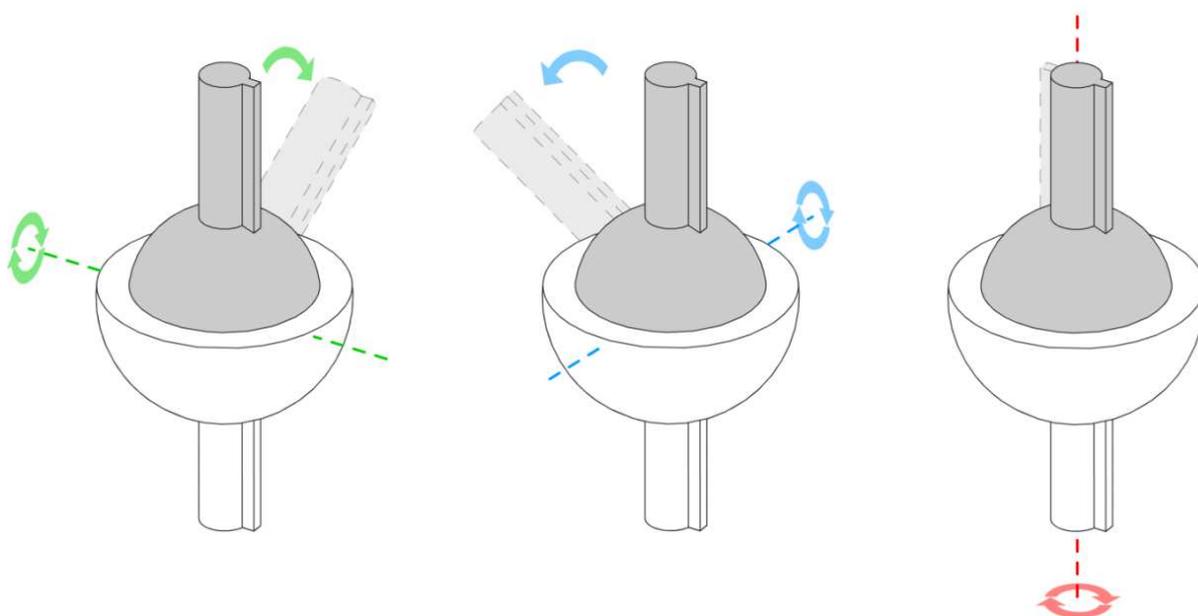


Figura 5.4: Junção esférica com três graus de liberdade.
Fonte: elaborado pelo autor.

6. Materiais e Métodos.

Este capítulo descreve o método utilizado na pesquisa, cuja base se deu por meio do levantamento de patentes (registradas em repositórios nacionais e internacionais) de estruturas com articulações pantográficas, com intuito de identificar quais aquelas, cujas pantográficas descritas, apresentam inovações em seu funcionamento sob o ponto de vista da geometria formal. Para compreendê-las, foram realizadas análises numa desconstrução geométrica, o que permitiu uma classificação por raízes e uma classificação. A partir daí, desenvolveu-se um algoritmo específico para cada uma delas. Estes foram implementados em um software gráfico paramétrico, com o intuito de servir como ferramenta auxiliar, tanto na representação dinâmica em tempo real das estruturas selecionadas, quanto no desenvolvimento de novas estruturas baseadas em cada uma das raízes classificadas.

6.1. Pesquisa com patentes.

Como meio para a realização deste trabalho, foi realizada uma busca em sistemas de catalogação de patentes. O principal sistema utilizado foi o do *Google Patents*, uma vez que ele indexa todo material disponibilizado pelo *United States Patent and Trademark Office* (escritório estadunidense de patentes), *European Patent Office* (escritório europeu de patentes), *Japan Patent Office* (escritório japonês de patentes), *China's State Intellectual Property Office* (escritório de propriedade intelectual da China), *World Intellectual Property Organization* (organização mundial de propriedade intelectual), *Deutsches Patent und Markenamt* (escritório alemão de patentes e marcas) e, por último, o *Canadian Intellectual Property Office* (escritório canadense de propriedade intelectual). A ferramenta desenvolvida pela *Google* permitiu uma busca mais eficiente de patentes nos repositórios.

Apesar das patentes possuírem diferentes formatos pela inexistência de um padrão universal, alguns campos são comuns a muitas delas. Dentre eles, o campo “citações de outras patentes”, que informa quais patentes foram desenvolvidas anteriormente e que contribuíram para seu o desenvolvimento ou diferenciação,

citando-as no corpo do texto. Essa informação foi importante para o desenvolvimento da pesquisa, pois a necessidade de se determinar as palavras-chaves para estruturas articuladas pantográficas em diferentes línguas mostrou-se demasiadamente complexo. Conforme citado no capítulo 2, Hanaor e Levy (2001) classificaram essas estruturas como *Pantographic* ou *Scissors*. Na busca por estes termos foi encontrada uma quantidade significativa de patentes. Observou-se então, uma especialização de alguns termos mais recorrentes nas seguintes estruturas: *pantographic-like*; *pantographic-type*; *scissor-like*; *scissor-type* e *scissor pair*, além de *Nuremberg scissor* (*Nuremberg scheren*) e *zig-zag structure*.

Com essa informação, empreendeu-se primeiramente uma busca de patentes envolvendo estruturas articuladas pelas referências contidas nas patentes citadas, começando pela *Reversibly expandable doubly-curved truss structure* de Hoberman (1990), que possui muitas aplicações na contemporaneidade e, por isso, se tornou a patente inicial do trabalho.

Durante a investigação, também pôde-se observar uma certa equivalência nos repositórios dos escritórios estadunidenses e europeu de patentes. Isso se deu devido ao fato de haver, inicialmente, uma necessidade de se registrar uma mesma patente em escritórios de diferentes países para se assegurar uma ampla propriedade intelectual de seu conteúdo. Assim, muitas das patentes levantadas continham exatamente as mesmas informações embora possuíssem diferentes números de registro¹.

Essa replicação de patentes, com diferentes registros, permitiu concluir que um número muito restrito delas apresentou, de fato, alguma inovação no que se refere à sua geometria estrutural. A maioria das patentes levantadas traz variações apenas na forma de suas aplicações como, por exemplo, guindastes pantográficos (GERICH, 1944), portas pantográficas (SCHEFF, 1957 e DANFORTH, 1925), porta de alçapão com escada pantográfica embutida (TRAUT, 1936) e elevadores pantográficos (ROSS, 1945), todos funcionando pelo mesmo princípio geométrico.

A patente *Three dimensional reticular structure* de Piñero (1961), possui registro ES266801 na Espanha, US3185164 nos Estados Unidos, FR1304770 na França, GB1009371 na Inglaterra, DE1245574 na Alemanha, CH402374 na Suíça e BE609761 na Bélgica.

Derivadas do levantamento documental, apenas três patentes com estruturas articuladas pantográficas apresentaram transformações geométricas inovadoras: US23503A: *Umbrella* (SELDEN, 1859); US3185164A: *Three dimensional reticular structure* (PINERO, 1961); US4942700: *Reversibly expandable doubly-curved truss structure* (HOBERMAN, 1990). Todas elas foram analisadas para se poder compreender e explicitar as relações geométricas que as regem. As análises permitiram a realização de simulações, reproduzindo-as dinamicamente. Estas, são apresentadas nos capítulos cinco e sete.

6.2. Análise das estruturas pantográficas levantadas nas patentes.

Os pesquisadores You e Pellegrino (1996) perceberam que a *single-angulated bar* de Hoberman – elemento principal de sua patente – poderia ser expandida para uma *multi-angulated bar*, permitindo utilizar de barras maiores e mais junções que resultam no aumento da estabilidade do sistema por conectar mais barras – sendo conveniente para utilização em coberturas, por exemplo; quando Piñero propôs sua estrutura para teatro móvel (1961), ele cobriu uma parte da estrutura através do uso de membranas, porém, os pesquisadores Escrig et al. (1995) desenvolveram um sistema de placas rígidas conectadas a articulações de Piñero que, quando expandidas, resultam numa cobertura maior e mais resistente. E também, o próprio Hoberman (2001) produziu na patente US6834465 uma solução de cobertura dobrável utilizando sua *single-angulated bar* (figura 8.1).

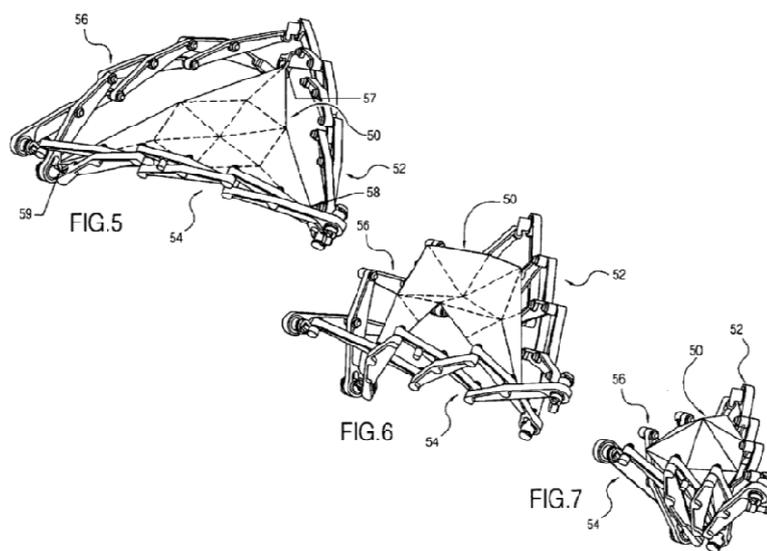
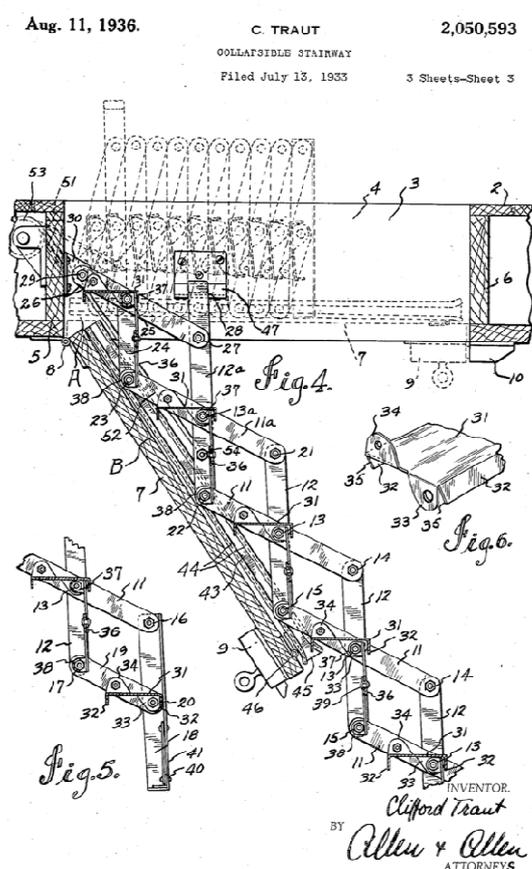


Figura 6.1: Cobertura desenvolvida por Hoberman.
Fonte: Extraído de Hoberman, 2004.

No universo das patentes analisadas ao longo da pesquisa percebeu-se majoritariamente um enfoque na solução trabalhada pontualmente. Como exemplo, Traut (1936) desenvolve uma escadaria retrátil para alçapão na qual um sistema articulado pantográfico viabiliza a solução criada e contribui para outras situações a partir da mesma solução geométrica, como num teclado dobrável para computador, de Olodort e Tang (2001) (figura 8.2). É diferente, porém, quando as patentes precisam repensar o funcionamento de articulações tradicionais para criação de outras mais sofisticadas, para além de sua finalidade.



U.S. Patent Dec. 18, 2001 Sheet 16 of 44 US 6,331,850 B

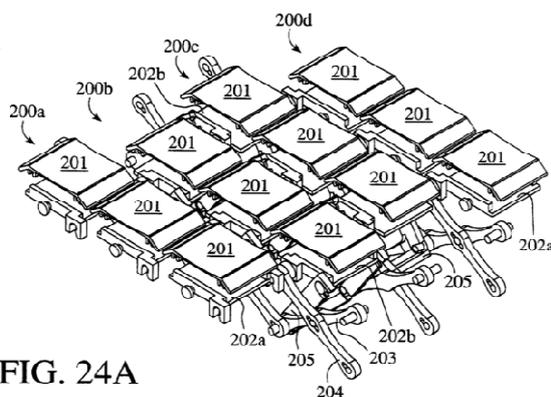


FIG. 24A

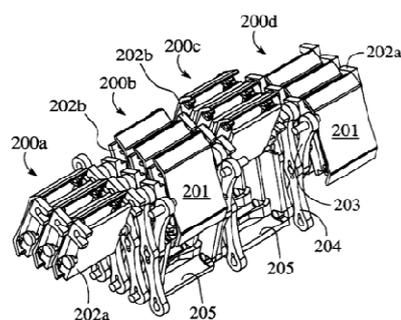


FIG. 24B

Figura 6.2: Escadaria para alçapão e teclado dobrável.
Fonte: adaptado de Traut, 1936 / Olodort e Tang, 2001.

Essa diferença que envolve (ou ocasiona) um entendimento maior sobre as articulações pantográficas foi o critério essencial para definição do conteúdo desse trabalho, pois, mais do que aplicar um sistema conhecido para obter uma solução, o problema inteiro acaba sendo repensado. De certa forma, isso empreende uma compreensão holística da questão, pois se permite que a resposta possa resultar de

uma busca menos específica ao escopo das soluções já conhecidas, semeando um campo muito fértil para um *insight*.

As patentes de Selden, Piñero e Hoberman possuem essa característica especial que pode inspirar pesquisadores a vislumbrar possibilidades diversas a partir dessa nova ferramenta. Especialmente as soluções criadas por Piñero e Hoberman, que influenciaram o desenvolvimento de muitos estudos e de novas patentes, sendo até hoje celebradas por suas contribuições.

Comumente os estudos que desenvolvem uma compreensão dessas três patentes têm aspecto muito sintético e um tanto algébrico sobre as soluções, fornecendo uma contribuição ao entendimento das estruturas apesar da ferramenta mais abstrata, o que pode dificultar sua compreensão. Nesse sentido percebeu-se a importância em enfatizar o caráter geométrico dessas patentes, uma vez que se analisaram as transformações dos sistemas a partir do comportamento individual das partes e, subsequentemente, das relações instituídas no conjunto.

6.3. Classificação das Simulações.

A estratégia proposta para se reproduzir o funcionamento das estruturas apresentadas nas patentes visando uma compreensão de suas relações geométricas, desenvolvidas pelos sistemas e suas partes foi predominantemente o de simulações virtuais. A simulação é ferramenta adequada porque permite investigar o comportamento de um objeto real a partir de um modelo. Segundo Groat e Wang (2013, tradução do autor), simulação é definida como a “representação do comportamento ou características de um sistema através do uso de outro sistema, principalmente em softwares criados para este propósito”.

Groat e Wang (2013) descrevem tipos qualitativos de simulações através de uma classificação criada por Clipson (1993), que contém quatro diferentes modelos² de simulação: icônica, análoga, operacional e matemática:

Os dois primeiros modelos de simulações tratam diretamente de contextos físicos. Modelos icônicos são usados em testes de materiais ou produtos em condições simuladas. Por exemplo, paredes são construídas

² Modelo como abordagem, meio ou método de realização.

para se testar a resistência ao fogo; materiais de acabamento são testados em situações simuladas para se determinar a velocidade de propagação do fogo. Modelos análogos denotam simulações dinâmicas de sistemas físicos reais ou propostos - simuladores de vôos contemplam esses modelos. Modelos operacionais lidam com pessoas interagindo em contextos físicos - os dados são gerados por meio da atuação de pessoas. Cenários de salas de emergência em hospitais ou respostas a ataques terroristas podem ser simulados dessa forma. Modelos matemáticos são sistemas de codificação numérica que capturam relações do mundo real e as traduzem em valores abstratos quantificáveis; este é o campo de domínio das tecnologias de simulação computacional. (GROAT e WANG, 2013 – tradução do autor).

As simulações que utilizam híbridos de modelos análogos e modelos matemáticos representam uma situação inicial ideal para a realização deste trabalho, pois permitem a exploração do desenvolvimento geométrico de sistemas reais por meio de sistemas digitais com comportamento análogo.

A respeito da qualidade da simulação, Groat e Wang (2013) refletem acerca das dificuldades de uma representação perfeita, holística, da situação real, um objetivo comum àqueles que a utilizam como ferramenta de pesquisa. Os autores mencionam que, dependendo da situação, a quantidade de variáveis necessárias a uma simulação é extremamente elevada, sendo virtualmente impossível contemplar a todas. Assim, em uma simulação de objetos ou materiais físicos – como os sistemas estudados nesta pesquisa – deve-se levar em consideração o máximo de conexões possíveis com o objeto real.

6.4. Realização de Simulações.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessária a utilização de uma ferramenta paramétrica que permitisse a geração dos modelos e tivesse a capacidade de estabelecer relações dinâmicas entre os componentes das estruturas analisadas.

Uma vez que a informação de um componente é modificada, todos os demais precisam responder geometricamente a este estímulo, criando um sistema virtual denominado de modelagem paramétrica. Segundo Florio (2011) a modelagem paramétrica permite “programar as dependências entre componentes por meio do uso de variáveis, denominadas de “parâmetros”. Estes, por sua vez, permitem

construir regras, traçar relações entre os pontos de uma curva e definir o relacionamento e dependência entre eles”.

A ferramenta utilizada para a modelagem geométrica nesta pesquisa foi o *software Rhinoceros* com o *plugin Grasshopper*, uma interface de desenvolvimento paramétrico de algoritmos visuais. A modelagem volumétrica visualizada no *Rhinoceros* é resultante e dependente do algoritmo produzido em seu *plugin Grasshopper*.

O *Grasshopper* é uma ferramenta que possibilita a simulação de sistemas reais através de modelos geométricos criados por algoritmos visuais. Seu produto se dá pelas relações geométricas construídas neste algoritmo e, dessa forma, dependerá da qualidade de sua construção. Quando fiel ao objeto real, seu funcionamento se restringe pelos mesmos limites. A utilização do *Grasshopper* não depende do conhecimento de uma linguagem de programação textual – seu algoritmo é construído visualmente de modo mais intuitivo. Por ser um software paramétrico, ele permite a ampliação da manipulação dos sistemas modelados para além de suas condições originais, possibilitando a criação de novos elementos com um acompanhamento visual em tempo real.

7. Desenvolvimento das simulações.

Este capítulo trata do desenvolvimento e implementação computacional dos algoritmos para a simulação virtual das três raízes de estruturas pantográficas selecionadas, descritas no capítulo 4, visando explicar o funcionamento geométrico de cada uma delas. Apesar das evidentes diferenças cronológicas, os sistemas estruturais abordados são apresentados aqui segundo sua complexidade geométrica, na seguinte ordem: *Reversibly expandable doubly-curved truss structure* de C. Hoberman (US4942700), em 1990; *Umbrella* de L. K. Selden (US23503A), em 1859 e *Three dimensional reticular structure* de E. P. Piñero (US3185164A), em 1961. Para isso utilizou-se como ferramenta o *plugin Grasshopper* na base do *software Rhinoceros* (versão 5.0).

