

Análise Topológica e Resiliência na Cadeia de Suprimentos Automotiva

Uma Abordagem via Teoria dos Grafos

Caio, Eduardo, Felipe, Luiz, Matheus (Grupo Esperança)

Universidade Federal de São Paulo

15 de dezembro de 2025

Agenda

1 Introdução e Contexto

2 Metodologia

3 Análise da Topologia

4 Vulnerabilidade e Riscos

5 Aplicações Práticas

6 Conclusão

Contexto da Indústria Automotiva

Nas últimas duas décadas, o setor passou por uma transformação radical visando redução de custos. **Engenharia**

de Plataformas:

- Abandono do projeto de "unidades isoladas".
- Adoção de "kits de construção" modulares.
- **Exemplos:** VW (MQB), Toyota (TNGA), Stellantis (CMP).
- Compartilhamento massivo entre marcas do mesmo conglomerado.

O Problema da Centralização

Embora eficiente, cria interdependências invisíveis. Uma falha trivial (ex: microchip) paralisa múltiplas marcas simultaneamente.

Objetivos do Trabalho

Buscamos "desvendar" a teia de conexões respondendo a 5 perguntas chave:

- ① **Topologia:** Qual a estrutura real das alianças industriais?
- ② **Vulnerabilidade:** Onde estão os pontos únicos de falha (*Single Points of Failure*)?
- ③ **Resiliência:** Quão robusta é a malha frente a colapsos?
- ④ **Segmentação:** O compartilhamento respeita a divisão Premium vs Economy?
- ⑤ **Otimização:** É possível prever demandas futuras via rede?

Grafo Bipartido $G = (U, V, E)$

Modelamos o sistema com dois conjuntos disjuntos:

- $U = \{u_1, \dots, u_n\}$: Conjunto de **36 Veículos**.
- $V = \{v_1, \dots, v_m\}$: Conjunto de **48 Peças/Sistemas**.

Aresta (u_i, v_j) existe se o veículo utiliza a peça.

Projeção Unimodal: Realizamos uma projeção onde w_{xy} (peso) representa o número de peças compartilhadas entre dois carros.

