

Universidade de Brasilia (UnB)

Faculdade de Tecnologia (FT)

Departamento de Engenharia de Producao (EPR)

Projeto 1 — Logistica Quantitativa Aplicada

Relatorio Final: Etapas 1 e 2

Disciplina: Logistica

Professor: Joao Gabriel de Moraes Souza

Discente: Antonio Augusto Maciel Guimaraes (190084421)

Data: 13/02/2026

Sistema web: <https://logistica.tominho.com>

Repositorio: https://github.com/T0minh0/Logistica_trabalho_1_2026_1

1. Resumo Executivo

Decisao recomendada:

Recomenda-se a adocao da politica de reposicao (R,Q) com revisao continua (R = 61 unidades, Q = 85 unidades) para o cenario-base avaliado. Esta politica apresentou o melhor equilibrio custo-servico-risco entre as tres familias testadas, com custo total medio de R\$ 15.230/ano, fill rate de 96,8% e score ajustado de 88,8 no ranking multicriterio. A decisao e suportada por simulacao Monte Carlo com 30 replicacoes e intervalos de confianca de 95%.

Este relatorio consolida as Etapas 1 e 2 do Projeto 1 de Logistica Quantitativa Aplicada, abordando o problema de reposicionamento de estoque em rede varejista com alta variabilidade de demanda. Utiliza o dataset M5 Forecasting (Walmart/Kaggle) como base empirica e integra os Topicos I a VII da disciplina, com foco central em Gestao de Estoques Estocasticos (Topico IV).

Criteria de avaliacao atendidos:

Criterio	Descricao	Secao
C1	Formulacao do problema logistico	Secao 2
C2	Modelagem quantitativa e fundamentacao teorica	Secoes 2 e 3
C3	Implementacao computacional (execucao completa)	Secao 4
C4	Analise de resultados e tomada de decisao	Secoes 5 e 6
C5	Qualidade da comunicacao tecnica	Secao 7

2. Contexto e Formulacao do Problema

[Critério C1 — Formulacao do problema logistico]

2.1 Contexto Operacional e Objetivo

Uma rede varejista opera multiplas lojas (10 lojas em 3 estados: CA, TX, WI) com milhares de produtos cujas vendas diarias sao influenciadas por sazonalidade semanal e anual, eventos do calendario, promocoes e efeitos regionais. As decisoes de reposicao afetam diretamente rupturas (perda de vendas), excesso de estoque (custos de capital) e custos logísticos (pedidos, transporte, operacao de CDs).

Objetivo: definir uma politica de reposicao que minimize o custo logistico total esperado e garanta nivel de servico adequado, integrando previsao de demanda, gestao de estoques e cenarios de centralizacao e localizacao.

2.2 Funcao Objetivo e Variaveis de Decisao

Minimizar o custo total no horizonte T:

$$C_{total} = C_{pedido}(K) + C_{holding}(h) + C_{falta}(p) + C_{transporte}$$

Variaveis de decisao por item i e loja j: Q_{ij} (lote de reposicao), R_{ij} (ponto de pedido). Em cenarios de centralizacao: x_{jk} (alocacao loja-CD) e y_k (abertura de CD). Restricoes: $CSL \geq 95\%$, fill rate $\geq 95\%$, capacidade por loja e orcamento por ciclo.

2.3 Topico Central e Integracao Disciplinar

[Critério C2 — Modelagem quantitativa e fundamentacao teorica]

Topico central: Gestao de Estoques Estocasticos (Topico IV). O eixo do projeto e o Topico IV por refletir o problema real: demanda e lead time sao incertos, e a politica otima depende do trade-off entre custo, servico e risco.

Topico	Interface com Topico Central (IV)
I — Fundamentos	Trade-offs logísticos, métricas CSL e fill rate, custo total
II — Previsao	Estima media e desvio padrao para calculo de estoque de seguranca
III — Deterministico	EOQ como baseline de custo e lote otimo
V — Simulacao	Monte Carlo com SimPy para validacao sob incerteza
VI — Localizacao	CDs candidatos, alocao de lojas, impacto no lead time
VII — Pooling	Reducao de variancia via agregacao e centralizacao de estoque

A integracao disciplinar e obrigatoria: o Topico I (Fundamentos) fornece a estrutura de trade-offs e metricas; o Topico II (Previsao) alimenta a modelagem com estimativas de media e variancia; o Topico III (Deterministico) oferece o EOQ como baseline; o Topico V (Simulacao) valida politicas sob incerteza via Monte Carlo; o Topico VI (Localizacao) define CDs candidatos e alocao; e o Topico VII (Pooling) explora a reducao de variancia por centralizacao.

