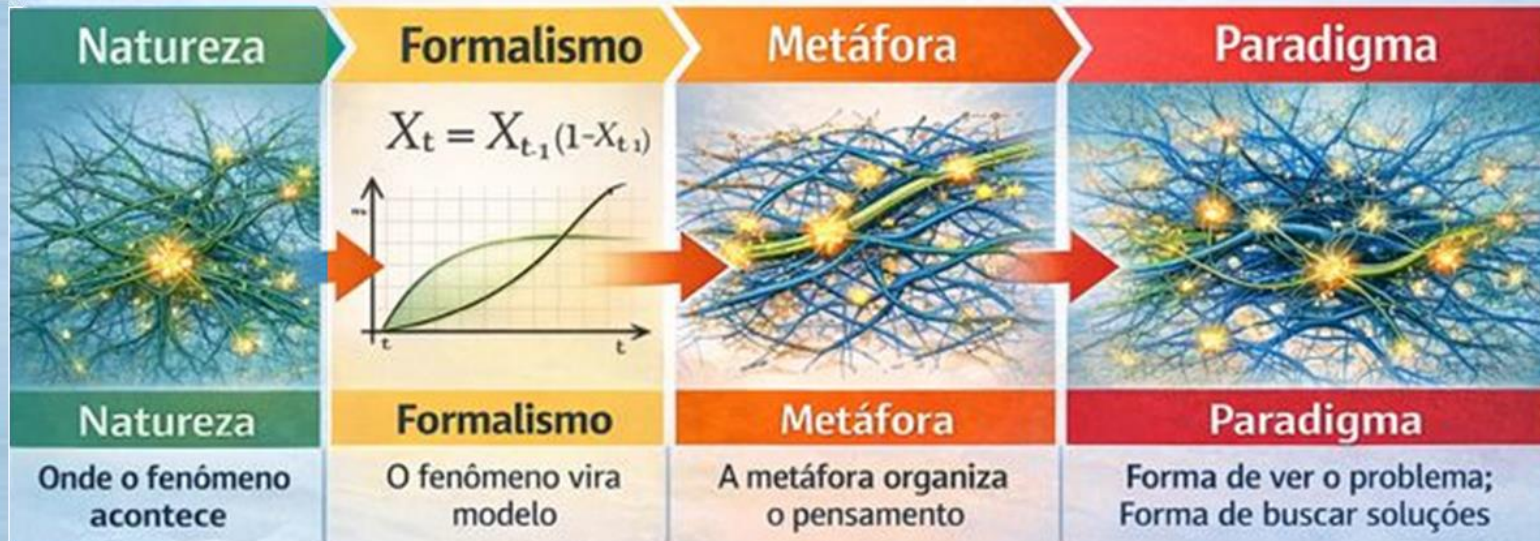




Da Parte ao Sistema: quando a Função Emerge da Organização.
A Pesquisa em Polilaminina na Ótica da Biomimética e Pensamento
Sistêmico

Da Natureza ao Paradigma

como enxergamos o mesmo fenômeno



Aplicação ao problema da regeneração neural

- O erro **histórico** foi focar no neurônio
- O gargalo real estava na **organização do ambiente**
- A inovação surge quando **mudamos o nível de análise**

➡ O fenômeno não muda ➡ Muda a forma de enxergá-lo

Adatado de Gareth Morgan. Paradigms, Metaphors, and Puzzle Solving in Organization Theory, *Administrative Science Quarterly*, Vol. 25, No. 4 (Dec., 1980), pp. 605-622

Biomimética e Teoria de Sistemas

A biomimética aplica, na prática, os princípios da teoria de sistemas tal como observados na natureza.

Biomimética

- Natureza como **modelo de sistemas funcionais**
- Não força partes → **restaura condições**
- Trabalha com **forma, relações e feedback**
- Permite **auto-organização**.

Teoria de Sistemas

- O todo \neq soma das partes
- Função emerge da **organização**
- Interações > componentes isolados
- Propriedades são **emergentes**

Ponte conceitual do trabalho da equipe de Tatiana Sampaio (UFRJ)

A função não está no elemento

Está na **estrutura do sistema**

Mudando a organização → muda o comportamento

Pequenas mudanças estruturais → grandes efeitos

INFORMAÇÃO E SAÚDE DIGITAL

1. Biomimética

- É uma abordagem científica e tecnológica que estuda como a natureza resolve problemas funcionais complexos e traduz esses princípios para soluções humanas, respeitando a lógica de organização, eficiência, adaptação e resiliência dos sistemas naturais.