Assim, primeiramente foi desenvolvido um domo de Hoberman, seguido do guarda-chuva de Selden e, por fim, a cobertura de teatro itinerante de Piñero.

7.1. A Single-angulated bar de Hoberman.

A partir dos estudos das Patentes de Hoberman, e com o objetivo de se compreender os conceitos e dominar sua técnica, foram realizadas simulações digitais de sua estrutura a partir da criação de um algoritmo específico.

A base desta estrutura, a *Single-angulated bar* (barra de ângulo único), é formada por duas semi-retas convergentes e não paralelas, que formam uma barra angulada análoga a um acento circunflexo. No vértice resultante da convergência destas semirretas, posiciona-se uma junção que permite a articulação de duas barras iguais, mas simetricamente espelhadas. Sua criação foi importante porque possibilitou, pela primeira vez em uma estrutura pantográfica, a transformação de articulações restritas a planos radiais de expansão sem variação angular, ou seja, restrita a um plano cartesiano. Tendo em vista a estabilidade angular resultante das articulações propostas por Hoberman, é possível concluir que qualquer aresta ou arco, que componham qualquer poliedro, podem ser substituídos por, pelo menos, um par de barras de ângulo único, como o icosaedro da figura 7.0.

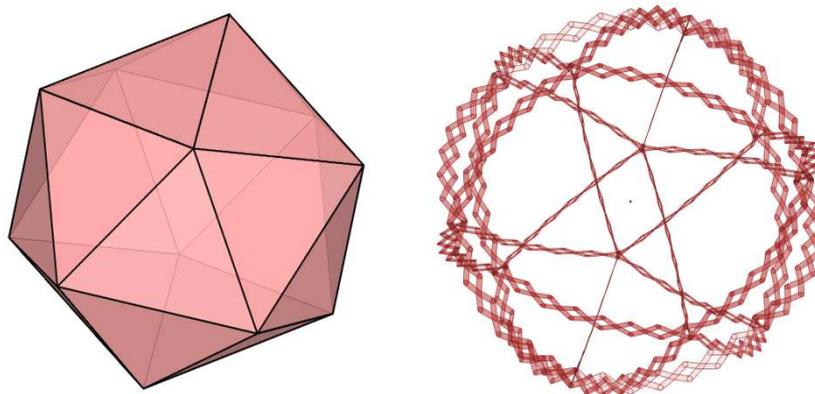


Figura 7.0: Icosaedro e seu equivalente pantográfico utilizando de *single-angled bars*.
Fonte: elaborado pelo autor.

Na figura 7.1 é possível visualizar três pares da *single-angled bar* e, na figura 7.2, os arcos que serão substituídos no algoritmo. O conjunto visualizado pode ser utilizado em substituição a cada quadrante dos arcos e círculo.

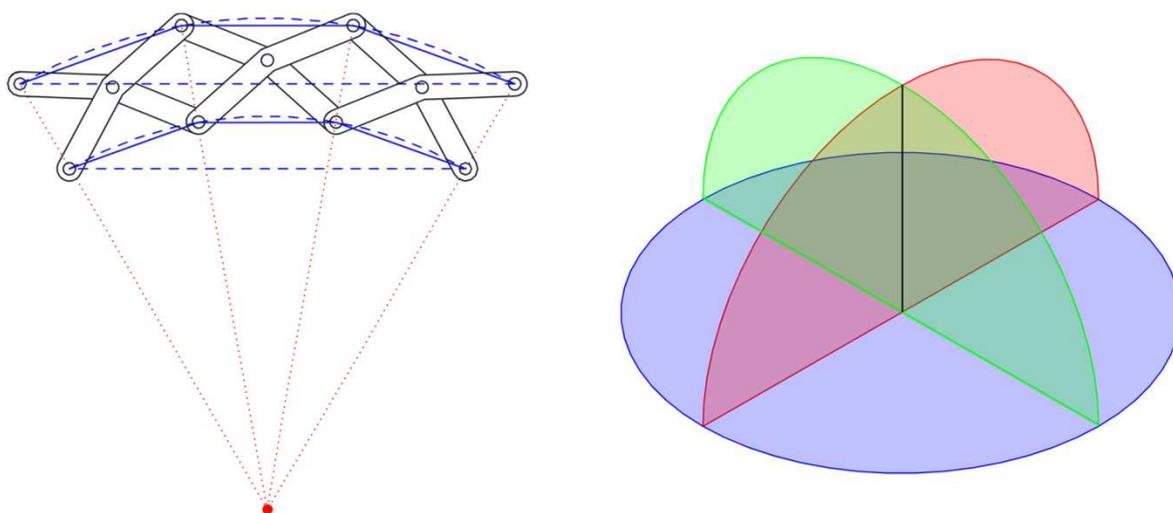


Figura 7.1 e 7.2: Três pares de barras e suas arestas possíveis / os três planos de desenvolvimento.
Fonte: elaborado pelo autor.

Para que esta substituição de aresta ou arco por barras anguladas funcione sem restrições – é desejável que todos pares de barras utilizadas em determinado conjunto tenham um centro de convergência comum – que necessariamente será o centro de uma circunferência ou de um arco, razão pela qual as arestas podem ser substituídas por vários pares de *single-angled bars*.

7.1.1. Criação do algoritmo para a simulação digital da estrutura do domo paramétrico de Hoberman.

A simulação de um domo paramétrico utilizando as *single-angulated bars* foi desenvolvida no *plugin* paramétrico *Grasshopper*, com auxílio do livro *Grasshopper Primer* (AKOS e PARSONS, 2015), cuja construção geométrica é adequada por utilizar modelagem paramétrica com algoritmos geométricos, podendo assim, reproduzir fielmente seu funcionamento. O modelo geométrico foi construído de modo que se permita dividir a aresta/arco em segmentos ilimitados de forma paramétrica, gerando diferentes situações para o modelo.

O desenvolvimento de estruturas baseadas nesta patente de Hoberman condiciona seu desenvolvimento a partir de um conjunto de planos, pois a expansão radial dos elementos se dá em apenas um plano cartesiano. Assim, para o desenvolvimento de um algoritmo baseado no funcionamento geométrico das *single-angulated bars* de Hoberman, é necessária a utilização de algum sólido geométrico que contenha arestas. Nesta simulação, optou-se por desenvolver um domo poliédrico cuja expansão se baseie em três planos ortogonais, coincidentes aos três planos cartesianos.

Tendo em vista a igualdade dos sistemas atuantes em cada plano, optou-se por redigir e implementar um algoritmo (detalhado no Apêndice A) que contemplasse apenas um quadrante de circunferência pois, uma vez completo, basta multiplicá-lo para todos os demais quadrantes dos planos de trabalho da estrutura, como ilustra a figura 7.3.

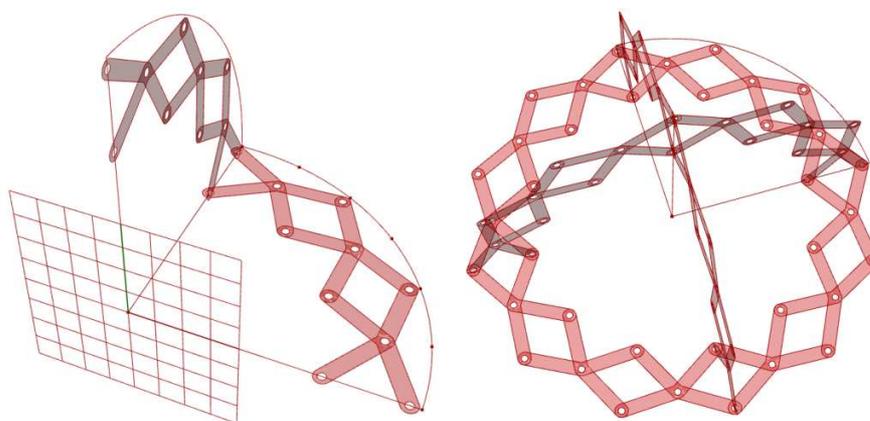


Figura 7.3: Primeiro quadrante rotacionado no plano XZ / Domo paramétrico finalizado.
Fonte: elaborado pelo autor.

São muitas as possibilidades de aplicação da barra angulada de Hoberman, sobretudo ao se conceber a capacidade de substituição das arestas de qualquer poliedro por conjuntos com barras anguladas. Isso significa que estruturas concebidas através da união de planos podem ser adaptadas para funcionarem dinamicamente através destas barras angulares.

Quanto maior a quantidade de divisões da estrutura, menor será a sua rigidez decorrente do maior número de articulações, reduzindo sua estabilidade. Porém, é possível aumentar sua estabilidade utilizando mais planos pantográficos que contribuirão com sua rigidez estrutural, como ilustra a Figura 7.4.

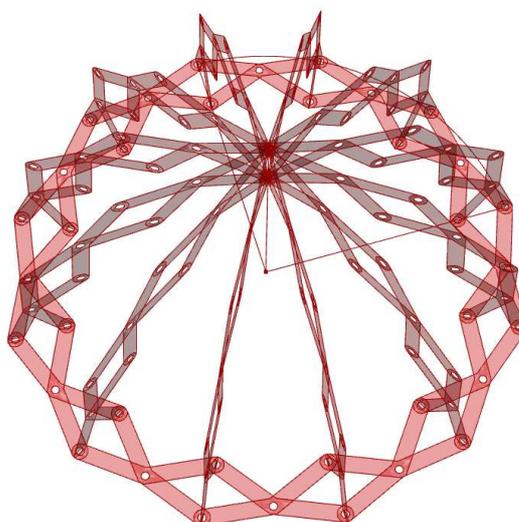


Figura 7.4: Variação no número de arcos, permitindo maior estabilidade estrutural.
Fonte: elaborado pelo autor.

Para a validação da simulação digital dessa estrutura, fabricou-se um protótipo utilizando o modelo virtual construído. Para isso, escolheu-se uma situação na qual a estrutura tenha oito arestas – um octógono regular. Essa opção permitiu o encaixe de outros dois arcos pantográficos – em planos perpendiculares ao do disco original e entre si – para a criação de um domo. Uma vez que as estruturas arqueadas principais foram instaladas, foram anexadas estruturas secundárias para se conectar os três planos, a fim de conferir maior rigidez ao conjunto. Cada arco foi pintado em uma cor diferente para evidenciar os três planos cartesianos em que operam, como ilustra a figura 7.5.

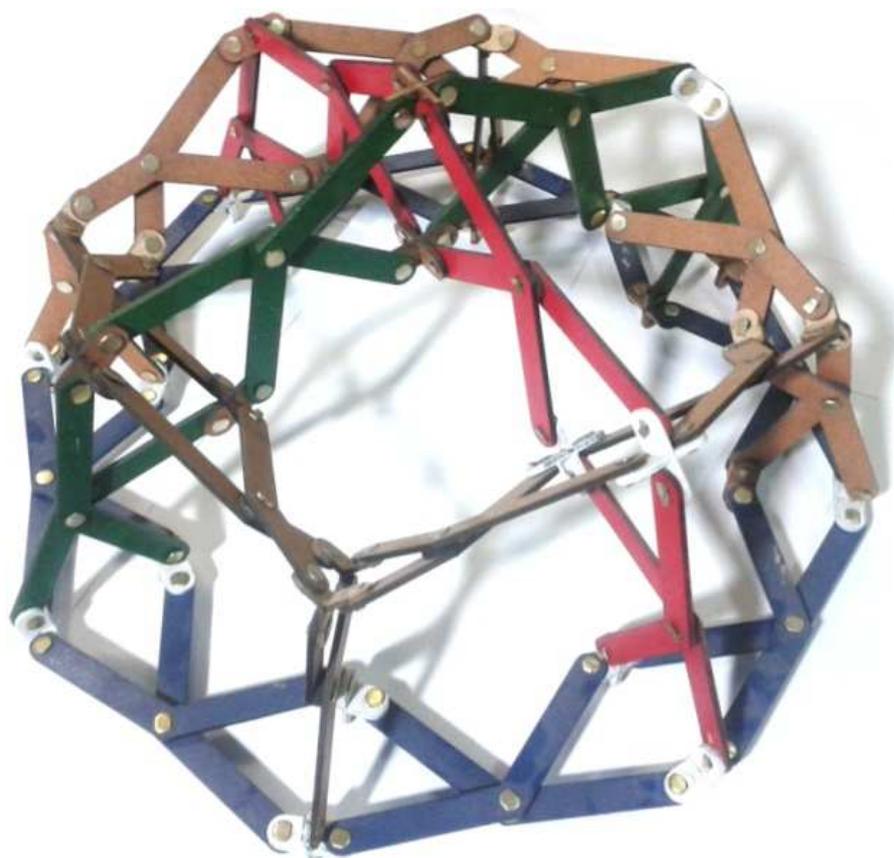


Figura 7.5: Estrutura montada em MDF.
Fonte: elaborado pelo autor.

7.1.2. Diagramas do algoritmo desenvolvido – C. Hoberman.

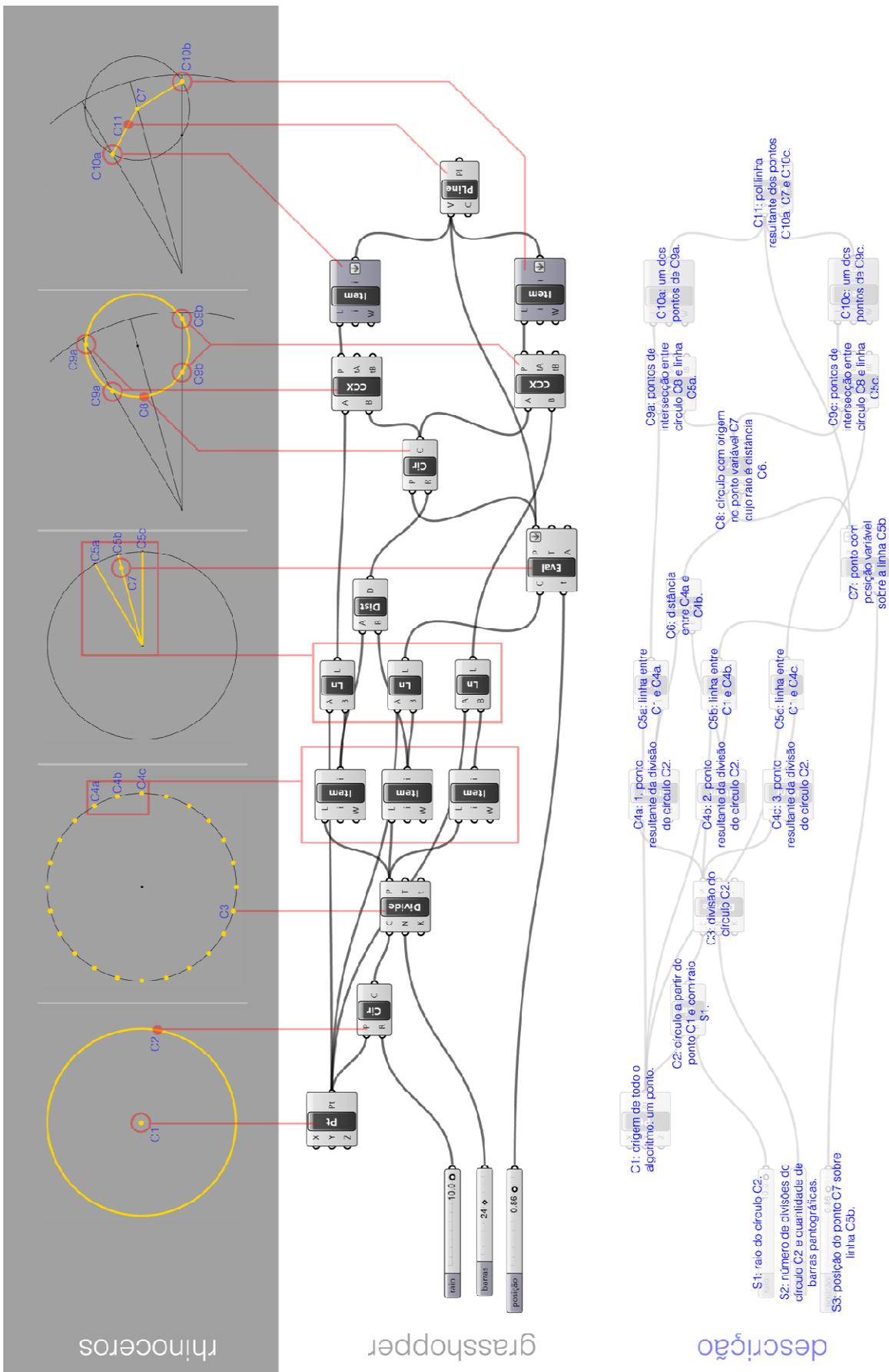


Diagrama 7.1: Algoritmo para Hoberman 01.
Fonte: elaborado pelo autor.

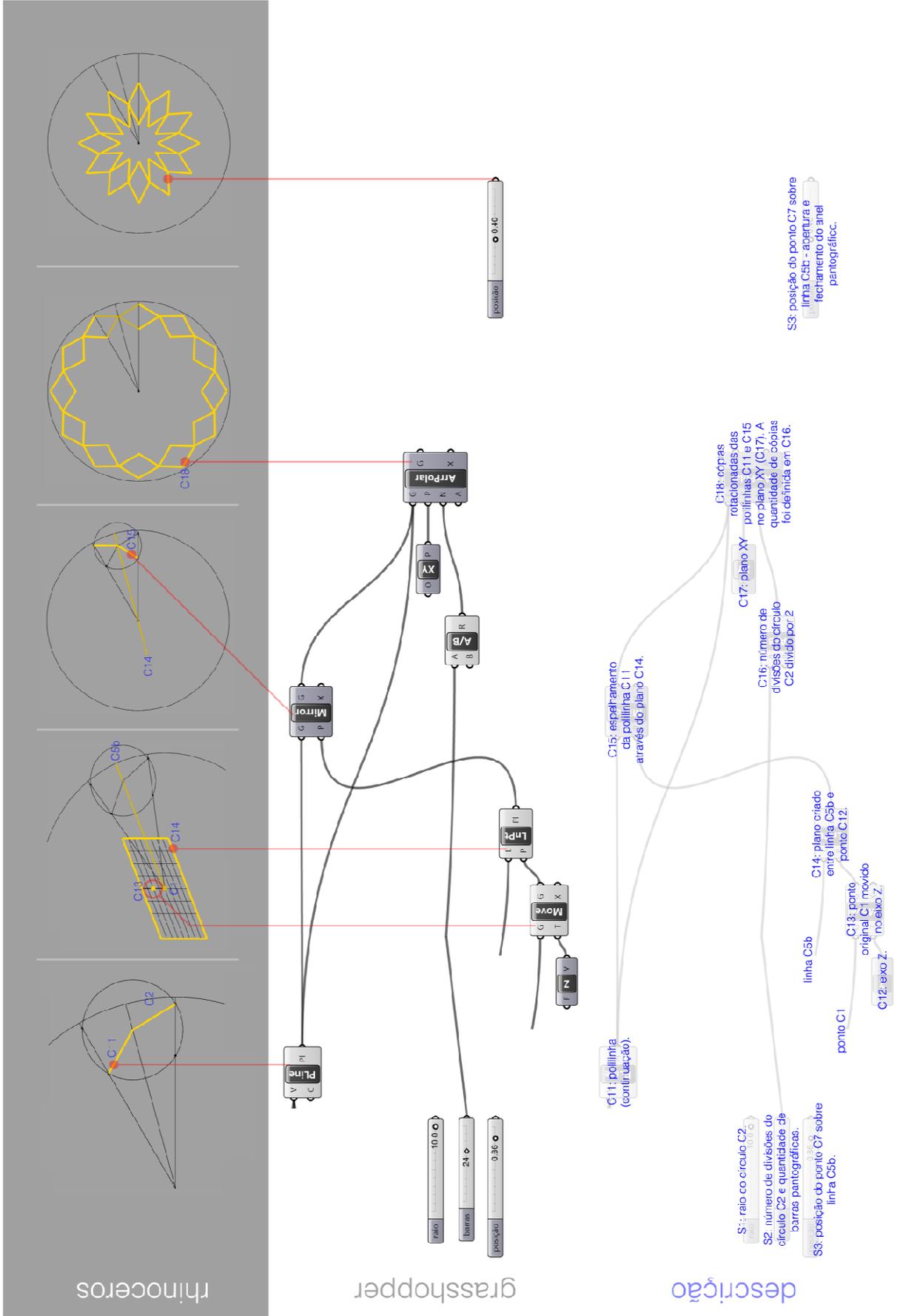


Diagrama 7.2: Algoritmo para Hoberman 02.
Fonte: elaborado pelo autor.