Visualização da Rede Bipartida

Rede Bipartida Veículo-Peça

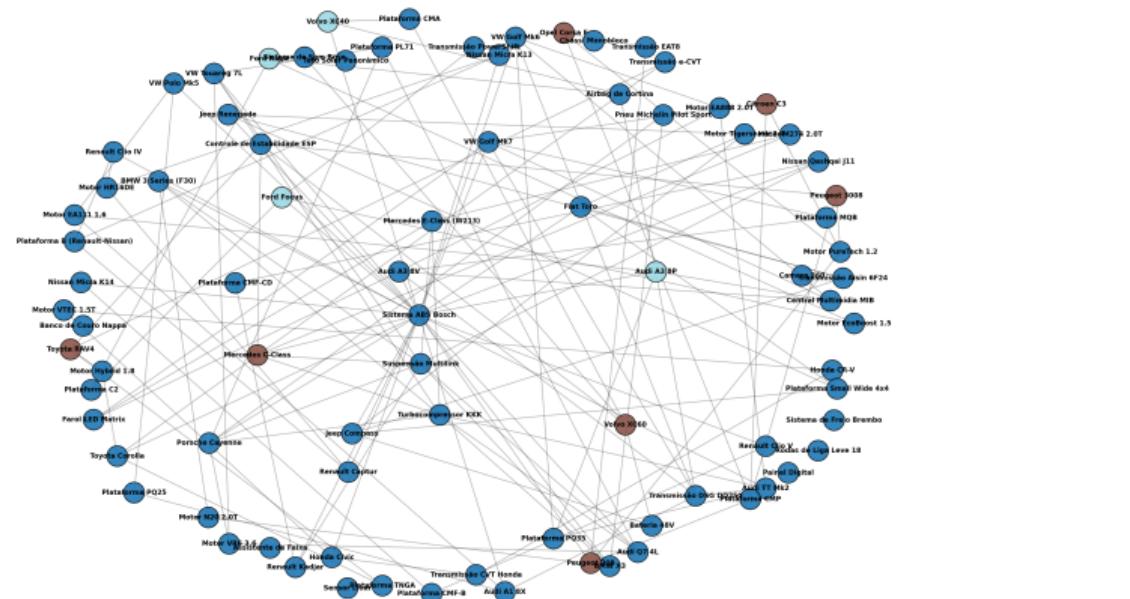


Figura: Alta densidade de conexões convergindo para nós centrais (hubs).

Detecção de Comunidades (Modularidade)

Utilizando *Greedy Modularity Maximization*, detectamos 3 comunidades que refletem as alianças globais:

- **Família 1:** VW Group (VW, Audi, Porsche).
 - **Família 2:** Renault-Nissan + Stellantis.
 - **Família 3:** BMW, Mercedes, Toyota, Honda, Ford, Volvo.

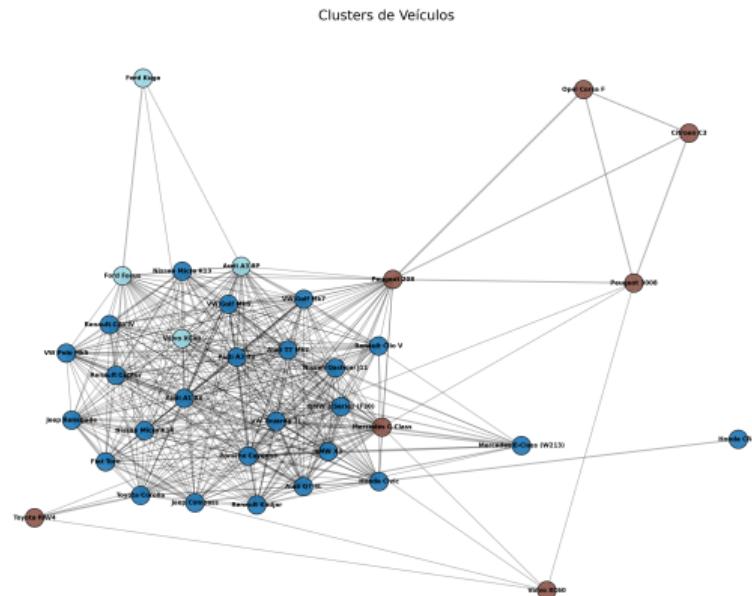


Figura: Clusters Estratégicos Detectados.

Assortatividade e Mistura de Segmentos

Coeficiente de Assortatividade ($r \approx -0.008$):

- Valor próximo de zero indica **Homogeneização Tecnológica**.
- A matriz de mistura mostra distribuição equilibrada.
- Carros *Premium* e *Economy* compartilham a mesma "alma mecânica".

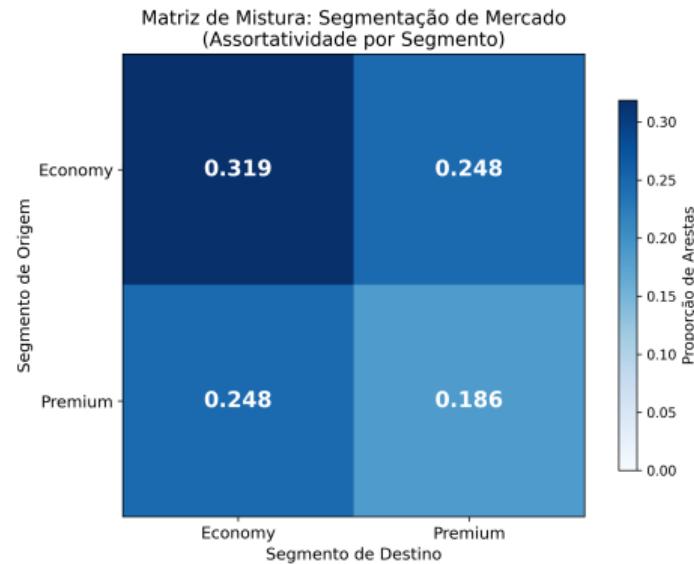


Figura: Matriz de Mistura (Mixing Matrix).