Pontos-chave que **definem** Biomimética:



- não é copiar a forma da natureza
- não é imitar aparência
- não é metáfora inspiracional



- é compreender **princípios funcionais**
- é compreender **organização estrutural**
- é compreender **dinâmica de sistemas**
- é aplicar isso em outro contexto

Em termos clássicos (Janine Benyus / pensamento sistêmico):



Natureza como modelo, medida e mentora

— não como estoque de peças.



10 Padrões unificados sobre a natureza:

1. Ela usa apenas a **energia de que precisa** e depende da energia disponível gratuitamente.
2. Ela **recicla** todos os materiais.
3. Ela é **resiliente** a perturbações.
4. Ela **tende a otimizar** em vez de maximizar.
5. Ela oferece **benefícios mútuos**.
6. Ela funciona com base na **informação**.
7. Ela usa **química e materiais que são seguros** para os seres vivos.
8. Ela **constrói usando recursos abundantes, incorporando recursos raros apenas com moderação**.
9. Ela é **localmente sintonizada e responsiva**.
10. Ela usa a **forma para determinar a funcionalidade**.

Compreensão da Biomimética

- **O que a Biomimética NÃO faz**
 - não pergunta “*o que posso adicionar?*”
 - não pergunta “*o que posso estimular?*”
 - não pergunta “*como forçar o sistema?*”
- **Ela pergunta:**
 - “em que condições isso já funciona na natureza?”
 - “o que foi perdido quando parou de funcionar?”

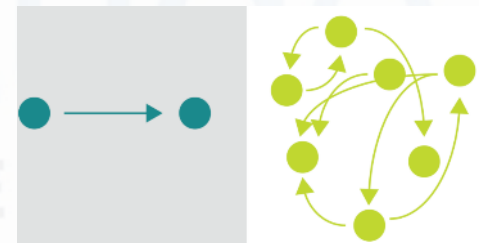
Exemplo (polilaminina)

- **Problema:** neurônio isolado \neq regeneração
- **Gargalo:** matriz extracelular desorganizada
- **Solução biomimética:** restaurar a arquitetura
- **Resultado sistêmico:** regeneração emerge

2. Pensamento Sistêmico

Pensamento sistêmico é a abordagem que busca compreender fenômenos a partir das relações, estruturas e padrões de organização do todo, e não apenas pelo comportamento isolado de suas partes.

- Pensamento sistêmico é uma forma de pensar que parte do princípio de que o comportamento de um sistema emerge das interações entre seus componentes, e não das propriedades individuais desses componentes isoladamente.
- Ele desloca o foco dos eventos pontuais para as estruturas subjacentes, dos objetos para as relações, e da causalidade linear para dinâmicas não lineares, retroalimentadas e dependentes do contexto.



(cont)

- Em sistemas complexos — biológicos, sociais, organizacionais ou tecnológicos — **o todo não é redutível à soma das partes, pois novas propriedades surgem apenas no nível do sistema.**
- Essas propriedades emergentes não podem ser previstas completamente a partir do estudo isolado de cada elemento, mas tornam-se compreensíveis quando se analisam padrões, ciclos, fluxos de informação e mecanismos de feedback ao longo do tempo.

✗ O que o pensamento sistêmico NÃO é (importantíssimo)

- não é “pensar grande”
- não é holismo ingênuo
- não é rejeição do método analítico
- não é falta de rigor

O que é: inicia na análise, mas não para nela.

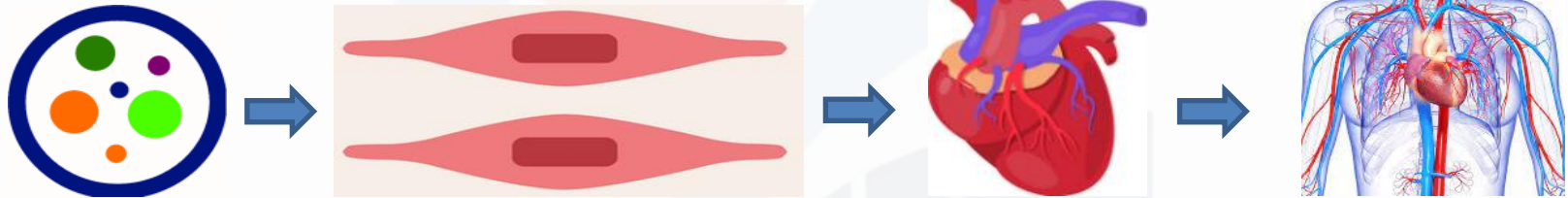
INFORMAÇÃO E SAÚDE DIGITAL

Os pilares do pensamento sistêmico

- **Contexto antes da parte:** nenhum elemento faz sentido fora do sistema ao qual pertence.
- **Relações antes de objetos:** importa mais como os elementos interagem do que quem eles são.
- **Estrutura antes de evento:** eventos são sintomas; estruturas geram padrões.
- **Feedback e não linearidade:** causa e efeito raramente são proporcionais ou imediatos.
- **Emergência:** certas funções só existem no nível do sistema.
- **Tempo e adaptação:** sistemas mudam, aprendem e se reorganizam.