7.2. Desenvolvimento da simulação do guarda-chuva de Selden.

Diferentemente das barras de ângulo único de Hoberman, o guarda-chuva idealizado por L. K. Selden em 1859 utiliza barras retilíneas para compor seu sistema. Porém, a necessidade de expansão radial para abrir e fechar o guarda-chuva e o desconhecimento da solução criada 120 anos depois por Hoberman, resultaram em uma solução peculiar.

Para produzir expansões radiais em estruturas pantográficas utilizando barras retilíneas é necessário posicionar a articulação central da barra deslocada de seu ponto médio, resultando em transformações trapezoidais de ângulo variável. Essa inevitável variabilidade angular se revela o principal desafio aos propósitos de Selden: ao se trabalhar com estas articulações é impossível utilizá-las para criar um disco expansível, pois este possui uma circunferência completa - 360 graus - em qualquer condição, expandido ou retraído.

A solução encontrada por Selden foi condicionar as barras a uma transformação tridimensional, não restrita a apenas um plano. Quando totalmente retraído, o conjunto das articulações se apresenta similar a um cilindro. Porém, ao iniciar a expansão do sistema, o conjunto gradativamente vai se tornando um cone de diferentes proporções, aumentando o diâmetro da base e reduzindo sua altura, ocasionando o achatamento desse cone (figura 7.6).

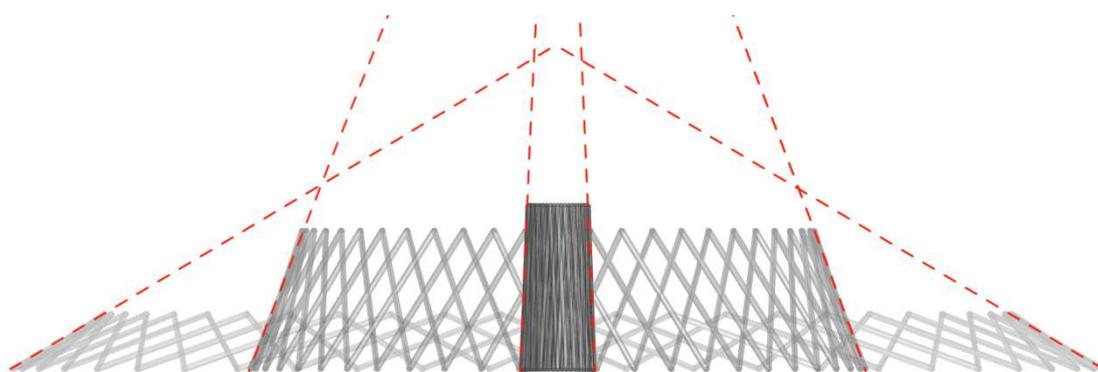


Figura 7.6: Expansão da estrutura proposta por Selden.
Fonte: elaborado pelo autor.

O algoritmo da simulação foi idealizado para que pudesse integrar o maior número de variáveis possível, evitando a utilização de constantes. Essa diretriz expande as possibilidades do algoritmo ao viabilizar a simulação de diferentes situações, e também, permite verificar os limites de utilização de cada uma.

7.2.1. Diagrama com o algoritmo desenvolvido.

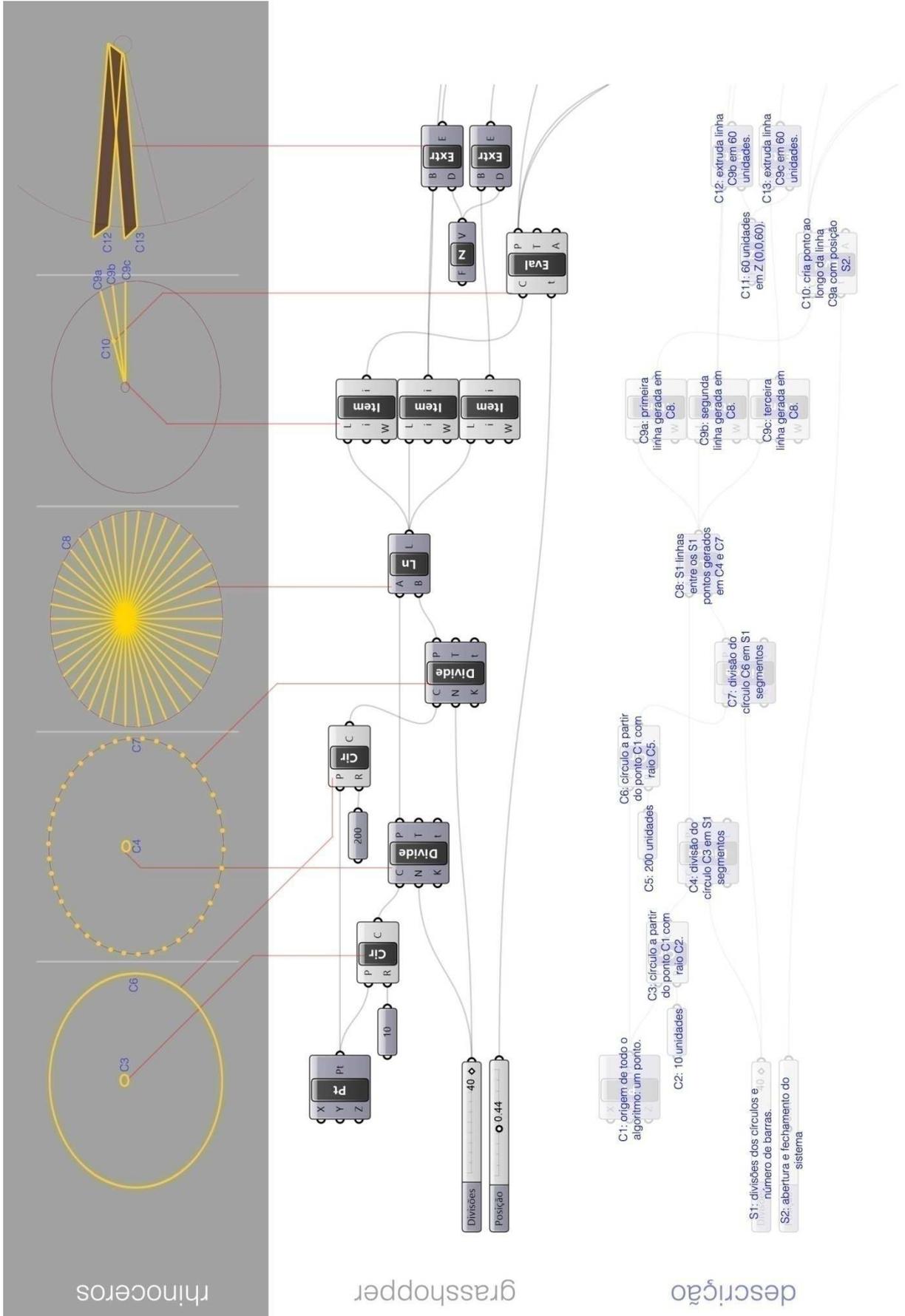


Diagrama 7.3: Algoritmo para Selden 01.
Fonte: elaborado pelo autor.

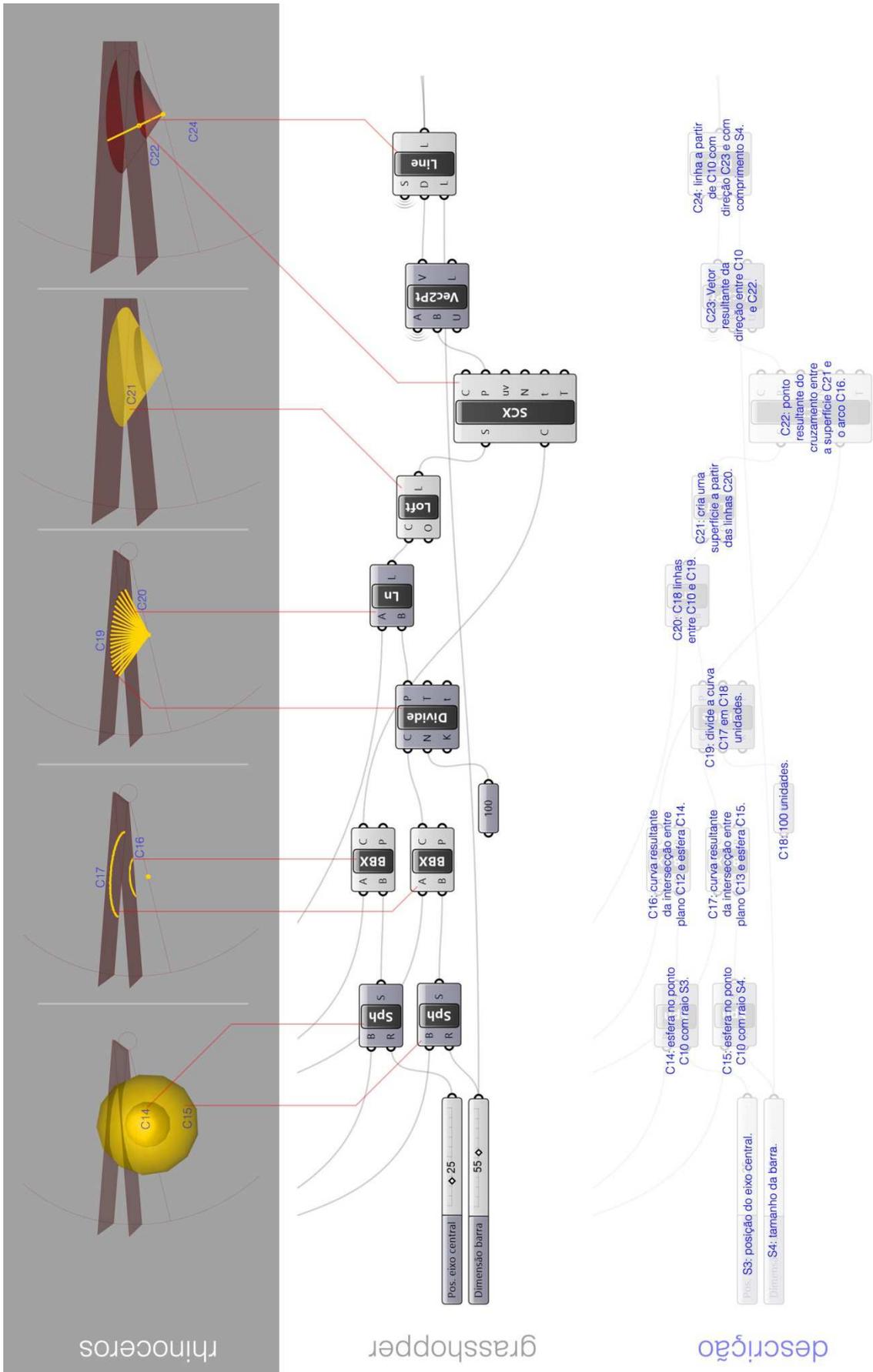


Diagrama 7.4: Algoritmo para Selden 02.
 Fonte: elaborado pelo autor.

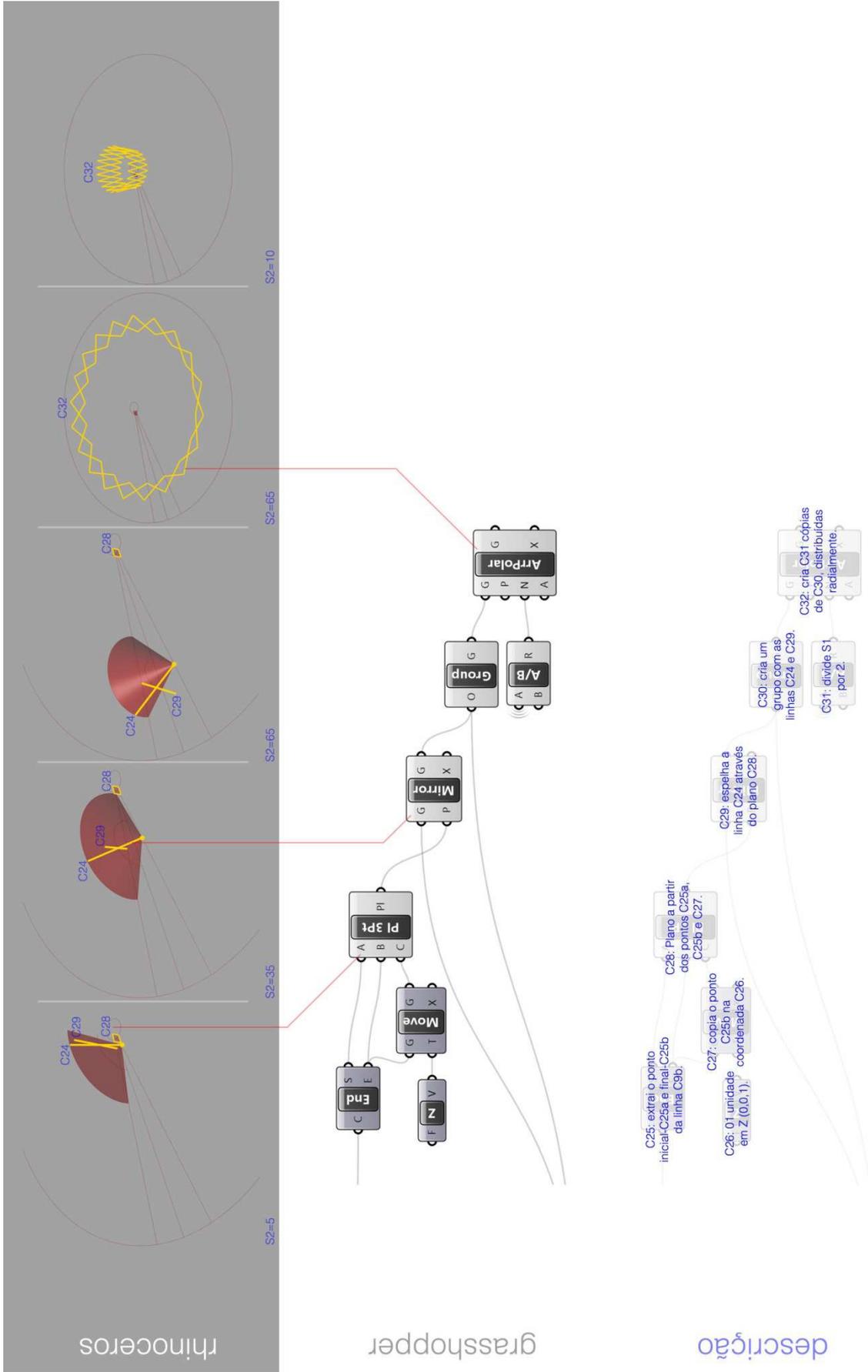


Diagrama 7.5: Algoritmo para Selden 03.
Fonte: elaborado pelo autor.

7.3. Desenvolvimento da simulação da estrutura itinerante de teatro de Piñero.

O sistema idealizado por Piñero se diferencia dos de Hoberman e Selden pela composição do "par" elementar do sistema: enquanto estes trabalharam com pares de barras com comportamento simétrico, o sistema de Piñero precisa de mais um elemento que funcione como junção articulada intermediária e utiliza três barras em cada conjunto - podendo estas ter comportamento simétrico ou não (figura 7.7).

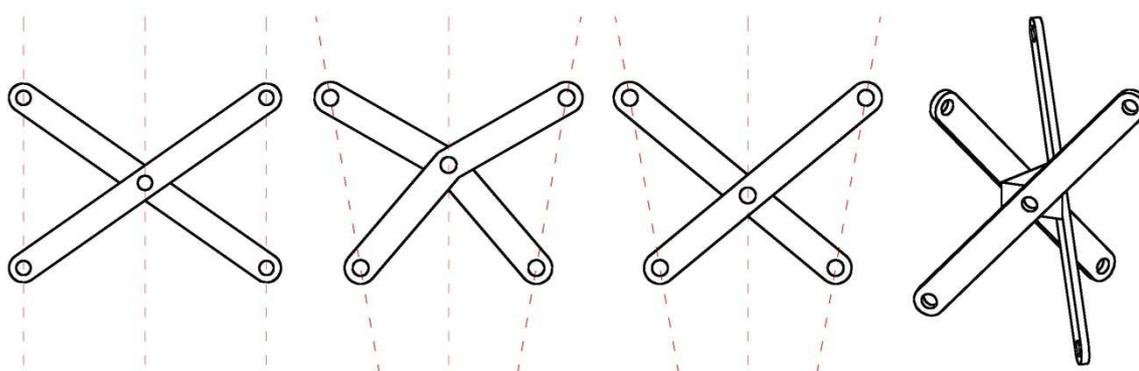


Figura 7.7: barras convencionais, solução de Hoberman, solução de Selden e solução de Piñero.
Fonte: elaborado pelo autor.

A utilização das barras de Piñero requer o desenvolvimento de articulações específicas que contemple junções intermediárias diferentes daquelas presentes nas junções das extremidades. Em sua patente, descreve ambos os sistemas (figura 7.8) e também, um terceiro sistema com torções nas barras para que as junções das extremidades permaneçam alinhadas.

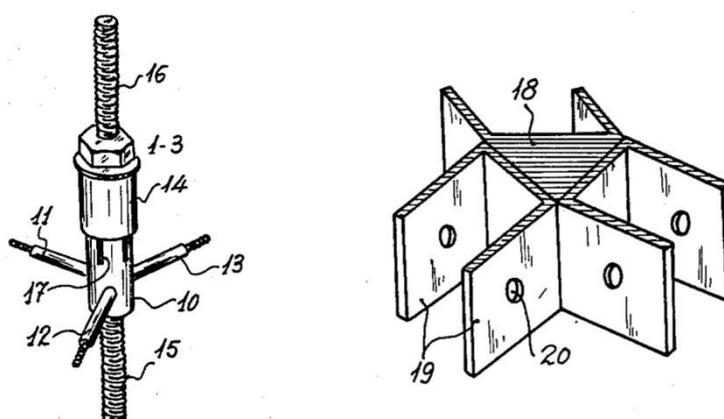


Figura 7.8: Junções articuláveis com um e dois graus de liberdade propostos por Piñero.
Fonte: Piñero, 1965.