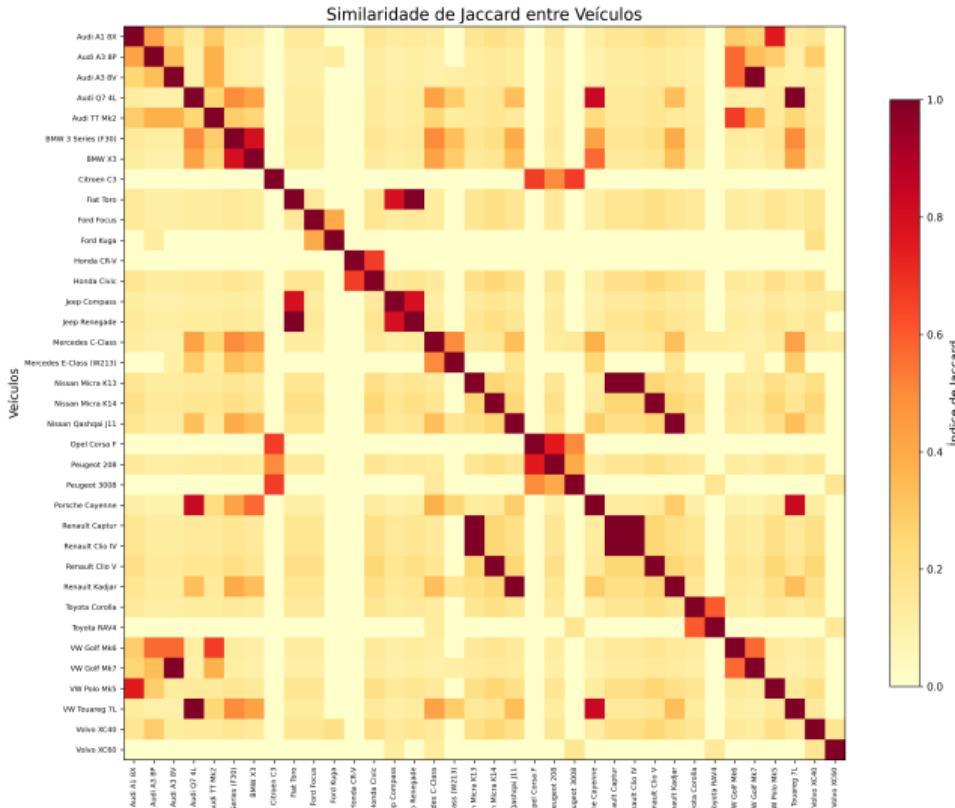
Similaridade de Jaccard

Índice de Jaccard:

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

O Heatmap revela "gêmeos de plataforma":

- Blocos diagonais confirmam os clusters.
- Identifica veículos com base tecnológica idêntica.



Distribuição de Graus (Lei de Potência)

A rede exibe comportamento *Scale-Free*.

- Linearidade no gráfico log-log.
- Poucos nós possuem conexões desproporcionais.
- Estrutura típica de sistemas vulneráveis a ataques direcionados.