INFORMAÇÃO E SAÚDE DIGITAL

Sistemas na natureza: da simplicidade à complexidade



- A partir de uma célula, seguindo princípios de organização, emerge um ser extremamente complexo como o ser humano, **não por simples soma de partes, e sim por organização, interação e emergência.**
- O ser humano emerge quando aparecem:
 - Interações;
 - estruturas;
 - fluxos de informação;
 - mecanismos de feedback;
 - tempo.

A complexidade não vem do tamanho, vem da organização.

Conceito resumo

O pensamento sistêmico mostra que a complexidade biológica surge quando unidades simples interagem sob princípios de organização que permitem o aparecimento de propriedades emergentes em níveis superiores.

Célula

↓ (interações)

Tecidos

↓ (organização)

Órgãos

↓ (integração funcional)

Sistemas

↓ (emergência)

Ser humano

Emergência: A consciência não está na célula

Não linearidade: Pequenas mudanças → grandes efeitos

Relações acima das partes: Importa mais como se conectam do que o que são

Contexto: Uma célula isolada ≠ célula em um organismo

O problema que a polilaminina resolve

- No desenvolvimento embrionário:
 - A célula não “sabe” que vai formar um ser humano.
 - O resultado emerge porque o ambiente é organizado.
- Na lesão medular.
 - O neurônio não “sabe” que deve regenerar
 - o crescimento emerge quando o ambiente correto é restaurado.

A polilaminina faz exatamente isso: ela restaura a organização da matriz extracelular, permitindo que o crescimento axonal emergja, sem ser forçado.

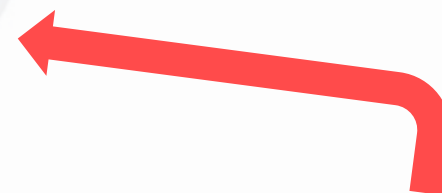
Lembrete I: Os sistemas nascem a partir da energia organizada do trabalho mecânico.

Calor

- Energia desorganizada

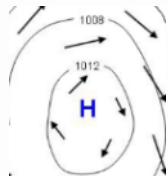
Trabalho Mecânico

- Energia organizada



Função

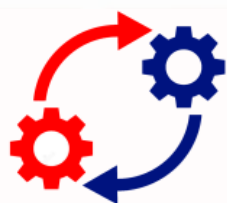
$$\nabla \left(\frac{\partial p}{\partial X}; \frac{\partial p}{\partial y}; \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)$$



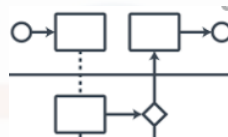
Building forms



Interação
Perturbações



Tempo



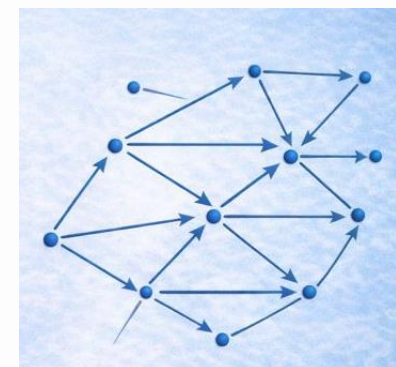
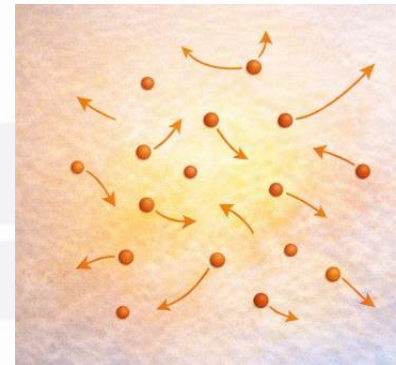
Adaptação



Feedback Continuidade

(cont.) Energia, Organização e Função

- **Energia desorganizada (calor)**
 - Movimento aleatório
 - Alta entropia
 - Não cria forma
 - Não sustenta função
- **Energia organizada (trabalho mecânico)**
 - Movimento direcionado
 - Baixa entropia local
 - Cria forma
 - Permite função emergente



Sistemas vivos existem onde a energia é organizada em forma.