Piñero descreve duas possibilidades de expansão/retração de seu sistema articulado, com resultados espaciais diferentes para cada escolha. Ele descreve que ao se trabalhar com barras cujas junções intermediárias estejam alocadas

precisamente em seu centro geométrico, a cobertura se expandirá de forma plana, através de apenas dois eixos cartesianos. Porém, ao deslocar essa junção intermediária, a cobertura assumirá um formato côncavo (figura 7.9).

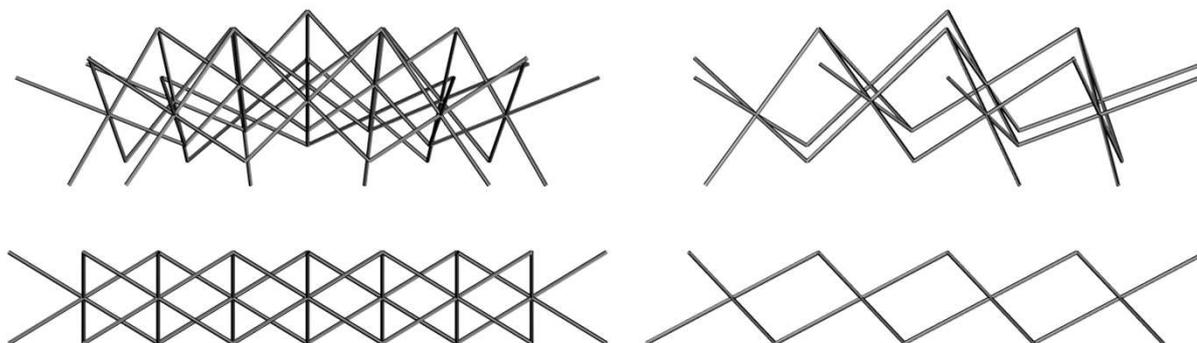


Figura 7.9: Vista frontal e lateral esquerda das duas situações propostas por Piñero.
Fonte: elaborado pelo autor.

Na prática, isso muda também o comportamento de cada conjunto de articulações em cada situação. Com a junção precisamente no centro da barra, todas as barras de todos os conjuntos terão comportamento idêntico, o que resultará no desenvolvimento em um plano. Porém, com a junção deslocada, os conjuntos de barras se comportarão de forma diferente, variando sua rotação em decorrência da posição em que estiver. Essa particularidade faz com que o sistema não possa ser expandido ao limite de todas as articulações, pois causaria o rompimento daquelas mais periféricas.

Esse comportamento desigual das barras dificultou a criação do algoritmo e restringiu sua variabilidade paramétrica. Utilizando uma seqüência de círculos concêntricos contendo conjuntos de barras como analogia, foi necessário desenvolver o algoritmo de funcionamento de um conjunto de barras articuladas para cada círculo, e então copiá-lo radialmente. Essa necessidade estendeu, sobretudo, o tamanho e a complexidade do algoritmo.

7.3.1. Diagrama com o algoritmo desenvolvido.

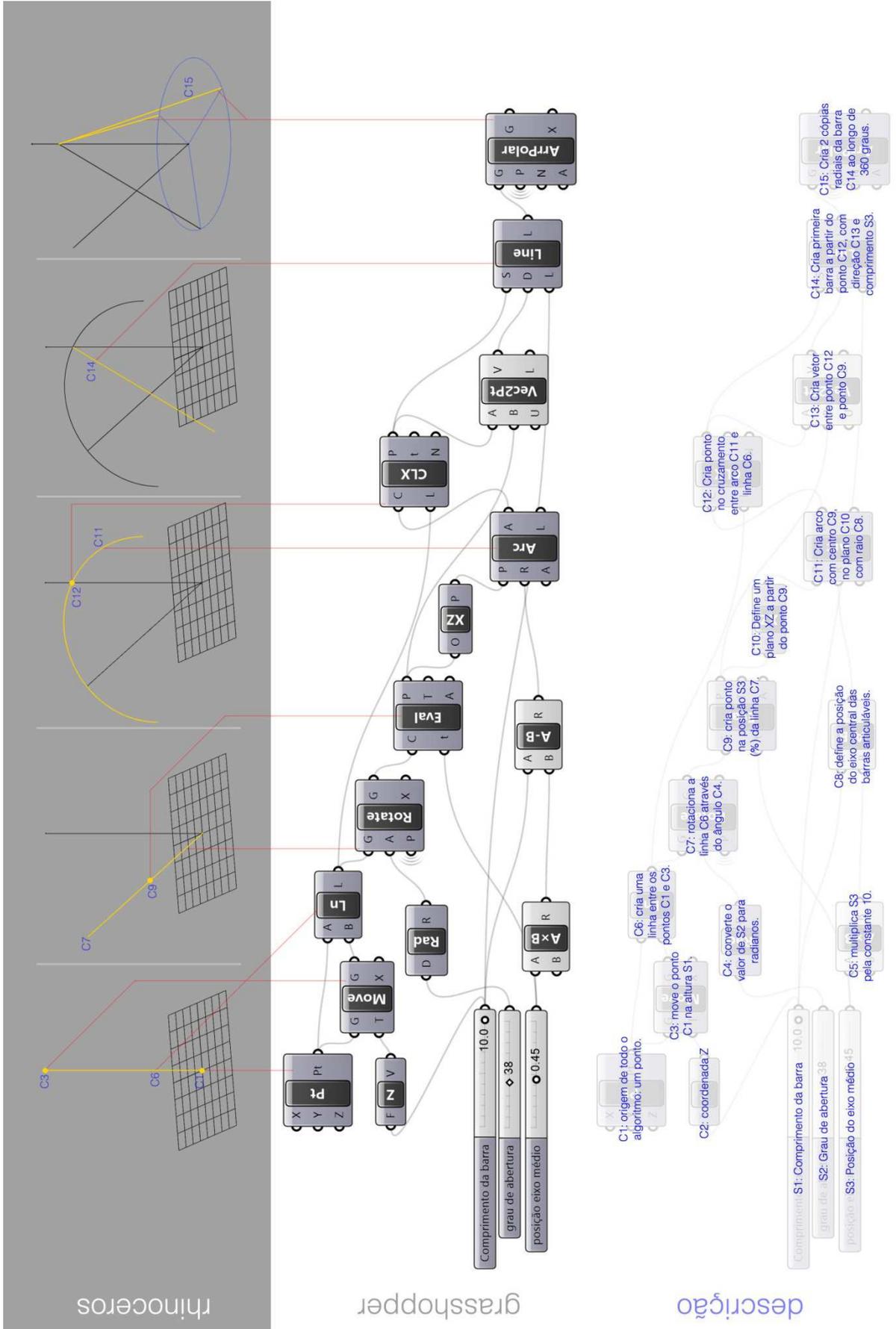


Diagrama 7.6: Algoritmo para Piñero 01.
 Fonte: elaborado pelo autor.

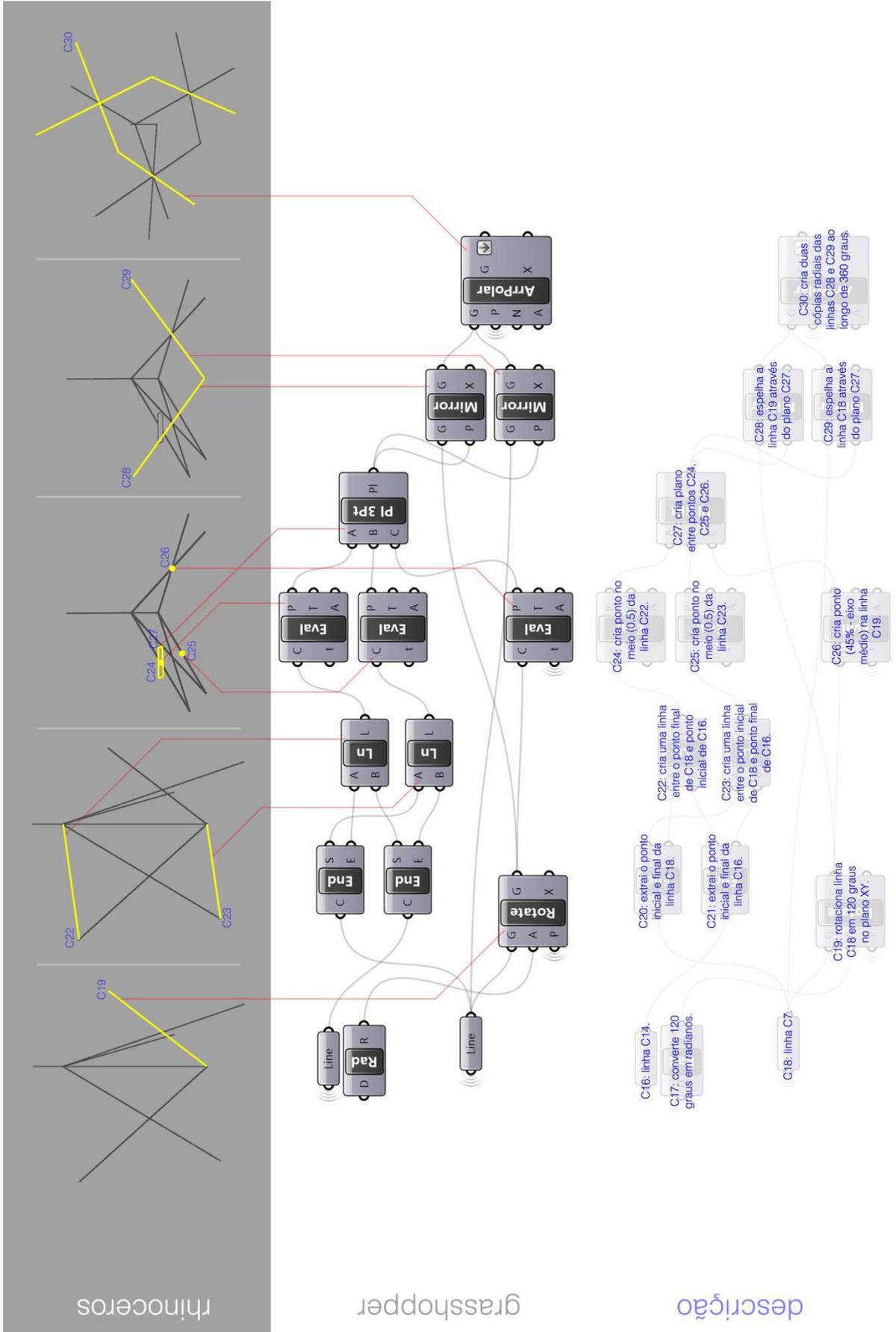


Diagrama 7.7: Algoritmo para Piñero 02. Fonte: elaborado pelo autor.

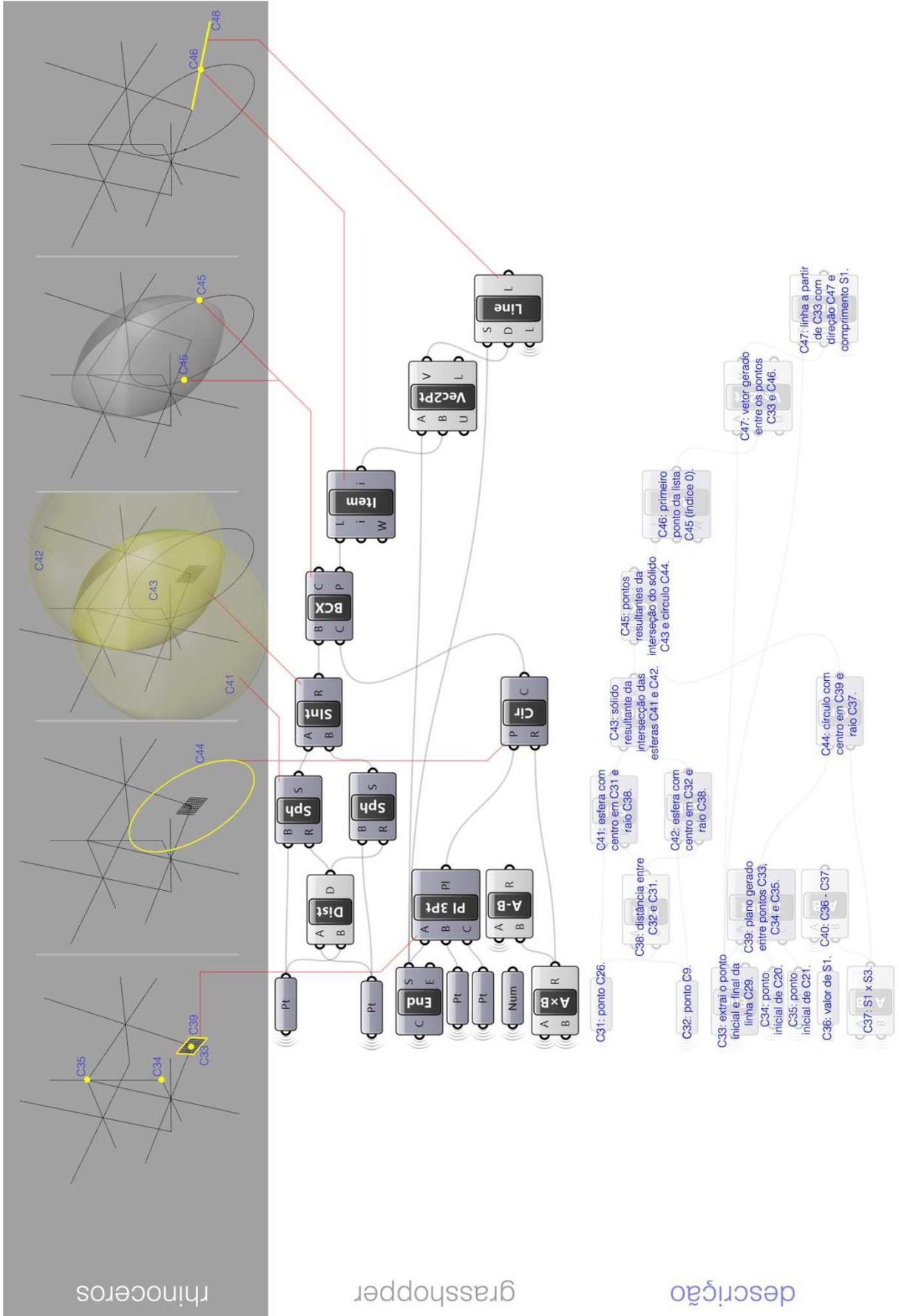


Diagrama 7.8: Algoritmo para Piñero 03.
Fonte: elaborado pelo autor.

rhinceros

grasshopper

descrição

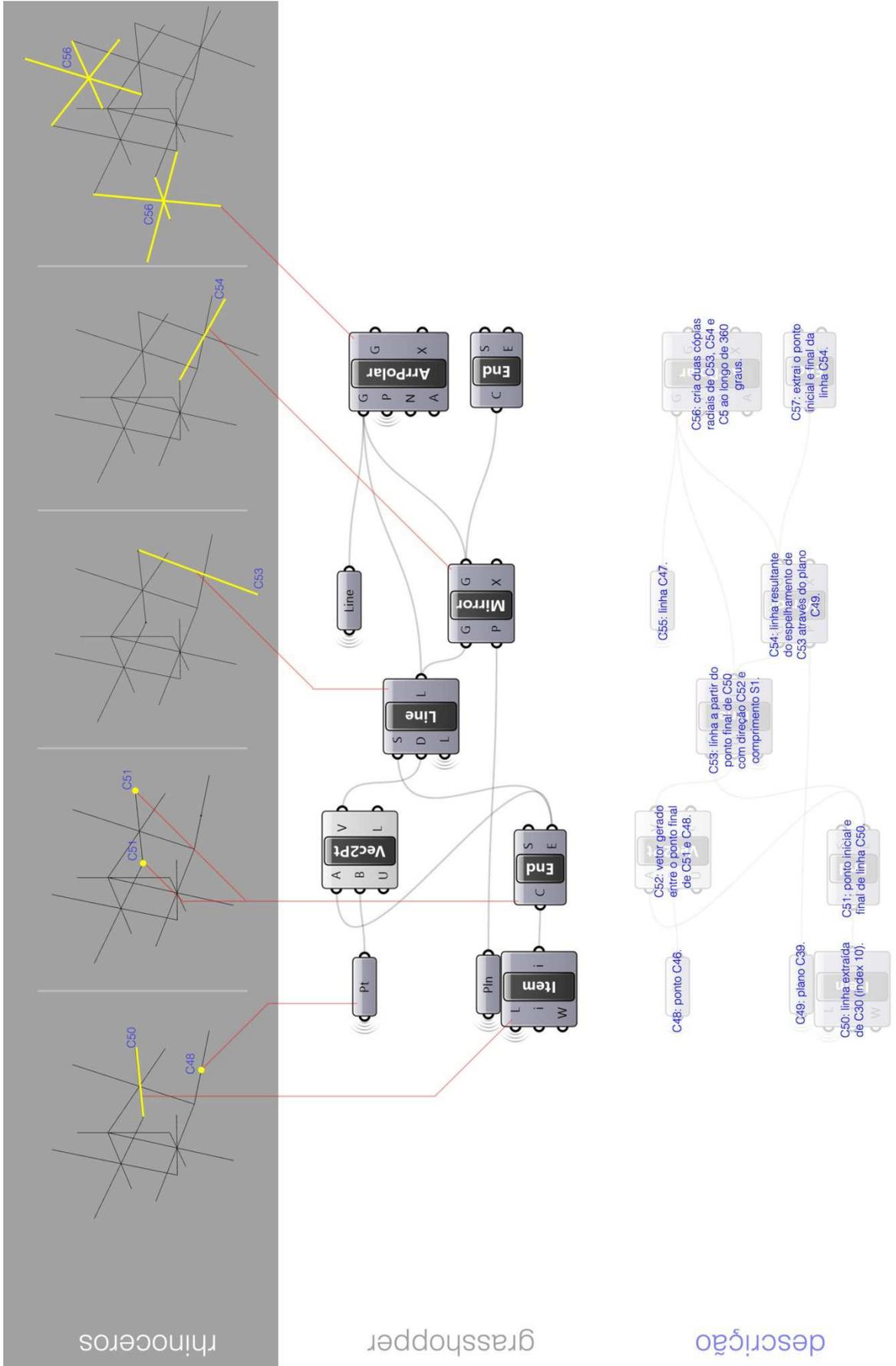


Diagrama 7.9: Algoritmo para Piñero 04.
Fonte: elaborado pelo autor.