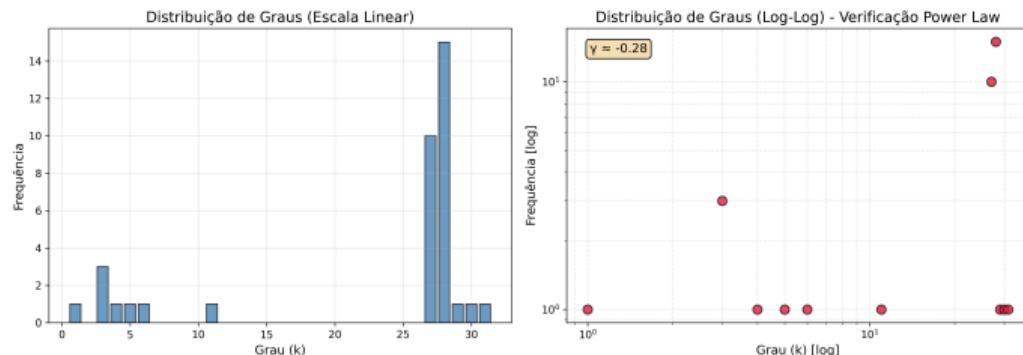


Figura: Distribuição de Graus.

Identificação de Hubs (Infraestrutura Crítica)

Poucos nós (Hubs) concentram o risco sistêmico.

Rank	Componente (Hub)	Grau	Eigen	Betweenness
1	Sistema ABS Bosch	28	0.350	0.485
2	Suspensão Multilink	9	0.285	0.112
3	Turbocompressor KKK	8	0.245	0.098
4	Transmissão DSG DQ250	6	0.198	0.067
5	Motor EA888 2.0T	4	0.165	0.045

Tabela: Top 5 Componentes Críticos

Comparação Multicritério de Centralidade

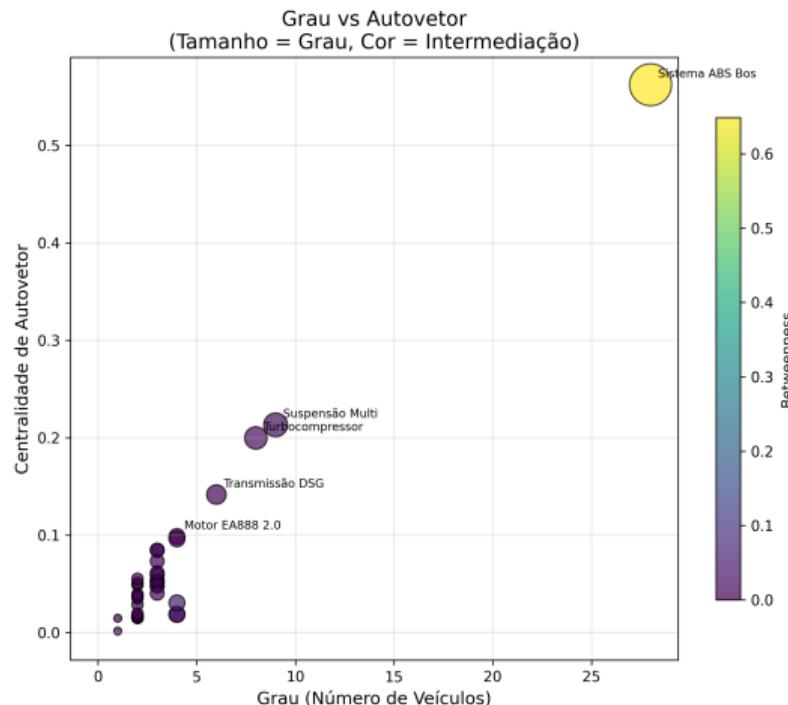
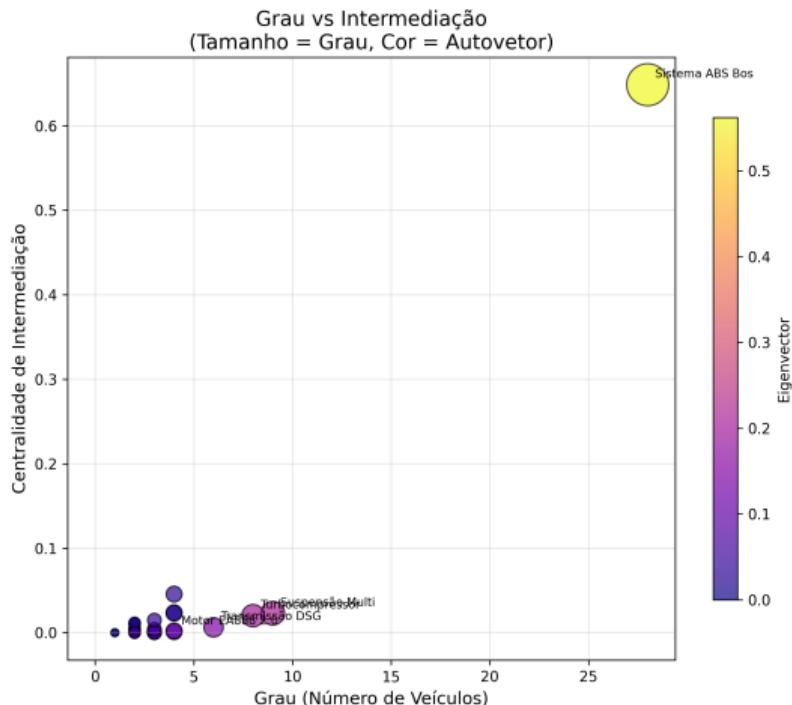