Lembrete II: Rizoma (filosofia)

Sistemas vivos funcionam por **conexões**, não por controle central.

1. Conexões

- Qualquer ponto pode se ligar a outro
- A função nasce da rede, não do elemento

2. Multiplicidade

- Não há centro nem hierarquia fixa
- O comportamento emerge das interações

3. Ruptura regenerativa

- Ao ser rompido, o sistema pode se reorganizar
- Crescimento pode seguir novas linhas



- Tradução para sistemas biológicos
 - Neurônios não funcionam isolados.
 - Conectividade > estímulo.
 - Organização do ambiente define o comportamento.
 - Regeneração é emergente, não comandada.

Ponte com a biomimética (polilaminina)

- **Lesão medular** = quebra da rede
- **Gargalo** = perda de continuidade estrutural

Polilaminina restaura conexões do sistema
A regeneração emerge, não é forçada.

3. O trabalho da equipe de Tatiana Sampaio.

- A polilaminina resolve um gargalo biológico que é, ao mesmo tempo, um gargalo paradigmático, pois desloca o problema do nível do elemento para o nível da organização do sistema, caracterizando uma mudança de paradigma no “sentido kuhniano”, análoga à transição do fenômeno observado para novas metáforas explicativas que redefinem o formalismo dominante (KUHN, 1970; MORGAN, 1980)*.
- O que está em jogo não é apenas uma inovação terapêutica, mas uma mudança de nível de descrição do problema: sai o foco exclusivo no elemento (neurônio) e entra o foco na organização do sistema.
- Historicamente, a neuroregeneração operou dentro de um paradigma funcionalista e analítico, no qual o neurônio era tratado como unidade causal principal.
- Se o axônio não cresce, tenta-se estimulá-lo; se há bloqueio, tenta-se remover moléculas inibitórias; se há perda, adicionam-se células ou fatores externos. Esse modo de pensar é coerente com um paradigma que privilegia ferramentas, intervenções locais e causalidade direta, como descrito ao início, ao diferenciar formalismo e generalização de metáforas sistêmicas.

- O problema é que a regeneração axonal não é um fenômeno local, mas um fenômeno emergente, típico de sistemas complexos. O crescimento de um axônio não depende apenas de sua maquinaria interna, mas da estrutura do campo extracelular no qual ele está imerso. Isso conecta diretamente com o conceito de sistemas complexos: elementos interdependentes, comportamento não linear, auto-organização e emergência de propriedades que não existem no nível das partes
- A matriz extracelular, e em especial a laminina, é precisamente um desses elementos organizadores do sistema. No desenvolvimento embrionário, a laminina não atua como “sinal isolado”, mas como forma estruturante que determina funcionalidade: “a natureza usa a forma para determinar a funcionalidade”. O axônio cresce porque a forma da matriz permite, orienta e sustenta esse crescimento. Não há comando central; há auto-organização guiada por estrutura.

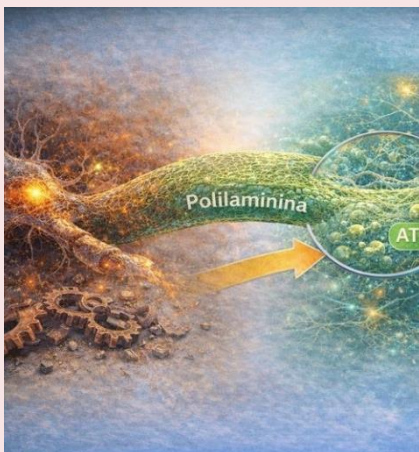
*

KUHN, Thomas S. [A estrutura das revoluções científicas](#). 2. ed. São Paulo: Perspectiva, 1970.

Gareth Morgan (ponte com metáforas e paradigmas): MORGAN, Gareth. [Paradigms, metaphors, and puzzle solving in organization theory](#). Administrative Science Quarterly, v. 25, n. 4, p. 605–622, 1980.

- Quando ocorre uma lesão medular, o que se perde não é apenas tecido neural, mas o estado organizacional do sistema. Surge uma cavidade líquida, uma cicatriz desorganizada e uma quebra de continuidade informacional. Sob a ótica do pensamento sistêmico, isso equivale a destruir os ciclos de feedback e continuidade que sustentavam o comportamento emergente do sistema nervoso. Não é surpresa, portanto, que intervenções focadas apenas nos neurônios falhem: o sistema perdeu seu “mapa”, no *sentido rizomático*.
- É nesse ponto que a polilaminina representa uma virada paradigmática clara. Ao acidificar a laminina e permitir sua repolimerização em uma rede estável, recria-se uma forma funcional que restabelece continuidade, orientação e informação no sistema. Isso é biomimetismo no sentido descrito: não copiar a aparência da natureza, mas operar segundo seus princípios organizacionais — economia de energia, uso de materiais seguros, adaptação local e construção de resiliência.