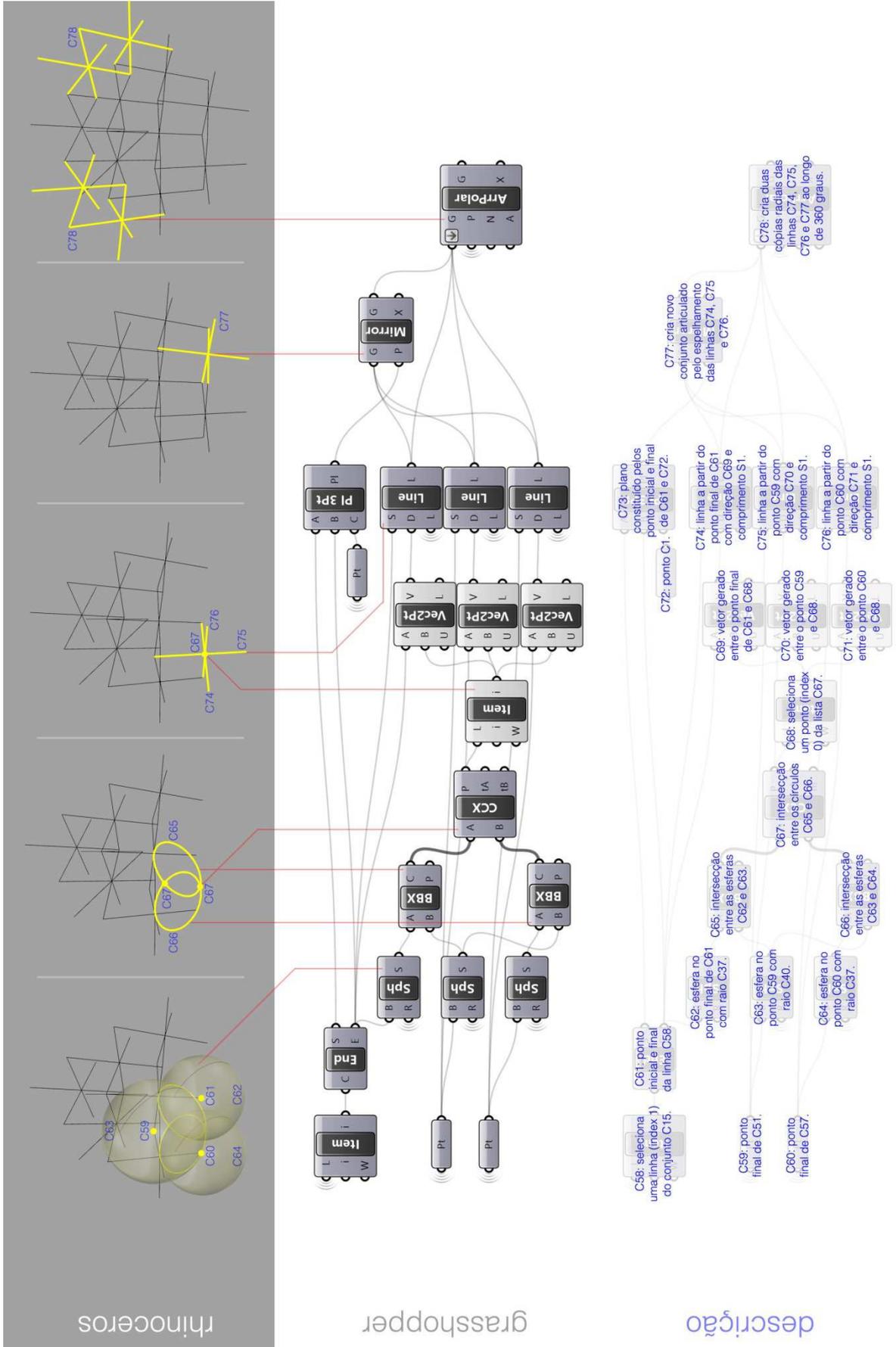


Diagrama 7.10: Algoritmo para Piñero 05.
Fonte: elaborado pelo autor.

8. Conclusão e Considerações finais.

Existem centenas de patentes que, de alguma forma, são resultado de uma apropriação do funcionamento de estruturas pantográficas para diversos fins, em diferentes áreas, como medicina, mecânica, aeronáutica e arquitetura.

A partir do levantamento de patentes realizado nesta pesquisa, pode-se concluir que embora haja um número representativo de patentes sobre estruturas pantográficas, poucas são as raízes que, de fato, as diferenciam como inovação. A maioria das patentes são complementações ou desenvolvimentos com base em três raízes de estruturas pantográficas distintas: *Umbrella* de L. K. Selden (US23503A), em 1859; *Three dimensional reticular structure* de E. P. Pinero (US3185164A), em 1961 e *Reversibly expandable doubly-curved truss structure* de C. Hoberman (US4942700), em 1990.

Neste contexto, analisou-se cada uma das três com o objetivo de se alcançar uma melhor compreensão das mesmas. Para isso, decidiu-se utilizar um ferramental tecnológico informatizado, crescente no dia a dia dos profissionais das áreas de Arquitetura e Construção. Tal ferramental baseia-se em primitivas gráficas parametrizadas, que permite uma visualização e manipulação de variáveis geométricas dos objetos modelados virtuais em tempo real.

A utilização de tal ferramental auxiliou no desenvolvimento de algoritmos específicos para cada uma das estruturas que permitem, por meio da parametrização existente, além da compreensão e realização de simulações das estruturas modeladas, uma extrapolação, possibilitando a simulação de novas estruturas com a mesma raiz.

Assim sendo, acredita-se que o produto desta pesquisa colaborou, não apenas com a divulgação das estruturas pantográficas, suas origens e funcionamentos, como também a geração de algoritmos potencialmente representativos das raízes destas três estruturas que podem auxiliar estudantes e projetistas, no desenvolvimento de novas estruturas pantográficas.

Como trabalhos futuros, observa-se que estes algoritmos possam servir de base para a pesquisa e criação de novas estruturas pantográficas.

A abordagem geométrica permitiu essa compreensão mais intuitiva dos sistemas, elucidando o funcionamento dos sistemas pelo entendimento de suas relações de causa e efeito. Assim, as ferramentas da geometria contribuem para descrever os eventos dinamicamente e instrumentalizar o pesquisador a investigar as soluções não somente a partir de outras anteriores, mas desenvolvendo uma compreensão cada vez maior sobre a ontologia dessas estruturas.

Muitas são as contribuições pertinentes às pesquisas em estruturas articuladas pantográficas e, para esta especificamente, selecionou-se as patentes que são marcos por trazerem mudanças fundamentais no entendimento de suas possibilidades. Então, o desenvolvimento de um algoritmo visual – para cada sistema articulado pantográfico – em um software de simulação paramétrica permitiu descrever e vislumbrar as qualidades geométricas intrínsecas de cada componente, permitindo também manipular dinamicamente suas características e atuação. Assim, obtêm-se o resultado de suas recursivas interações com o todo, extrapolando as possibilidades dos sistemas descritos nas patentes.

A criação dos algoritmos visuais é a maior contribuição deste trabalho, pois estes viabilizam a compreensão das patentes e expandem as suas possibilidades de aplicação através de sua variação paramétrica.

Dessa forma, conclui-se que a pesquisa atende seus objetivos identificando as patentes fundamentais à evolução dos sistemas articulados pantográficos e elaborando o algoritmo paramétrico que descreve e manipula seu comportamento geométrico, contribuindo com seu entendimento global para o desenvolvimento de novas soluções em Arquitetura.

REFERÊNCIAS

- AKOS, G.; PARSONS, R. **Grasshopper Primer**, 3. ed., 2015. Disponível em: <<http://grasshopperprimer.com/en/index.html>>. Acessado em: agosto 2015.
- ALMEIDA, L. B. **Cobertura rígidas adaptáveis na arquitectura: possibilidades de transformação e mobilidade**. 2014. 145 f. Dissertação (Mestrado em Arquitectura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitectura, Universidade do Porto, Porto.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: informação e documentação; referências; elaboração**. Rio de Janeiro, 2002.
- BAPTISTA, L. S. **Produções efémeras: entre a condição existencial nómada e as práticas de acção urbana**. Arqa - Arquitectura e Arte Contemporâneas, Lisboa, n. 77, p. 06, jan/fev. 2010.
- BAUMAN, Z. **Modernidade Líquida**. 1 ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2001.
- BOAKE, T. M. **Mashrabiya reinvented: double façades**, persian gulf style. The big 5 hub. Nov. 2014. Disponível em: <<https://www.thebig5hub.com/opinion/2014/november/mashrabiya-reinvented-double-fa%C3%A7ades-persian-gulf-style/>>. Acesso em: novembro 2015.
- BOAKE, T. M. **Hot Climate double Façades**. In: **Façade Tectonics**, 2014, Los Angeles. Disponível em: <<http://www.tboake.com/bio/facadetectonics2014boake-rev.pdf>>. Acesso em: novembro 2015.
- BRYSON, B. **Em casa: uma breve história da vida doméstica**. 1 ed. São Paulo: Companhia das letras, 2011.
- CHAN, M. C. **Fabric Structure, materials and its applications**. In: Building Technology, 2012, Hong Kong. Disponível em: <<https://bt301.files.wordpress.com/2012/02/fabric-structure-materials-and-its-application-144912032.pdf>>. Acesso em: novembro 2015.
- CILENTO, K. **Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas**. Archdaily. Set. 2012. Disponível em: <<http://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas/>>. Acesso em: novembro 2015.
- DANFORTH, F. E. **Door-closing device**. US 1547098. 21 jul. 1925. Disponível em: <<http://www.google.ch/patents/US1547098>>. Acesso em: dezembro 2015.
- DILLER SCOFIDIO + RENFRO. **The Bubble: Hirshhorn museum and sculpture garden**. 2013. Disponível em: <<http://www.dsrny.com/projects/hirshhorn-bubble>>. Acesso em: fevereiro 2016.

ENGEL, H. **Sistemas estruturais**. 3 ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2003.

ESCRIG, F. et. al. **Visualization of expandable structures with self-folding roofing plates**, Transactions on Information and Communications Technologies, vol. 15, 1995. Disponível em: <<http://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-information-and-communication-technologies/15/10819>>. Acesso em: fevereiro 2016.

FAINGUELERNT, E. K.; NUNES, K. R. A. **Práticas pedagógicas para o ensino médio**, Porto Alegre: Penso, 2012. Disponível em: <https://books.google.com.br/books/about/Matem%C3%A1tica_Pr%C3%A1ticas_Pedag%C3%B3gicas_para.html?id=SHCp_RK6FpkC&redir_esc=y>. Acesso em: dezembro 2014.

FLORIO, W. **Modelagem paramétrica, criatividade e projeto: duas experiências com estudantes de arquitetura**. Revista Gestão e Tecnologia de Projetos - IAU/USP, Volume 6, N.2, Dezembro 2011. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/51010>>. Acesso em: abril 2016.

FOX M. A., YEH B. P. **Intelligent Kinetic Systems in Architecture**. In: Managing Interactions in Smart Environments

FREARSON, A. **Leviathan by Anish Kapoor**. Dezeen magazine. jun. 2011. Disponível em: <<http://www.dezeen.com/2011/06/22/leviathan-by-anish-kapoor/>>. Acesso em: dezembro 2015.

FREARSON, A. **Ark Nova by Arata Isozaki and Anish Kapoor**. Dezeen magazine. set. 2011. Disponível em: <<http://www.dezeen.com/2011/09/23/ark-nova-by-arata-isozaki-and-anish-kapoor/>>. Acesso em: dezembro 2015.

FULLER R. B. **Laminar geodesic dome**. US 3203144. 31 ago. 1960. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US3203144>>. Acesso em: julho 2016.

FUNDACION EMILIO PEREZ PINERO, **El arquitecto**. 2016. Disponível em <<http://www.perezpinero.org/el-arquitecto/>>. Acesso em: julho 2016.

GALILEI, G.; SCHEINER, C. **On sunspots: translated and introduced by Eileen Reeves and Albert Van Helden**. Chicago: Universidade de Chicago. 2010. Disponível em: <https://books.google.com.br/books/about/On_Sunspots.html?id=vdDhfPxIcLQC&redir_esc=y>. Acesso em: dezembro 2015.

GERICH, V. **Collapsible crane or platform tower**. US 2363784. 28 nov. 1944. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US2363784>>. Acesso em: dezembro 2015.

GROAT, L.; WANG, D. **Architectural Research Methods**. 2. ed., Nova Jersey: Wiley, 2013. 468p.

- HANAOR, A., LEVY, R. **Evaluation of Deployable Structures for Space Enclosures**. International Journal of Space Structures, vol. 16, 2001. Disponível em: <<http://sps.sagepub.com/content/16/4/211.abstract>>. Acesso em: janeiro 2015.
- HARVEY, D. **Condição Pós-Moderna: uma pesquisa sobre as origens da mudança cultural**. 6 ed. São Paulo: Loyola, 1996.
- HERRON, R. **Walking City**. 1964. Disponível em: <<http://archigram.westminster.ac.uk/project.php?id=60>>. Acesso em: Julho 2016.
- HOBERMAN, C. **Reversibly expandable doubly-curved truss structure**. US 4942700. 24 jul. 1988. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US4942700>>. Acesso em: maio 2013.
- HOBERMAN, C. **Folding covering panels for expanding structures**. US 6834465. 26 nov. 2001. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US6834465>>. Acesso em: julho 2016.
- KIRKEGAARD, P. H., SØRENSEN, J. D. **Robustness Analysis of Kinetic Structures**. In: Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2009, Valência: Universidad Politecnica de Valencia. p. 2380-2391. Disponível em: <<https://riunet.upv.es/handle/10251/7286>>. Acesso em: março 2016.
- KORKMAZ, K., AKGÜN, Y., MADEN F. **Design of a 2DOF 8R Linkage for Transformable Hypar Structure**, vol. 40, n.1, janeiro 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/241738008_Design_of_a_2DOF_8R_Linkage_for_Transformable_Hypar_Structure>. Acesso em: março 2015.
- LANGDON, D. **German Pavilion, Expo '67 / Frei Otto and Rolf Gutbrod**. Archdaily. Abr. 2015. Disponível em: <<http://www.archdaily.com/623689/ad-classics-german-pavilion-expo-67-frei-otto-and-rolf-gutbrod>>. Acesso em: junho 2016.
- MARINETTI, F. T. **Manifesto Futurista**. Paris. Le Figaro, 1909. Disponível em: <<https://memoriavirtual.net/2005/02/21/futurismo-manifesto-futurista-2/>>. Acesso em: janeiro 2016.
- MCCARTHY, J.M.; SOH, G.S. **Geometric design of linkages**. 2 ed., Nova Iorque: Springer, 2011.
- OLODORT, R.; TANG, J. **Collapsible keyboard**. US 6331850. 18 dez. 2001. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US6331850>>. Acesso em: julho 2016.
- OUROUSSOFF, N. **In Washington, a different kind of bubble**. The New York Times, Nova Iorque, p. C1, dez. 2009. Disponível em: <http://www.nytimes.com/2009/12/15/arts/design/15hirshhorn.html?_r=0>. Acesso em: fevereiro 2016.

- PINERO, E. P. **Three dimensional reticular structure**. 21 abr. 1961. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US3185164>>. Acesso em: dezembro 2014.
- REINIS, J. G.; BARYE, A. **The Founders and Editors of the Barye Bronzes**, Chennai: Polymath press, 2007. p. 43. Disponível em: <https://books.google.com.br/books/about/The_founders_and_editors_of_the_Barye_br.html?id=Xr2iLWjkHqAC>. Acesso em: dezembro 2014.
- ROSS, W. A. **Load lifter**. US 2050593. 25 jun. 1946. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US2402579>>. Acesso em: dezembro 2015.
- SCHEFF, L. **Folding closure**. US 2799332. 16 jul. 1957. Disponível em: <<http://www.google.ch/patents/US2799332>>. Acesso em: maio dezembro 2015.
- SELDEN, L. K. **Umbrella**. US 23503. 5 abr. 1859. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US23503>>. Acesso em: julho 2014.
- SIKLI, B. J. **Scissors lift**. US 4175644. 27 nov. 1979. Disponível em: <<http://www.google.ch/patents/US4175644>>. Acesso em: maio 2015.
- SL-RASCH. **Umbrellas**. 1992. Disponível em: <www.sl-rasch.com>. Acesso em: janeiro 2016.
- SOUSA, R. G. **Nomadismo**; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/historiag/nomadismo.htm>>. Acesso em: março 2016.
- STEVENSON, C. M. **Morphological principles of kinetic architectural structures**. In: Adaptive Architecture Conference Proceedings, 2011, Londres. p. 1-12. Disponível em: <https://issuu.com/carolinastevenson/docs/4cp._morphological_principles_of_ki>. Acesso em: fevereiro 2016.
- THE PRITZKER ARCHITECTURE PRIZE. **Frei Otto: 2015 laureate**. Disponível em: <<http://www.pritzkerprize.com/laureates/2015>>. Acesso em: junho 2016.
- TRAUT, C. **Collapsible stairway**. US 2050593. 11 ago. 1936. Disponível em: <<https://www.google.com.au/patents/US2050593>>. Acesso em: dezembro 2015.
- WALTER, V. V. M. **Convertible Roofs, Kurs 4: Numerische Optimierung und Formfindung – Realisierung an einem Membrantragwerk**, Ferienakademie. Stuttgart: Universidade de Stuttgart, 2006. Disponível em: <http://www.st.bv.de/content/teaching/ferienakademie/handouts/14_walter_handout.pdf>. Acesso em: fevereiro 2016.

YELLAPRAGADA, M. **Pneumatic Structures: The fascination of pneumatic structures begins with the fascination of the sky**. 2015. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/51947200/Pneumatic-Structures>>. Acesso em: março 2016.

YOU, Z.; PELLEGRINO, S. **Foldable bar structures**, International Journal of Solids and Structures, vol. 34, n. 15, maio 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768396001254>>. Acesso em: maio 2014.

REFERÊNCIAS IMAGÉTICAS

Figura 2.1

http://www.dakhlabeledouins.com/img/26_bedouin_tent.jpg
<https://johnhowie.files.wordpress.com/2009/12/china-3-363.jpg>
<http://cdn.loc.gov/service/pnp/ppmsc/02500/02515v.jpg>

Figura 2.2

<http://archexpo.net/sites/default/files/crystal-palace-general-view1.jpg?slideshow=true&slideshowAuto=false&slideshowSpeed=4000&speed=350&transition=fade>

Figura 2.3

[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Giacomo_Balla,_1912,_Dinamismo_di_un_Cane_al_Guinzaglio_\(Dynamism_of_a_Dog_on_a_Leash\),_Albright-Knox_Art_Gallery.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Giacomo_Balla,_1912,_Dinamismo_di_un_Cane_al_Guinzaglio_(Dynamism_of_a_Dog_on_a_Leash),_Albright-Knox_Art_Gallery.jpg)

Figura 2.4

https://utopografias.files.wordpress.com/2012/11/utopografias_001.jpg

Figura 2.5

HANAOR, A., LEVY, R. **Evaluation of Deployable Structures for Space Enclosures**. International Journal of Space Structures, vol. 16, 2001, p.3. Disponível em: <<http://sps.sagepub.com/content/16/4/211.abstract>>.

Figura 2.6

STEVENSON, C. M. **Morphological principles of kinetic architectural structures**. In: Adaptive Architecture Conference Proceedings, 2011, Londres. p. 12. Disponível em: <https://issuu.com/carolinastevenson/docs/4cp_morphological_principles_of_ki>.