Figura: Comparação: Grau vs Intermediação e Grau vs Autovetor. O ABS Bosch destaca-se em todas as dimensões.

Visualização dos Hubs

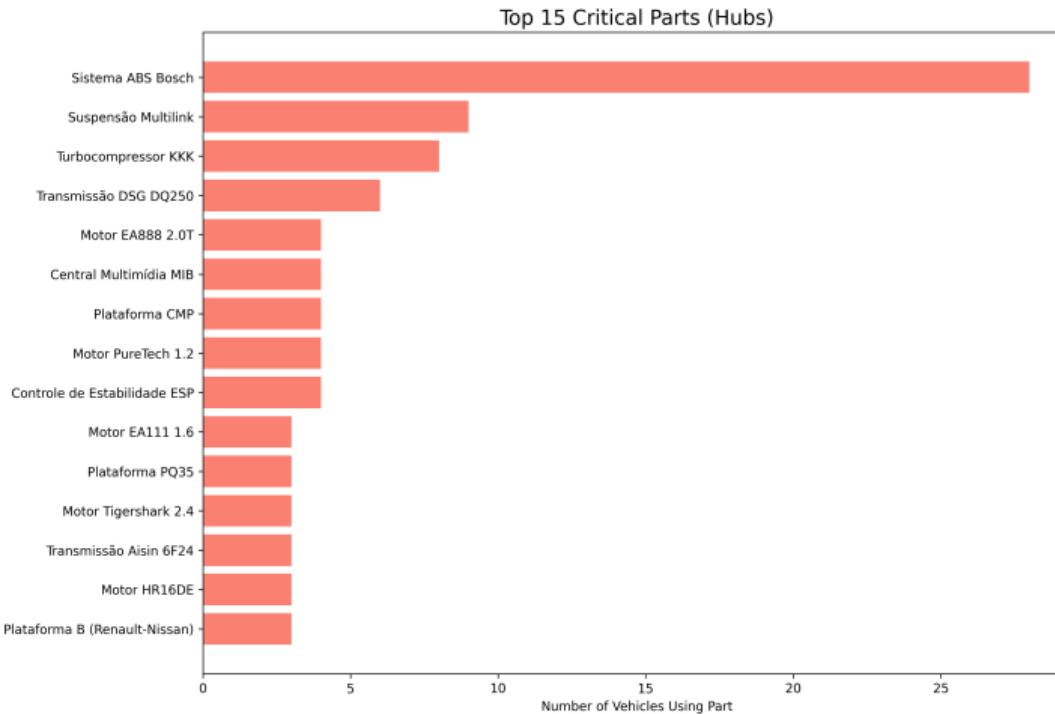


Figura: Disparidade de conectividade: O "Sistema ABS Bosch" como Super-Hub.