- Do ponto de vista da física e da eficiência, a polilaminina transforma um estado de energia desorganizada (calor, entropia alta, cavidade líquida) em energia organizada; isto é, o trabalho mecânico biologicamente útil é responsável pelo crescimento axonal direcionado.
- A polilaminina maximiza estímulos e otimizando as condições, tal qual a natureza tende a fazer.
- Além disso, a polilaminina atua como um suporte para emergência em escala. O crescimento de axônios individuais, guiados por regras simples (adesão, orientação, continuidade), resulta em um comportamento coletivo complexo: reconexão funcional. Nenhum axônio “sabe” o objetivo final; o resultado surge do sistema como um todo, em consonância com o conceito de emergência.
- Por fim, lembrando a metáfora do rizoma, a polilaminina não impõe um trajeto rígido; ela cria um campo de possibilidades conectivas no qual múltiplos caminhos podem emergir. Se houver ruptura, o sistema pode se reorganizar ao longo de novas linhas, preservando a capacidade de adaptação — como descrito nos princípios rizomáticos de conexão, multiplicidade e ruptura significativa.



A polilaminina resolve, no nível biológico, o mesmo problema que o pensamento sistêmico e a biomimética resolvem no nível epistemológico: ela troca o foco paradigmático na parte por um baseado na restauração da organização do todo, permitindo que propriedades emergentes — como a regeneração — voltem a existir.

Regenerar não é consertar peças, é restaurar o mapa de conexões do sistema.

Biomimetismo & Polilaminina

Esperança na Regeneração da Medula Espinhal

Desenvolvimento Embrionário



Ambiente Favorável

- Laminina estruturada
- Axônios crescem guiados

Lesão Medular



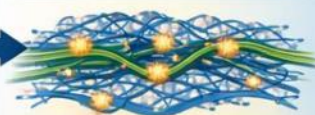
Cicatriz Hostil

- Matriz Desorganizada
- Bloqueio ao Crescimento

A Solução: Polilaminina

Laminina Acidificada

- Repolimerização
- Andaime Biomimético



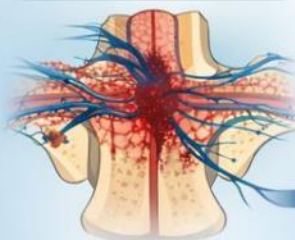
Preenche - Guia - Conecta

Sem Regeneração

Como Funciona?

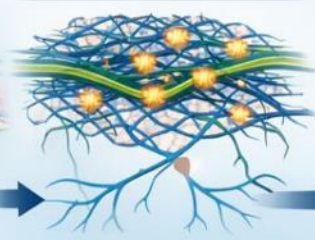
Andaime Biomimético

Imita o Ambiente Embrionário



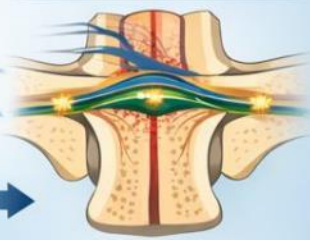
Axônios Atravessam

Crescem pela Cicatriz



Sinal Passa

Reconexão Nervosa



Restaurando o Caminho para os Neurônios Crescerem

Sem Forçar, Sem Fantasia

Referências Básicas:

Sampaio, Tatiana et al. Safety and preliminary efficacy of intramedullary polylaminin injection in acute spinal cord injury: a first-in-human study. medRxiv, 2024. Preprint. DOI: 10.1101/2024.02.19.24301010. Disponível em: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2024.02.19.24301010v1>

Sampaio, Tatiana. Polilaminina e regeneração da medula espinhal. Palestra científica.

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=quYIC-uBsn0>

Hynes, Richard O. The extracellular matrix: not just pretty fibrils. Science, v. 326, n. 5957, p. 1216–1219, 2009.

Yamada, Kenneth M.; Sekiguchi, Kiyotoshi. Molecular basis of laminin–integrin interactions. Current Opinion in Cell Biology, v. 12, n. 5, p. 558–564, 2000.

Tessier-Lavigne, Marc; Goodman, Corey S. The molecular biology of axon guidance. Science, v. 274, n. 5290, p. 1123–1133, 1996.







PET-Sa

INFORMAÇÃO E SAÚDE D