Figura 2.7

<http://solucionista.es/wp-content/uploads/al-bahar-towers-abu-dhabi-1.jpg>

Figura 2.8

<http://solucionista.es/wp-content/uploads/al-bahar-towers-abu-dhabi-6.jpg>

Figura 2.9

<http://www.archdaily.com.br/br/794650/classicos-da-arquitetura-pavilhao-alemao-da-expo-67-frei-otto-e-rolf-gutbrod/55074402e58eccc4100006e-nighttime-inverted-t>
<http://www.archdaily.com.br/br/794650/classicos-da-arquitetura-pavilhao-alemao-da-expo-67-frei-otto-e-rolf-gutbrod/550743efe58eccc4100006d-form-finding-study-m>

Figura 2.10

<http://www.archdaily.com.br/br/794650/classicos-da-arquitetura-pavilhao-alemao-da-expo-67-frei-otto-e-rolf-gutbrod/550743e7e58ece0c0b00000d-inside-the-german-pa>

Figura 2.11

<https://3.bp.blogspot.com/-vF6NO5XTbMU/VuCy7pBIzI/AAAAAAAAxU/-8JIQJvOOol/s1600/Foto%2BMasjid%2BNabawi%2BMadinah%2BDari%2BAatas.jpg>

Figura 2.12

<http://designlike.com/wp-content/uploads/2013/07/Huge-umbrellas.jpg>

Figura 2.13

<http://www.dsny.com/projects/hirshhorn-bubble>

Figura 2.14

<http://www.dsny.com/projects/hirshhorn-bubble>

Figura 2.15

http://www.archiphotos.com/110525_anishkapoor_leviathan/

Figura 2.16

<http://anishkapoor.com/957/ark-nova>

Figura 2.17

<http://anishkapoor.com/957/ark-nova>

Figura 2.17

<http://anishkapoor.com/957/ark-nova>

Figura 4.1

GALILEI, G.; SCHEINER, C. **On sunspots: translated and introduced by Eileen Reeves and Albert Van Helden**. Chicago: Universidade de Chicago. 2010, p 29. Disponível em:
 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/Pantograph_by_Christoph_Scheiner_%28crop%29.png>.

Figura 4.8

https://medias.expertissim.com/media/cache/object_giant_cropped/uploads/object/2009/09/21/450909/450909-2bronze-femme-1n.jpg
https://medias.expertissim.com/media/cache/media_zoom/uploads/object/2009/09/21/450909/450909-2bronze-femme-5n.jpg

Figura 4.9

REINIS, J. G.; BARYE, A. **The Founders and Editors of the Barye Bronzes**, Chennai: Polymath press, 2007. p. 43. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/The_founders_and_editors_of_the_Barye_br.html?id=Xr2iLWjkHqAC.

Figura 5.1

<http://ebooks.library.cornell.edu/cgi/t/text/pageviewer-idx?c=kmoddl;cc=kmoddl;rgn=full%20text;idno=kmod020;didno=kmod020;view=image;seq=58;node=kmod020%3A1;page=root;size=100>

Figura 5.5

SIKLI, B. J. **Scissors lift**. US 4175644. 27 nov. 1979. Disponível em: <http://www.google.ch/patents/US4175644>.

Figura 5.8

SELDEN, L. K. **Umbrella**. US 23503. 5 abr. 1859. Disponível em: <http://www.google.com/patents/US23503>.

Figura 5.12

<http://www.vedoque.net/emilio/wp-content/uploads/2012/08/UIA-03-1.jpg>

Figura 5.16

HOBERMAN, C. **Reversibly expandable doubly-curved truss structure**. US 4942700. 24 jul. 1988. Disponível em: <http://www.google.com/patents/US4942700>.

Figura 7.21

PINERO, E. P. **Three dimensional reticular structure**. 21 abr. 1961. Disponível em: <https://www.google.com/patents/US3185164>.

Figura 8.1

HOBERMAN, C. **Folding covering panels for expanding structures**. US 6834465. 26 nov. 2001. Disponível em: <https://www.google.com/patents/US6834465>.

Figura 8.2

TRAUT, C. **Collapsible stairway**. US 2050593. 11 ago. 1936. Disponível em: <https://www.google.com.au/patents/US2050593>.

OLODORT, R.; TANG, J. **Collapsible keyboard**. US 6331850. 18 dez. 2001. Disponível em: <https://www.google.com/patents/US6331850>.

APÊNDICE A

Criação do algoritmo para a simulação digital da estrutura de Hoberman.

Assim, definiu-se inicialmente um ponto a partir de um componente *Construct Point*, que funcionou como centro das três circunferências - planos. Então, o componente arco foi utilizado para se gerar uma curva regular com 90 graus ($0,5\pi$) cujo centro foi vinculado ao ponto central já definido. Esta curva foi dividida parametricamente em X partes iguais, sendo X qualquer número inteiro e par – para que sempre integre um novo par de barras anguladas, conforme a figura 9.1.

A seguir, definiu-se que os três primeiros pontos seriam utilizados para se criar o primeiro par de barras anguladas. Utilizou-se o componente *line* para criar três raios entre o centro do arco e os três pontos. No segundo ponto foi associado um componente *circle* com raio igual a distância entre este ponto e qualquer um dos outros dois próximos – o primeiro ou o terceiro (figura 9.2).

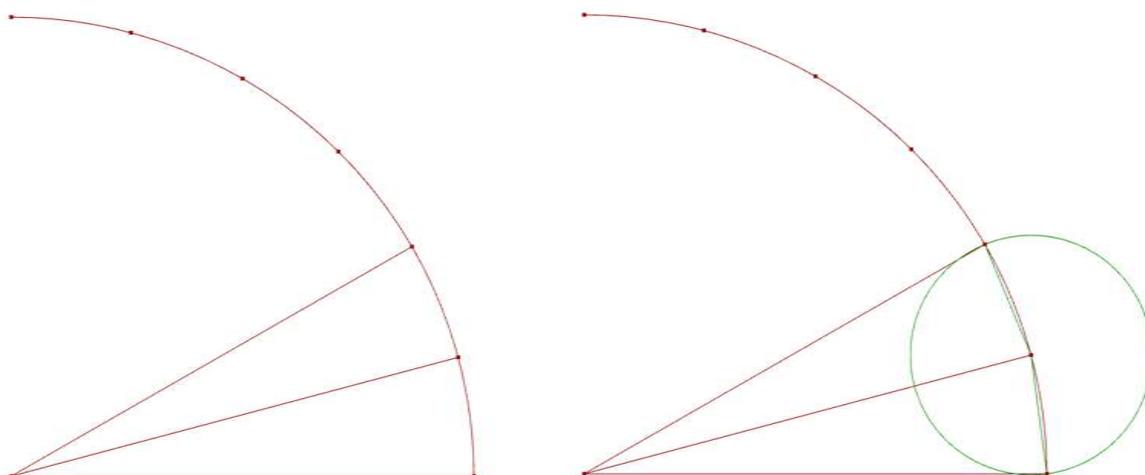


Figura 9.1 e 9.2: Arco com 90 graus e X divisões – 6 / Primeira barra angulada.
Fonte: elaborado pelo autor.

Os dois segmentos de reta resultantes da ligação entre os três primeiros pontos dão origem à primeira barra angulada. Para gerar parametricamente seu deslocamento ao longo do raio central, utilizou-se do componente *evaluate curve* associado a um *slider* variando entre 0 e 1, que permite transladar um ponto através deste raio e, ao reassociar o círculo a este segundo ponto, a circunferência também é deslocada consigo. A intersecção entre o círculo e os outros dois raios pode ser

obtida pelo uso do componente *curve|curve*. São necessários dois componentes, um para cada reta.

O componente *list item* permite selecionar apenas um dos dois pontos resultantes das intersecções. Uma vez que diferentes componentes foram utilizados para cada um dos dois raios, ao utilizar o *list item* em cada um dos componentes *curve|curve*, ele seleciona apenas um ponto de cada intersecção. Como resultado desta operação, o *grasshopper* indexa os dois pontos e o ponto central – obtido pelo *evaluate curve* – em índices diferentes, sendo necessário “achatar” seus índices individualmente utilizando o *flatten* na saída de dados dos três pontos, para então ligá-los todos sequencialmente ao componente *polyline*, resultando na primeira barra angulada com deslocamento paramétrico (figura 9.3).

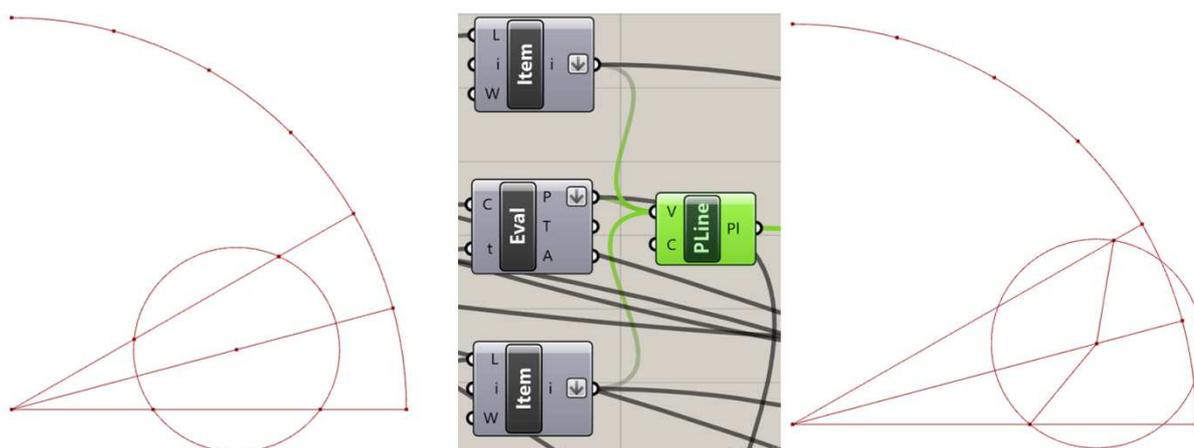


Figura 9.3: Os componentes e a barra angulada resultante.
Fonte: elaborado pelo autor.

Posteriormente, o componente *mirror* foi utilizado para espelhar o comportamento da primeira barra, assemelhando-se a um eixo de simetria. Para que funcione como tal, é necessário ajustar o plano de espelhamento para que este fique perfeitamente coincidente com o segundo raio – o mediano, porém, como se trata de um plano, é imprescindível que seja também perpendicular ao plano do quadrante trabalhado. Como produto da operação, é gerado o primeiro par de barras anguladas.

Com o primeiro conjunto de barras resolvido parametricamente, foi empregado o componente *array polar* com a intenção de se criar cópias rotacionadas deste conjunto (figura 9.4). O ângulo inserido deve ser o mesmo

ângulo do arco original ($0,5\pi$), e com número de cópias igual à metade do número de divisões utilizado no arco, razão pela qual o número de divisões é restrito a números pares. Para esta redução, utilizou-se do componente aritmético *division*, associado ao mesmo *slider* que define o número de divisões, e com o valor 2 na segunda entrada do componente.

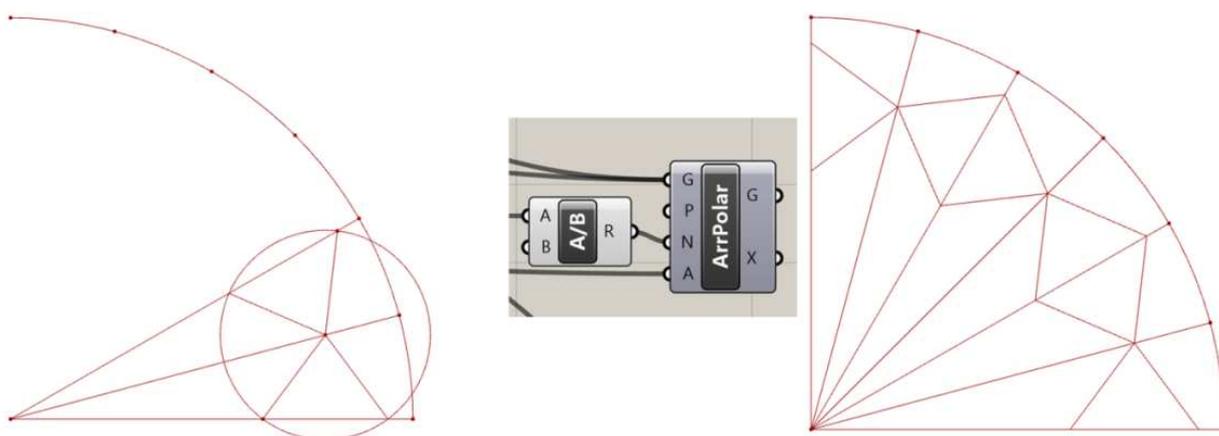


Figura 9.4: Os componentes e os X/2 pares conectados – 3.
Fonte: elaborado pelo autor.

Na prática, o algoritmo necessário para a confecção geométrica de cada quadrante encontra-se integralmente resolvido. Porém, utilizando o componente *offset* para ambos os lados da *polyline* contendo a primeira barra angulada, e outros dois arcos ligando suas extremidades, é possível tornar o conjunto uma superfície – componente *boundary*. Em seguida, basta repetir todo o processo a partir do componente *mirror* e a estrutura será então formada por hastes (figura 9.5).

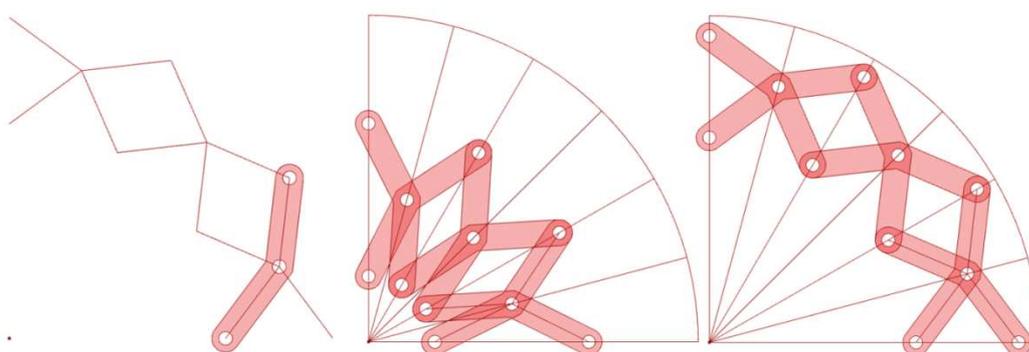


Figura 9.5: Superfície (*boundary*) resultante do componente *offset* com arcos nas extremidades.
Componente *array polar* aplicado à superfície.
Fonte: elaborado pelo autor.

Encerrado o algoritmo de um quadrante, a etapa seguinte de desenvolvimento se deu com a utilização do componente *rotate*, vinculado ao plano XZ ou YZ. Este

componente permite que seja realizada a cópia do quadrante de modo a contemplar um novo quadrante perpendicular ao original. Para tanto, é necessário que o ângulo de rotação seja de 90 graus – $0,5\pi$.

Por fim, é preciso utilizar mais uma vez o componente *array polar* para realizar cópias em todos os demais quadrantes (figura 9.6). Tendo em vista que uma circunferência possui apenas quatro quadrantes, o número de cópias deverá ser também igual a quatro, resultando no domo paramétrico completo.

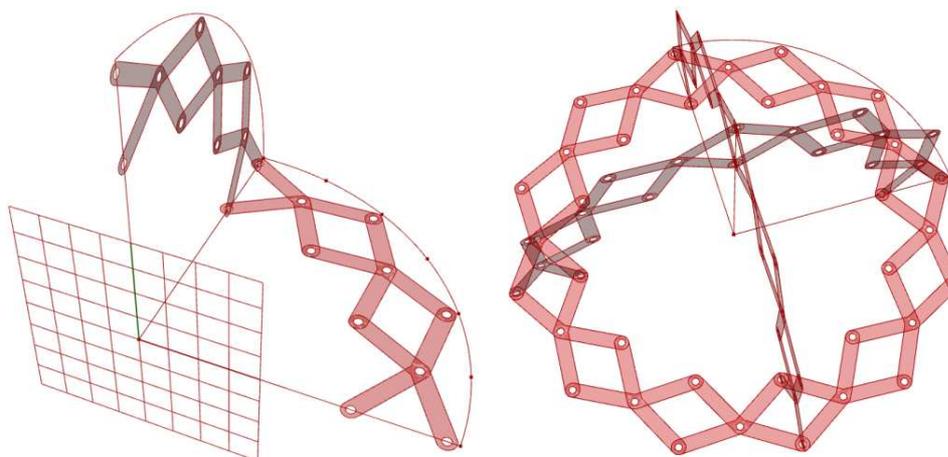


Figura 9.6: Primeiro quadrante rotacionado no plano XZ / Domo paramétrico finalizado.
Fonte: elaborado pelo autor.

Com a estrutura finalizada, é possível verificar seus limites geométricos de expansão e retração (figura 9.7). Porém, é necessário ressaltar que estes limites não são fixos, tendo em vista que a alteração na quantidade de divisões aplicadas ao quadrante original resultará em diferentes soluções de peças e articulações. Todos estes fatores contribuem para as variações destes limites.

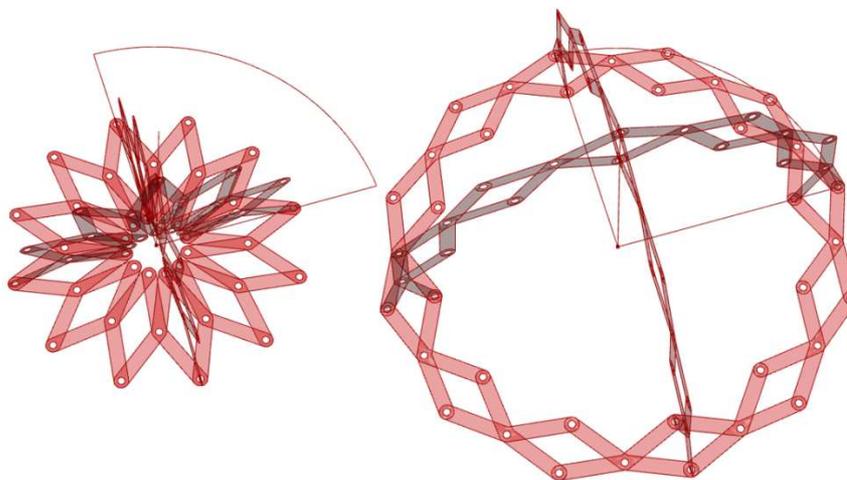


Figura 9.7: Limites de retração e expansão da estrutura contendo três segmentos por quadrante.
Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE B

Criação do algoritmo para a simulação digital da estrutura de Selden.

O algoritmo se inicia utilizando o componente *Construct Point* para criação um ponto que funciona como centro geométrico do sistema. A partir deste ponto, é necessário traçar duas circunferências – utilizando o componente *Circle* - de diferentes raios, sendo o primeiro qualquer valor maior que zero e menor que o segundo, e o segundo será equivalente ao raio do guarda-chuva aberto.

Com as circunferências criadas, é necessário dividi-las igualmente em número par maior ou igual a seis. O número precisa ser par porque cada ponto corresponde a uma barra e estas serão intercaladas por uma junção intermediária que une um par de barras articuláveis, ou seja, três pontos para os vértices das barras e outros três pontos intercalados para a junção intermediária das barras (figura 9.8). O mínimo de seis divisões dará ao sistema uma formação triangular. Porém, quanto maior o número de divisões da circunferência, mais próximo de um círculo o sistema será. O componente responsável por fazer a divisão das circunferências é o *divide curve*.