Decomposição K-Core: O Núcleo Estável

A análise revelou um núcleo máximo com $k_{max} = 27$. Os veículos neste núcleo formam

a espinha dorsal do mercado, compartilhando peças com pelo menos outros 27 modelos. Isso demonstra a profundidade da interconexão da indústria.



Figura: Camadas da Rede (K-Shells).

Simulação de Colapso em Cascata (Stress Test)

Simulamos a falha sequencial dos 5 maiores hubs.

Resultado Crítico

A rede sofre uma **transição de fase abrupta**. A perda de apenas 1 hub fragmenta a rede massivamente (perda de 19%).

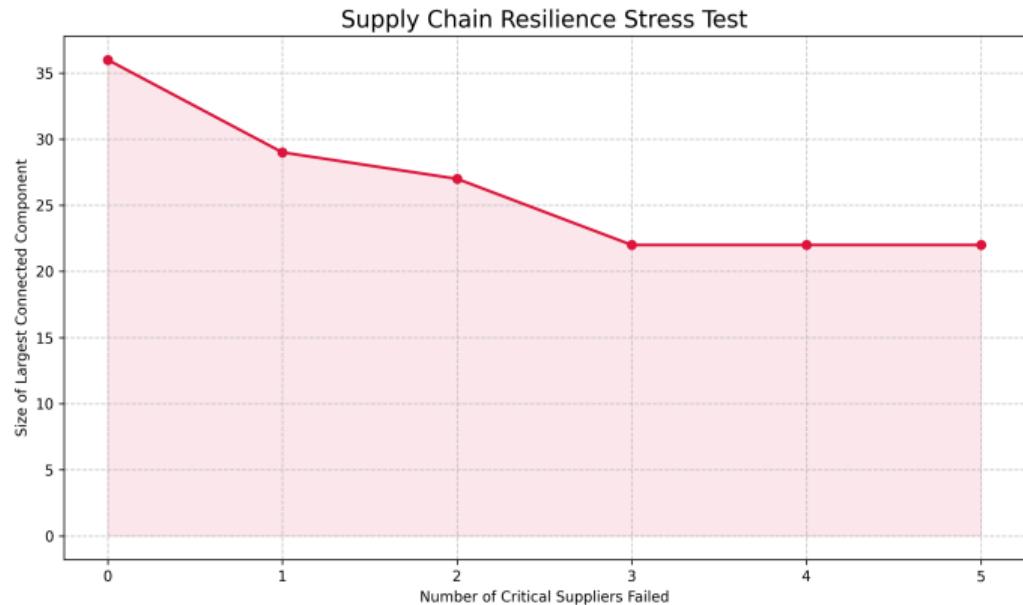


Figura: Curva de degradação da rede.

Backbone da Indústria (MST)

Backbone (MST) (Blue=Cars, Orange=Parts)

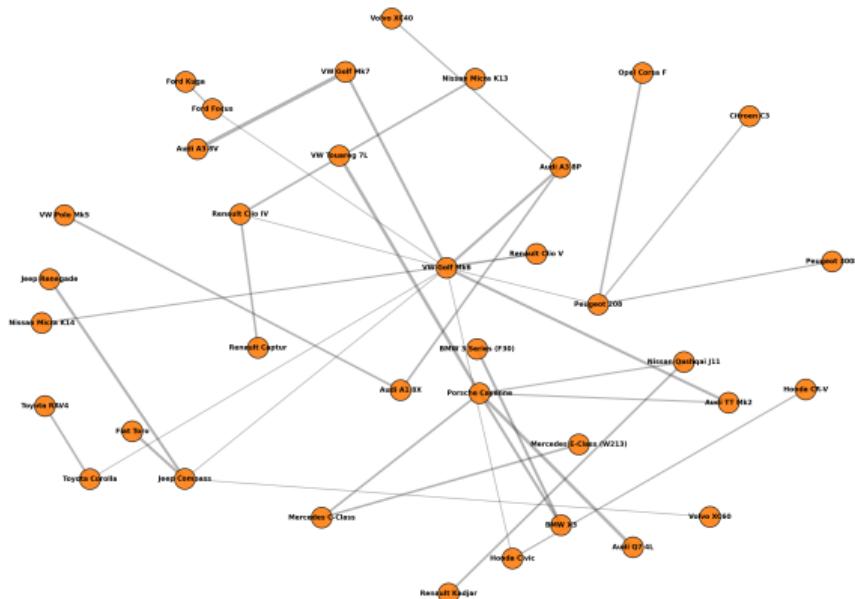


Figura: Árvore Geradora Máxima: A infraestrutura mínima conectada.

Quantificamos a motivação econômica da estratégia de plataformas:

Redução de Complexidade:
65.7%

Demanda agregada de 140 partes reduzida para um inventário real de 48 peças únicas.

Conclusões e Limitações

Conclusão Principal

Topologia otimizada para **Eficiência**, mas estruturalmente **Frágil**.

- **Mundo Pequeno:** Facilita difusão de falhas.
- **Risco Sistêmico:** Dependência extrema de Super-Hubs (ex: ABS Bosch).
- **Colapso:** Falha de 1 componente pode paralisar 77% da frota.

Limitações:

- Dataset pequeno (36 veículos) e estático.
- Pesos uniformes nas arestas.

Código - Menu

```
o (venv) → vehicle parts git:(main) ✘ python -c "from src.main import main; main()"  
Loading data and building graphs...  
=====  
Vehicle Graph Theory Analysis System (Advanced)  
=====  
Data Loaded: 36 Cars, 48 Parts  
-----  
1. [Basic] Show Bipartite Graph Info  
2. [Basic] Show Projected Graph Info  
3. [Basic] Analyze Degrees (Max/Min)  
4. [Basic] Minimum Spanning Tree (Max Sharing)  
5. [Advanced] Detect Communities (Car Families)  
6. [Advanced] Identify Hubs (Critical Parts)  
7. [Advanced] Resilience Test (Simulate Failure)  
8. [Reporting] Generate Full Report for Article  
9. [Visuals] Generate All Visualizations  
11. [Extra] Advanced Topology Metrics (New)  
10. Exit  
=====  
Enter choice (1-10): █
```

Figura: Menu interativo construído durante a disciplina.

Arquivos de Dados I

```
) cat src/data.py
"""
Dataset for Vehicle Parts Analysis.
"""

# 24 Veículos
V_CARROS = [
    "VW Golf Mk6", "Audi A3 8P", "Porsche Cayenne", "Renault Clio IV",
    "Nissan Micra K13", "VW Polo Mk5", "Audi TT Mk2", "Jeep Compass",
    "Fiat Toro", "Renault Captur", "BMW X3", "Mercedes C-Class",
    "VW Golf MK7", "Audi A3 8V", "Audi A1 8X", "Audi Q7 4L",
    "VW Touareg 7L", "Nissan Qashqai J11", "Renault Kadjar", "Renault Clio V",
    "Nissan Micra K14", "Jeep Renegade", "BMW 3 Series (F30)", "Mercedes E-Class (W213)",
    "Peugeot 208", "Peugeot 3008", "Citroen C3", "Opel Corsa F",
    "Toyota Corolla", "Toyota RAV4", "Honda Civic", "Honda CR-V",
    "Ford Focus", "Ford Kuga", "Volvo XC40", "Volvo XC60"
]

# 22 Peças
V_PECAS = [
    "Motor EA111 1.6", "Motor EA888 2.0T", "Transmissão DSG DQ250", "Plataforma PQ35",
    "Plataforma MQB", "Plataforma CMF-B", "Suspensão Multilink", "Motor Tigershark 2.4",
    "Transmissão Aisin 6F24", "Motor HR16DE", "Sistema ABS Bosch", "Central Multimídia MIB",
    "Turbocompressor KKK", "Plataforma PQ25", "Plataforma B (Renault-Nissan)", "Plataforma CMF-CD",
    "Plataforma Small Wide 4x4", "Plataforma PL71", "Motor VR6 3.6", "Motor N20 2.0T", "Motor M274 2.0T", "Chassi Monobloco",
    "Plataforma CMP", "Motor PureTech 1.2", "Transmissão EAT8", "Plataforma TNGA",
    "Motor Hybrid 1.8", "Transmissão e-CVT", "Motor VTEC 1.5T", "Transmissão CVT Honda",
    "Plataforma C2", "Motor EcoBoost 1.5", "Transmissão PowerShift", "Plataforma CMA",
    "Sistema de Freio Brembo", "Bateria 48V", "Sensor Lidar", "Câmera 360",
    "Farol LED Matrix", "Painel Digital", "Banco de Couro Nappa", "Rodas de Liga Leve 18",
    "Pneu Michelin Pilot Sport", "Sistema de Som Bose", "Teto Solar Panorâmico", "Airbag de Cortina",
    "Controle de Estabilidade ESP", "Assistente de Faixa"
]
```