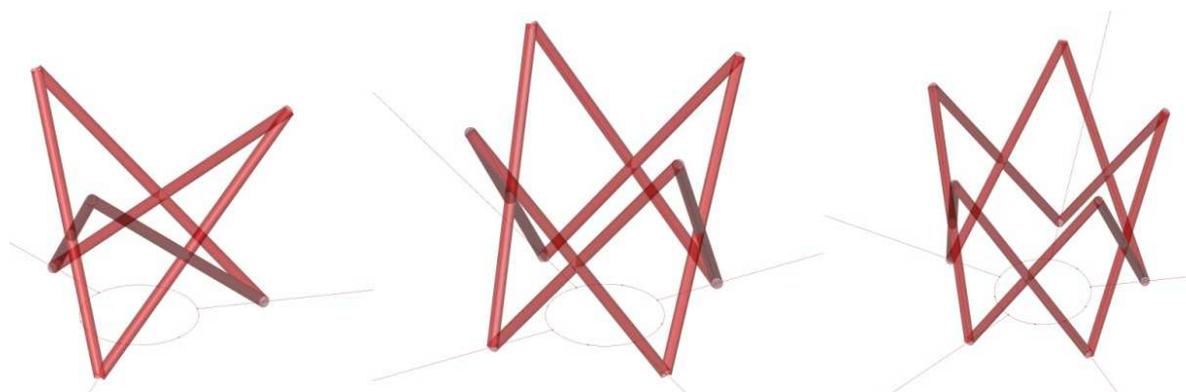


Figura 9.8: Alteração do parâmetro *divide curve* resultando em diferentes sistemas.
Fonte: elaborado pelo autor.

O componente *divide curve* gera uma quantidade igual de pontos em ambas as circunferências, que serão utilizados como pontos iniciais e finais de linhas a serem criadas através do componente *line*. Essas linhas servirão como guias que conduzirão as barras para a expansão e retração do sistema.

Uma vez que todos os pares de barra possuem o mesmo comportamento, basta conduzir o funcionamento de apenas um par e então replicar a todos os outros. Para isso, das linhas guias geradas utilizaremos apenas as três primeiras. Para seleccioná-las, utilizaremos três componentes *list item* cujos índices serão respectivamente 0, 1 e 2.

Como visto anteriormente, para funcionamento do guarda-chuva de Selden é necessário que suas barras se desloquem tridimensionalmente. Tendo em vista que suas articulações permitem apenas rotações e não translações, a dimensão das barras e a posição das articulações são, então, fixas. O algoritmo foi idealizado utilizando da translação de um ponto sobre uma das linhas-guia que, por conseguinte, carrega consigo duas esferas: na primeira o raio é igual à distância entre a extremidade de uma barra e a junção intermediária e, na segunda, o raio é igual à distância entre as duas extremidades (figura 9.9). Para deslocar o ponto sobre a primeira linha-guia foi utilizado o componente *evaluate curve* e para criar as esferas foi utilizado o componente *sphere*.

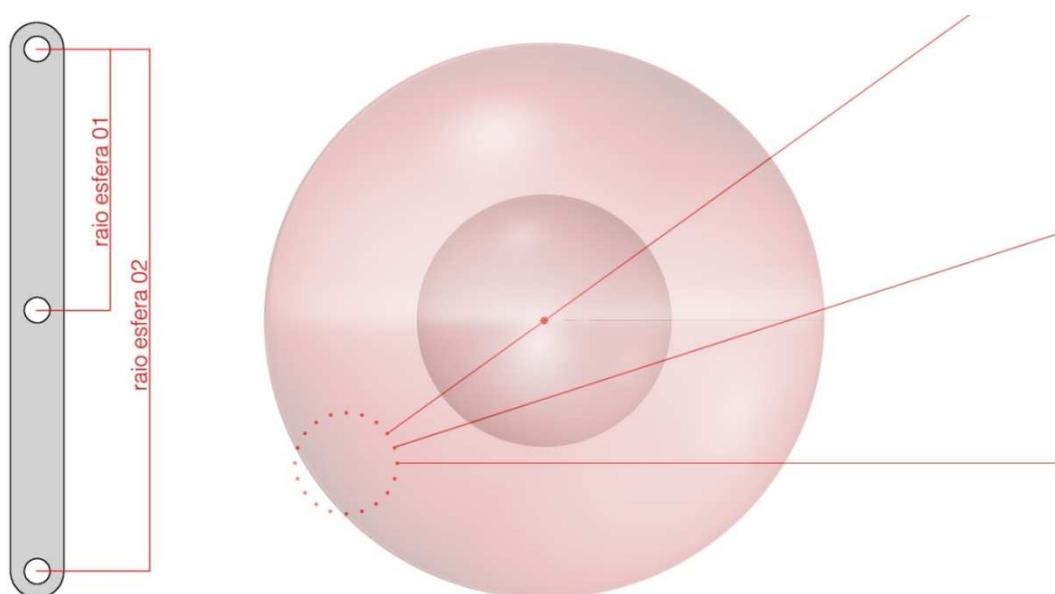


Figura 9.9: Raio das esferas relacionado à barra articulável.
Fonte: elaborado pelo autor.

Utilizou-se de esferas porque a distância entre o ponto transladável e qualquer ponto na superfície da esfera é uma constante. Assim, para criar a primeira barra da articulação pantográfica, é necessário utilizar de uma reta contendo três pontos: o primeiro é dado pelo ponto transladável sobre a primeira linha-guia; o segundo é dado pela intersecção da esfera menor com um plano sobre a segunda

linha-guia e o terceiro ponto é dado pela intersecção da esfera maior com um plano sobre a terceira linha-guia. Para ser uma reta, todos os três pontos precisam estar alinhados.

Foram utilizados dois componentes *extrude* para transformar a segunda e terceira linha-guia em planos verticais, que pudessem ser interseccionados com as esferas. Para a intersecção, utilizou-se o componente *brep* | *brep* entre cada esfera com seu respectivo plano de intersecção, resultando em curvas sobre os planos (figura 9.10). É importante ressaltar que a distância entre o ponto transladável e qualquer ponto sobre estas curvas é a mesma que o raio das esferas – porque é decorrente delas.

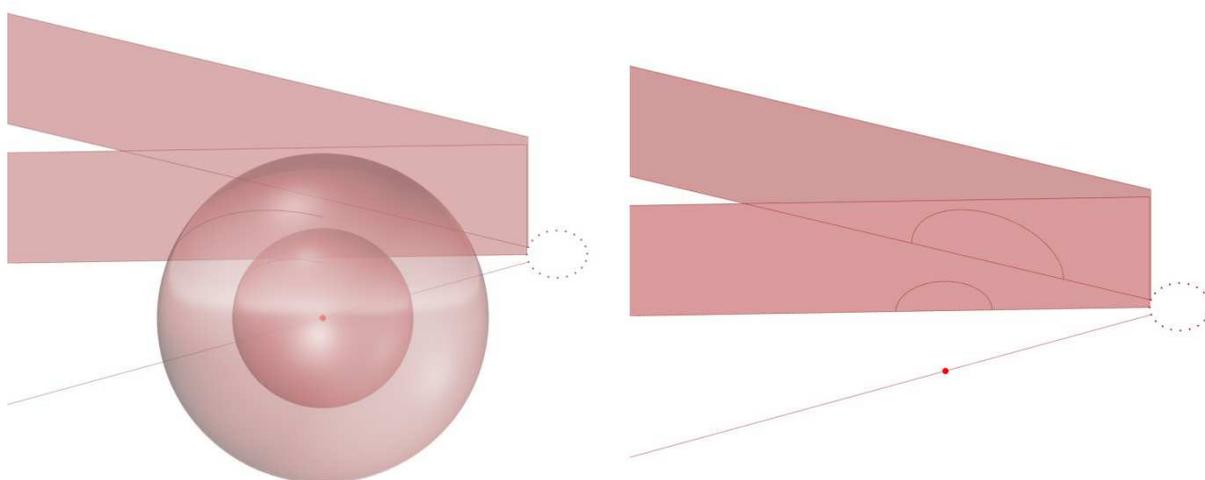


Figura 9.10: Intersecção das esferas com os planos resultando em curvas.
Fonte: elaborado pelo autor.

A partir da geração das curvas, é necessário encontrar uma linha reta que atravesse ambas as curvas simultaneamente, o que manterá constante as distâncias necessárias para a primeira barra, gerando-a então. Para isso, é necessário criar um meio cone entre o maior arco e o ponto transladável e, dessa forma, aonde esse cone cruzar com o primeiro arco ambas as distâncias são adequadas e estão precisamente alinhadas.

Para desenvolver o cone, utilizou-se o componente *divide curve* para criar diversos pontos ao longo do arco maior. Em seguida, com um novo componente *line* entre o ponto transladável e todos os pontos resultantes da divisão da curva, diversas linhas são criadas para que sirvam à criação da superfície do cone –

através do componente *loft*. Por fim, o componente *surface | curve* produz um ponto resultante da intersecção entre o cone gerado pelo *loft* e a menor curva (figura 9.11).

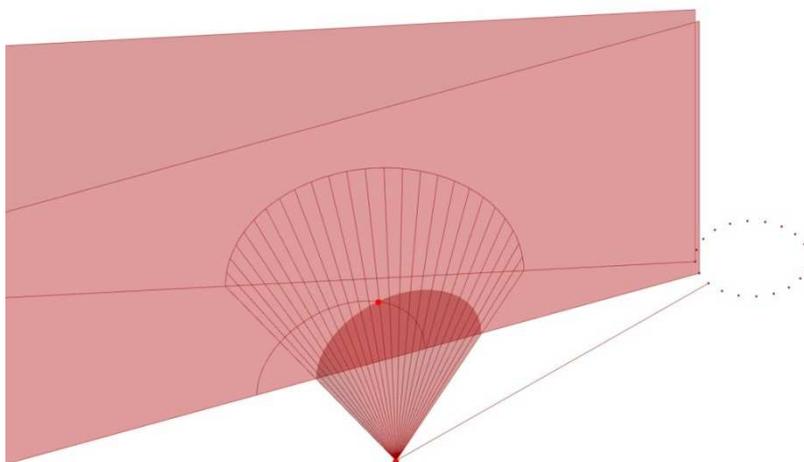


Figura 9.11: Intersecção entre cone e curva resultando na junção intermediária da barra.
Fonte: elaborado pelo autor.

O componente *Vector 2pt* é capaz de criar um vetor entre dois pontos dados, e é necessário para criar a primeira barra articulável. Esse componente foi utilizado entre o ponto transladável e o ponto resultante da intersecção entre cone e curva – a junção intermediária. O vetor resultante foi utilizado no componente *line SDL - start / direction / length* - sendo *start* o ponto inicial da linha; *direction* o vetor com sua direção e *length* seu comprimento, devendo este último ser o mesmo raio da esfera maior. Assim, ao mudar a posição do ponto deslizante, a linha funciona como a primeira barra articulada (figura 9.12).

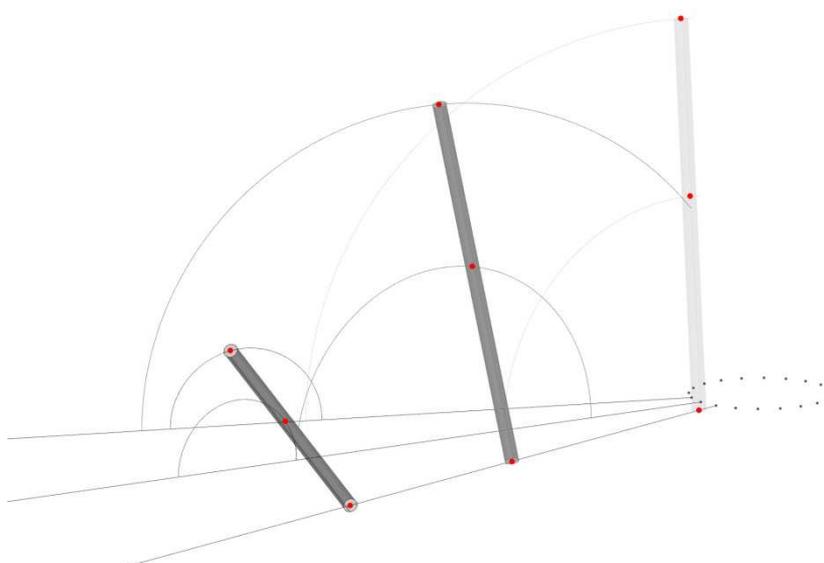


Figura 9.12: Desenvolvimento da primeira barra articulada.
Fonte: elaborado pelo autor.

Resolvido o funcionamento da primeira barra, basta realizar um espelhamento desta através da segunda linha guia - que funcionará como um eixo de simetria - para criar a segunda barra articulada e finalizar o primeiro par de barras (figura 9.13). Para o espelhamento é necessário utilizar o plano vertical oriundo da extrusão da segunda linha guia.



Figura 9.13: Desenvolvimento da primeira articulação pantográfica.
Fonte: elaborado pelo autor.

Por último, uma vez que o primeiro par de barras articuladas já se encontra operante, é necessário utilizar o componente *array polar* para criar os demais pares de barras através de cópias rotacionadas. O número de cópias deverá ser igual à metade do número de divisões da primeira circunferência do algoritmo - que possuía número par, finalizando o algoritmo (figura 9.14).

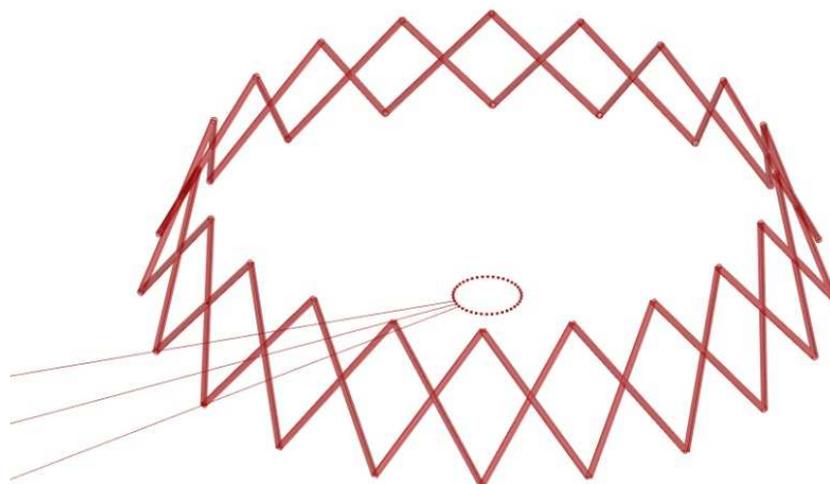


Figura 9.14: Sistema pantográfico de Selden finalizado.
Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE C

Criação do algoritmo para a simulação digital da estrutura de Piñero.

O algoritmo se inicia utilizando o componente *Construct Point* para criação um ponto que funcionará como centro geométrico do sistema. A partir deste ponto, cria-se o parâmetro que define o comprimento da barra: uma linha perfeitamente vertical entre este primeiro ponto e uma cópia sua criada pelo componente *move* ao longo do eixo cartesiano Z. O parâmetro que definirá esta distância entre os dois pontos definirá igualmente o comprimento das barras articuladas de todo o sistema (figura 9.15).

A seguir, é necessário utilizar um componente *rotate* para rotacionar essa barra – em qualquer ângulo maior que 0 e menor que 90 - a partir do ponto inicial do sistema e com desenvolvimento em plano XZ. Esta rotação é a responsável por conduzir a abertura e a retração de todo o sistema. Na barra rotacionada é necessário utilizar o componente *evaluate curve* para definir a posição da junção intermediária das barras, gerando um ponto ao longo desta linha cuja posição será definida através de número com variação entre 0 e 1, sendo 0 a posição em uma extremidade da barra e 1, na extremidade oposta (figura 9.16).

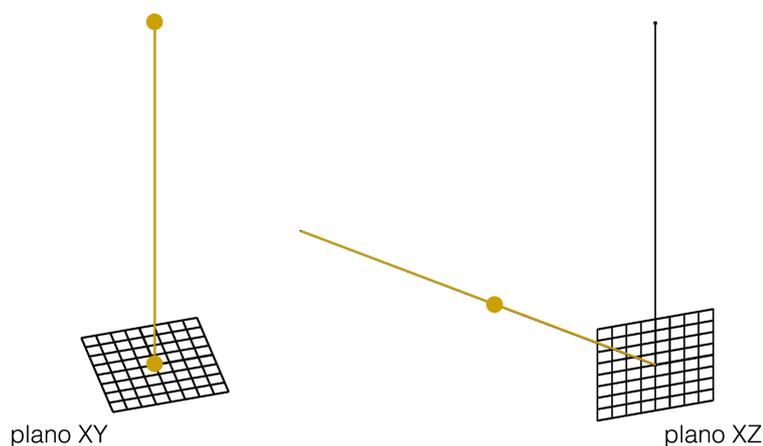


Figura 9.15 e 9.16: Definição do comprimento das barras / Rotação para expansão e retração do sistema.

Fonte: elaborado pelo autor.

Uma vez que a junção intermediária esteja posicionada, é necessário utilizar de um componente *arc* para traçar um arco no plano XZ com centro nesta junção e com raio igual à maior distância entre sua posição e as extremidades da barra. Isso

possibilita encontrar uma intersecção entre o arco e a primeira linha. Esse ponto de intersecção é o início do primeiro conjunto de barras articuladas - a primeira junção articulada. Para encontrar o ponto, é necessário utilizar o componente *curve | line*, ao qual devem ser conectados o arco e a linha inicial (figura 9.17).

Utilizando o componente *vector2Pt*, é necessário criar um vetor informando a direção a qual essa primeira barra possui a partir de dois pontos dados. Estes pontos são resultantes do componente *curve | line* – ponto A – e o centro do arco – ponto B. No primeiro ponto, utilizando de um componente *line SDL* (começo, direção e comprimento), é traçada uma linha utilizando o vetor recém criado como direção e cujo comprimento seja o mesmo especificado para as barras de todo o sistema (figura 9.18). Esta linha é a primeira barra articulada que compõe o sistema, e deve ser copiada radialmente mais duas vezes ao longo de 360 graus, mantendo um ângulo interno de 120 graus entre cada barra. Estas são as três primeiras barras da estrutura de Piñero. Para realizar as cópias rotacionadas foi utilizado o componente *array polar*.

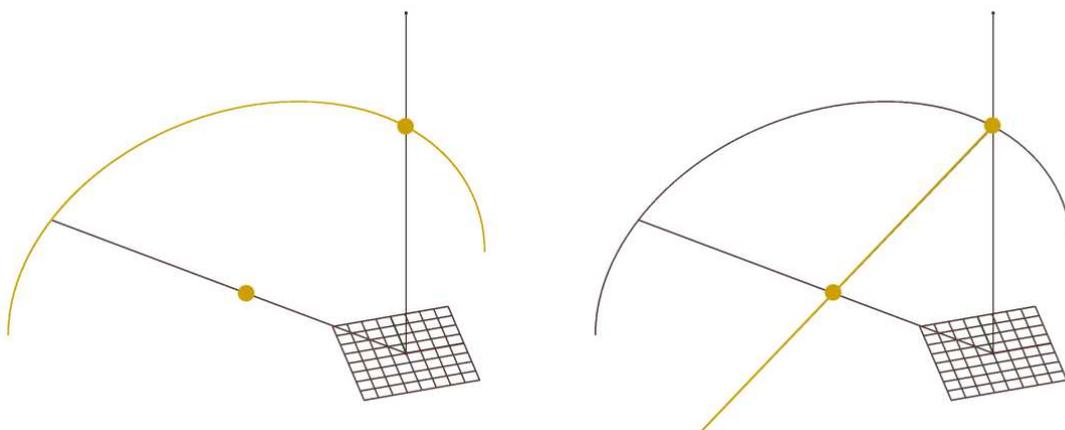


Figura 9.17 e 9.18: Intersecção do arco com a primeira linha resultando na origem da primeira barra / Primeira barra.

Fonte: elaborado pelo autor.

A segunda linha criada e o ponto no centro do arco devem ser rotacionados no plano XY em 120 graus, utilizando de um novo componente *rotate* (figura 9.19). Devem também ser extraídos os pontos iniciais e finais da segunda linha criada e da primeira barra do sistema, utilizando de componentes *end points*. Seus pontos iniciais e finais precisam ser conectados por componentes *line* a fim de criar as duas arestas do trapézio formado entre elas. Devem então ser encontrados os pontos

médios destas arestas com o componente *evaluate curve* usando do valor 0.5, ou seja, 50% de seu comprimento (figura 9.20).

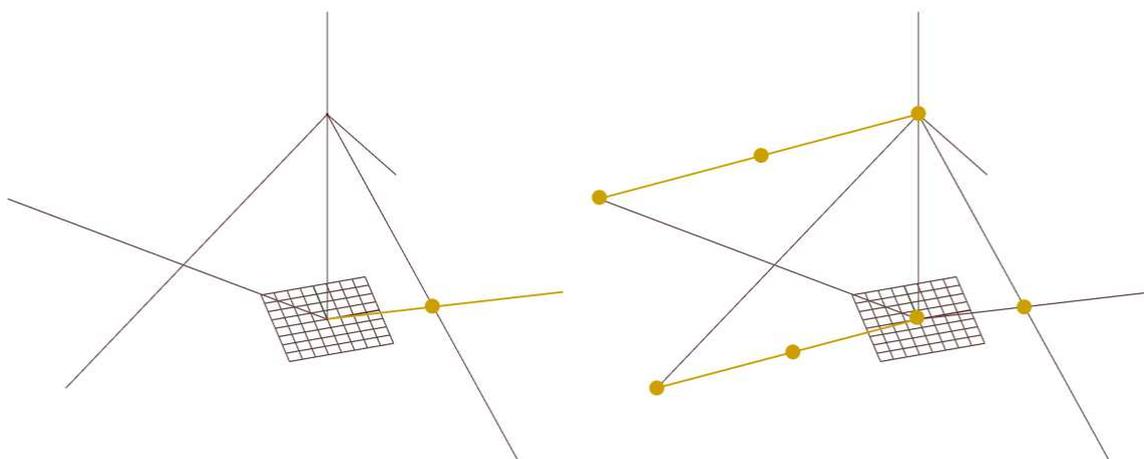


Figura 9.19 e 9.20: Rotação da segunda barra / Linhas auxiliares para criação de plano.
Fonte: elaborado pelo autor.

Estes dois pontos médios e o ponto central do arco rotacionado são necessários para criar um plano com o componente *plane 3pt*. A segunda linha criada no início do algoritmo – que foi rotacionada e deu origem ao arco – e a outra linha resultante de sua nova rotação, ambas deverão ser espelhadas utilizando do componente *mirror* através deste plano. Como resultado, a quarta e a quinta barra do sistema serão criadas (figura 9.21).

Um novo componente *array polar* – nas mesmas condições, duas cópias ao longo de 360 graus - utilizando a quarta e quinta barra do sistema, resulta na sexta, sétima, oitava e nona barra, finalizando o primeiro conjunto articulado do sistema – já operante parametricamente, permitindo expandir e retrair o sistema (figura 9.22).

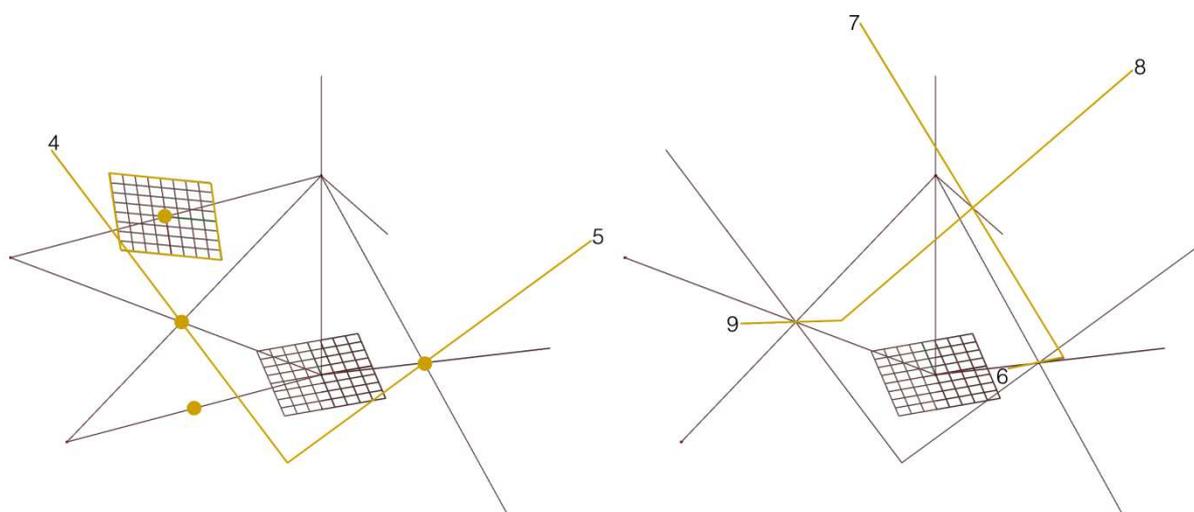


Figura 9.21 e 9.22: Criação da 4ª. e 5. barra por espelhamento / Criação da 6ª., 7ª., 8ª. e 9ª. barras.
Fonte: elaborado pelo autor.

O ponto central do arco e sua cópia rotacionada em 120 graus no plano XY devem ser utilizados como centro de duas esferas cujo raio é o mesmo: a distância entre si – componente *distance* entre os dois pontos. A intersecção entre estas duas esferas – componente *solid intersection* – cria um sólido em formato de disco cuja circunferência é utilizada para a criação da décima barra do sistema (figura 9.23). Em paralelo, o ponto inicial da quarta barra do sistema e outros dois pontos quaisquer presentes na primeira linha inicial são necessários para criar um novo plano a partir destes três pontos – componente *plane 3pt*. Sua origem é utilizada como centro de uma nova circunferência – componente *circle* – com raio equivalente a menor distância entre a junção central e as extremidades das barras. A intersecção entre este círculo e o disco resultante da intersecção das esferas – componente *brep | curve* – resulta em dois pontos de intersecção, dentre os quais o mais externo é a junção central da décima barra – a ser selecionado através do componente *list item* com índice 0. Utilizando um novo componente *vector 2pt* entre o mesmo ponto inicial da quarta barra e a junção intermediária da décima barra, é possível criá-la – componente *line SDL* - com origem neste mesmo ponto inicial, com direção resultante deste último vetor e com comprimento igual ao das demais barras (figura 9.24).

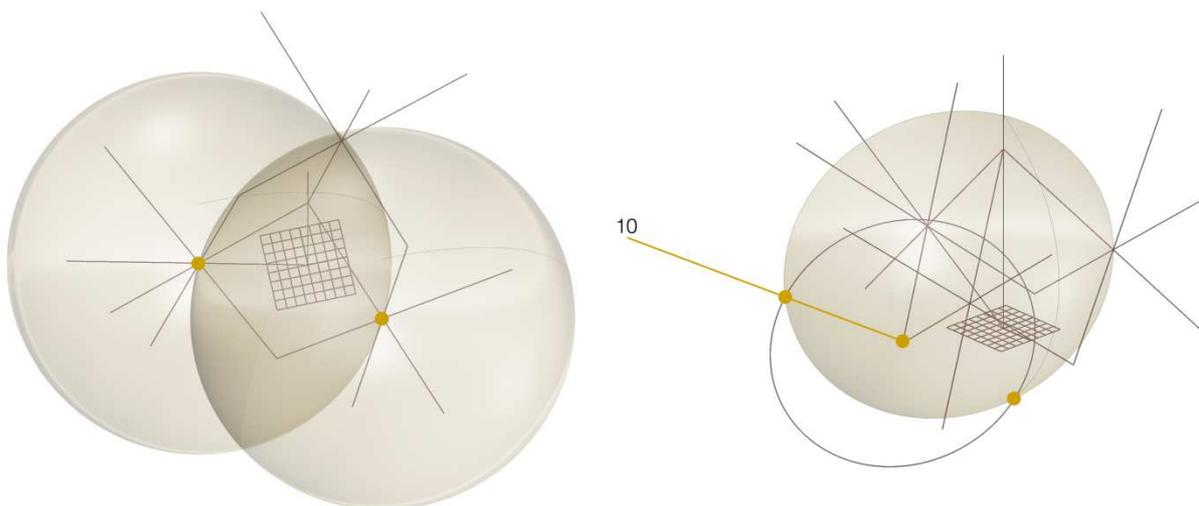


Figura 9.23 e 9.24: Disco resultante de intersecção de esferas / 10ª. barra resultando da intersecção de disco e circunferência.

Fonte: elaborado pelo autor.

A junção mediana da décima barra é utilizada também para criar a 11ª. e 12ª. barras, pois a compartilham. Para criá-las, é necessário selecionar a sexta barra do sistema – componente *list item* com índice 10 no segundo *array polar* utilizado – e

extrair seu ponto final com o componente *end points*, que é o primeiro ponto de um novo vetor e a junção mediana compartilhada é o segundo ponto. Com o componente – *line SDL* – utilizou-se o mesmo ponto final da sexta barra como origem desta 11ª. barra e com direção dada pelo último vetor, sendo o comprimento também igual ao das demais barras. Com seu espelhamento dado através do último plano criado – o mesmo do disco – resulta na 12ª. Barra (figura 9.25). Ao utilizar pela terceira vez um componente *array polar* nas mesmas condições dos anteriores, contendo o segundo conjunto articulado – 10ª., 11ª. e 12ª. barras – são produzidos o terceiro conjunto (contendo as barras 13, 14 e 15) e quarto conjunto articulado (contendo as barras 16, 17 e 18) (figura 9.26).

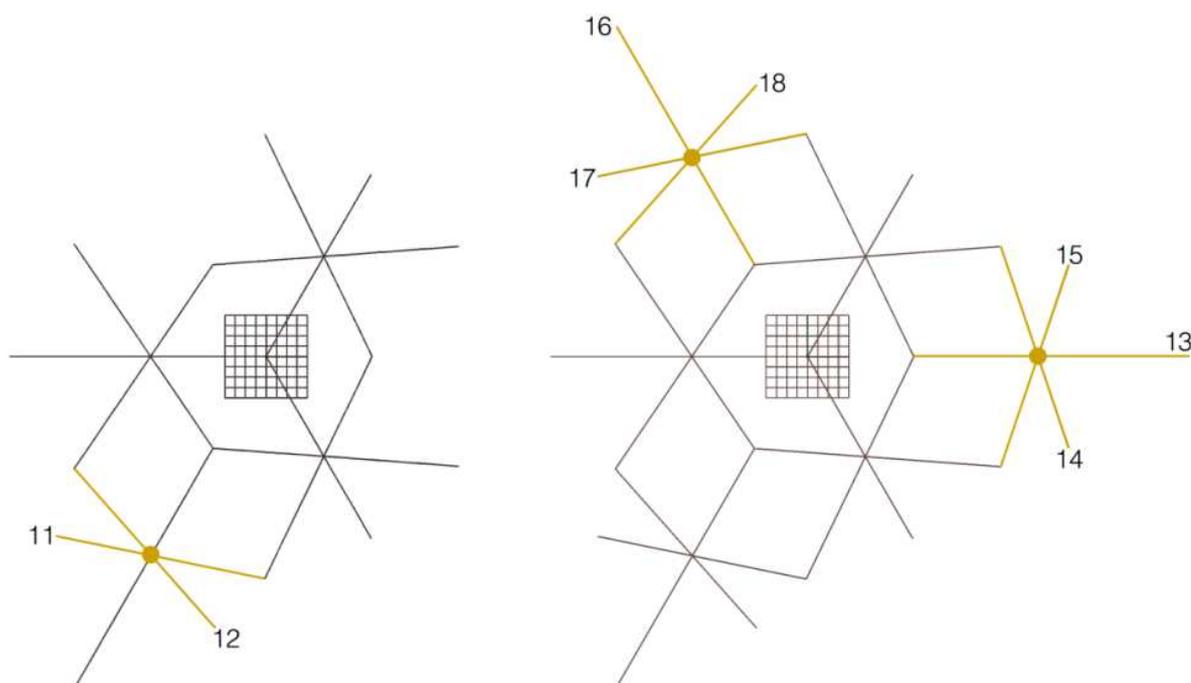


Figura 9.25 e 9.26.: Criação de 11ª. e 12ª. barras / Array polar resultando em novos conjuntos articulados.

Fonte: elaborado pelo autor.

O ponto inicial e final da segunda barra são necessários para a continuidade do algoritmo. Eles podem ser extraídos a partir do primeiro *array polar* através de um novo componente *list item* com índice 1, que isola apenas a segunda barra, seguido por um componente *end points*. Este ponto final e o ponto final da 12ª. barra dão origem a esferas (componente *sphere*) de mesmo raio: menor distância entre a junção intermediária e a extremidade das barras. Outra esfera, situada no ponto final da 9ª. barra com raio equivalente a maior distância entre a junção intermediária e a extremidade das barras, é necessária pois a intersecção desta com as duas esferas

menores resultará em duas circunferências cuja intersecção de ambas produz uma nova junção do próximo conjunto articulado.

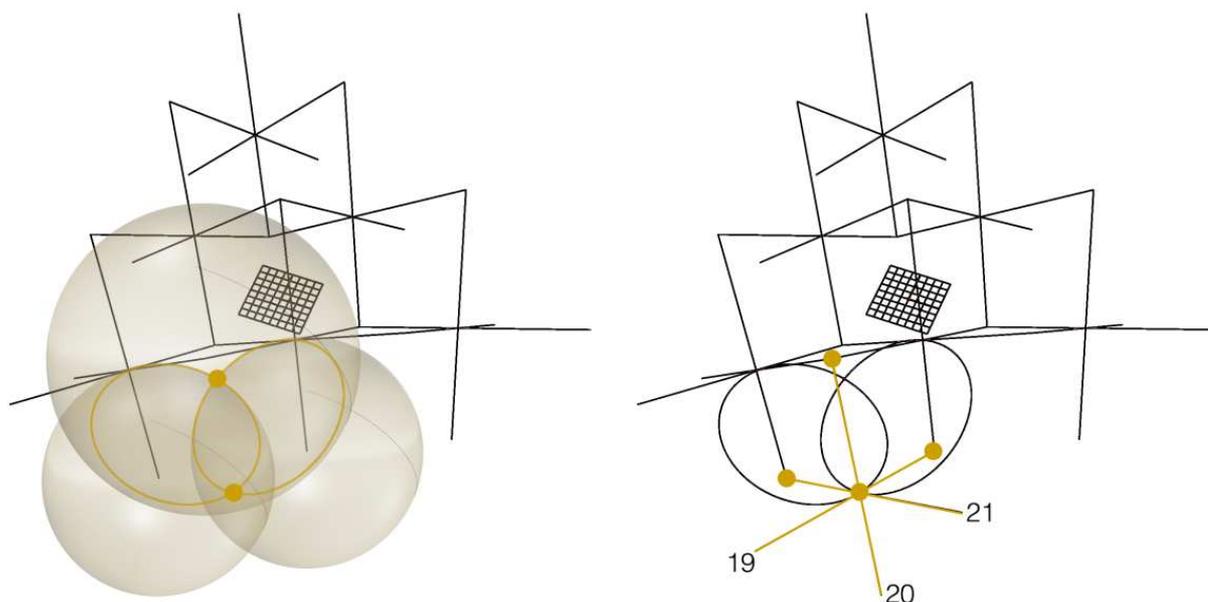


Figura 9.27 e 9.28: Intersecção de esferas resultando em círculos e junção intermediária / Criação de novo conjunto articulado.
Fonte: elaborado pelo autor.

Para a intersecção das esferas foram utilizados dois componentes *brep | brep* e, para intersecção das circunferências oriundas das esferas, o componente *curve | curve* (figura 9.27). O produto da intersecção das curvas são dois pontos onde o mais externo deles é a próxima junção intermediária articulada, que é selecionada pelo componente *list item* com índice 0. Então, os três pontos utilizados como centro das esferas são o ponto A de três componentes *vector 2pt* e a nova junção intermediária será o ponto B. Dos mesmos três pontos partem três linhas *line SDL* com direção dada por seu respectivo vetor e comprimento igual ao das demais barras, resultando nas barras 19, 20 e 21 (figura 9.28).

Estas três barras devem ser espelhadas utilizando o componente *mirror* através de um plano descrito pela 2. barra. Como resultado, as barras 22, 23 e 24 são produzidas (figura 9.29). Por último, é necessário utilizar um componente *array polar* contendo as barras 19, 20, 21, 22, 23 e 24, para produzir outras duas cópias destas seis barras ao longo de 360 graus. Finalizando o algoritmo e possibilitando verificar o funcionamento das barras articuladas de Piñero, conforme figura 9.30.

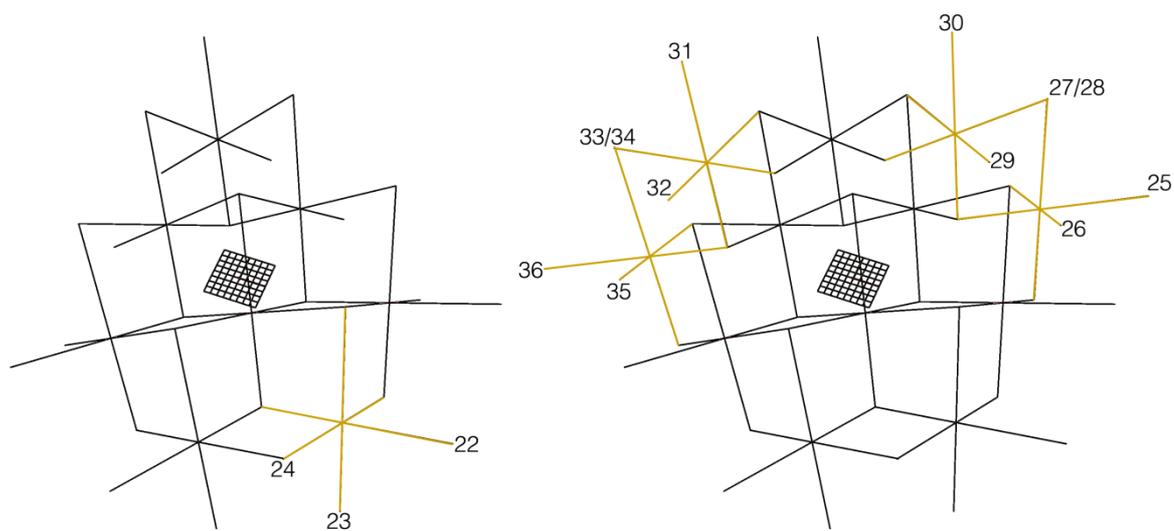


Figura 9.29 e 9.30: Criação de conjunto articulado por espelhamento / Criação de 4 conjuntos articulados pelo componente *array polar*.
Fonte: elaborado pelo autor.