Figura: Arquivo de entrada do Grafo - data.py

Arquivos de Dados II

```
# Arestas do Grafo Bipartido (Carro ↔ Peça)
EDGES_BIPARTIDO = [
    ("VW Golf Mk6", "Motor EA888 2.0T"), ("VW Golf Mk6", "Transmissão DSG DQ250"),
    ("VW Golf Mk6", "Plataforma PQ35"), ("VW Golf Mk6", "Sistema ABS Bosch"),
    ("VW Golf Mk6", "Central Multimídia MIB"), ("Audi A3 8P", "Motor EA111 1.6"),
    ("Audi A3 8P", "Transmissão DSG DQ250"), ("Audi A3 8P", "Plataforma PQ35"),
    ("Audi A3 8P", "Sistema ABS Bosch"), ("Audi A3 8P", "Central Multimídia MIB"),
    ("Audi TT Mk2", "Motor EA888 2.0T"), ("Audi TT Mk2", "Transmissão DSG DQ250"),
    ("Audi TT Mk2", "Turbocompressor KKK"), ("Audi TT Mk2", "Sistema ABS Bosch"),
    ("Audi TT Mk2", "Plataforma PQ35"), ("VW Polo Mk5", "Motor EA111 1.6"),
    ("VW Polo Mk5", "Plataforma PQ25"), ("VW Polo Mk5", "Sistema ABS Bosch"),
    ("Porsche Cayenne", "Suspensão Multilink"), ("Porsche Cayenne", "Sistema ABS Bosch"),
    ("Porsche Cayenne", "Turbocompressor KKK"), ("Renault Clio IV", "Plataforma B (Renault-Nissan)"),
    ("Renault Clio IV", "Motor HR16DE"), ("Renault Clio IV", "Sistema ABS Bosch"),
    ("Nissan Micra K13", "Plataforma B (Renault-Nissan)"), ("Nissan Micra K13", "Motor HR16DE"),
    ("Nissan Micra K13", "Sistema ABS Bosch"), ("Renault Captur", "Plataforma B (Renault-Nissan)"),
    ("Renault Captur", "Motor HR16DE"), ("Renault Captur", "Sistema ABS Bosch"),
    ("Jeep Compass", "Motor Tigershark 2.4"), ("Jeep Compass", "Transmissão Aisin 6F24"),
    ("Jeep Compass", "Sistema ABS Bosch"), ("Fiat Toro", "Motor Tigershark 2.4"),
    ("Fiat Toro", "Transmissão Aisin 6F24"), ("Fiat Toro", "Sistema ABS Bosch"),
    ("BMW X3", "Suspensão Multilink"), ("BMW X3", "Sistema ABS Bosch"),
    ("BMW X3", "Turbocompressor KKK"), ("Mercedes C-Class", "Suspensão Multilink"),
    ("Mercedes C-Class", "Sistema ABS Bosch"), ("Mercedes C-Class", "Turbocompressor KKK"),
```

Figura: Arquivo de entrada do Grafo - data.py