2.4 Hipoteses

- Lead time: deterministico na Etapa 1; estocastico (normal truncada ou triangular) na Etapa 2;
- Custos K , h e p definidos por cenario e analisados via sensibilidade;
- Independencia parcial entre lojas; correlacao medida e discutida no risk pooling.

3. Dados e Preparacao

3.1 Dataset M5 Forecasting (Walmart)

Fonte: Kaggle — M5 Forecasting Accuracy Competition. Tres arquivos: sales_train_validation.csv (30.490 series temporais de vendas diarias), calendar.csv (datas, eventos, feriados) e sell_prices.csv (precos por item/loja/semana). Hierarquia: store -> state -> total (geografia) e item -> dept -> cat -> total (catalogo, 3 categorias: HOBBIES, HOUSEHOLD, FOODS).

3.2 Recorte e Pre-processamento

Recorte	Descricao	Finalidade
A (principal)	2 lojas + 2 categorias + ~30 itens com maior volume	Políticas e previsao
B (intermitencia)	10 itens com alta % de zeros	Robustez para series raras
C (pooling)	Mesmas categorias, descentralizado vs. pooling	Avaliacao de risk pooling

Pre-processamento: conversao wide->long, merge com calendario e precos, criacao de features derivadas (dow, month, is_weekend, is_event, snap_state, price_change). Implementacao: src/preprocess.py.

3.3 Analise Exploratoria (EDA)

Diagnosticos realizados: series temporais diarias e semanais, decomposicao sazonal, estatisticas descritivas (media, desvio padrao, CV), analise de intermitencia (classificacao Syntetos-Boylan), ACF/PACF, correlacao cruzada entre lojas e heatmap de sazonalidade.

Indicador	Resultado
Classificacao de intermitencia (50 itens)	42% Erratico, 36% Suave, 22% Grumoso
Correlacao media entre lojas (mesmo item)	0,35 a 0,60 (moderada a forte)
Sazonalidade semanal evidente	80% das series

3.4 Previsao de Demanda

Objetivo: prever demanda futura e obter medida de incerteza (variancia dos residuos) para calcular estoque de seguranca. Modelos implementados:

- Baselines: Naive, Seasonal Naive, Media Movel (7 e 14 dias);
- Estatisticos: ETS, ARIMA/SARIMA, ARIMAX com variaveis exogenas;
- Avancados: LightGBM (lags 1/7/14/28, medias moveis, features ciclicas), Ensemble (ETS 25% + ARIMA 25% + LightGBM 50%), Decomposicao Sazonal.

Performance (horizonte 28 dias, media dos itens):

Modelo	WAPE	Acuracia
LightGBM	12-25%	75-88%
Ensemble	15-28%	72-85%
ETS	18-40%	60-82%

O LightGBM foi selecionado como modelo primario pela melhor performance. A saida (media e desvio padrao previstos) alimenta diretamente a modelagem de estoques.

3.5 Modelagem Deterministica (Baseline EOQ)

O modelo EOQ ($Q^* = \sqrt{2DK/h}$) estabelece o lote otimo sem incerteza e serve como baseline de custo. O custo total deterministico $CT(Q) = (D/Q)K + (Q/2)h$ fornece referencia para avaliar o ganho das politicas estocasticas. Implementacao: src/inventory/eq.py.

4. Implementacao Computacional (C3)

[Critério C3 — Implementacao computacional: execucao completa]

4.1 Arquitetura do Pipeline

O sistema foi implementado como pipeline modular em Python, cobrindo todo o ciclo: dados -> EDA -> previsao -> estoque -> localizacao -> simulacao -> decisao -> relatorio.

```
src/
  config.py, io_load.py, preprocess.py
eda/ (eda_core, plots, intermittency)
forecast/ (baselines, ets_arima, exogenous, advanced, metrics)
inventory/ (eoq, rq_policy, pooling, pooling_advanced, optimization, service_levels)
location/ (candidates, allocation, transport_cost_proxy)
simulation/ (simpy_env – InventorySimulation, run_monte_carlo, compare_policies)
decision_support.py (ranking multicriterio, justificativa automatica)
reporting/ (decision_pdf – exportacao PDF)
dashboard.py (Streamlit interativo em https://logistica.tominho.com)
```

4.2 Incorporacao de Incerteza

A incerteza e modelada em tres dimensoes:

Demanda estocastica: a classe DemandGenerator suporta distribuicoes Normal, Poisson e Empirica (amostragem historica), com truncagem em zero.

Lead time estocastico: a classe LeadTimeGenerator modela o tempo de entrega via Normal Truncada (min=2, moda=5, max=10 dias), Triangular ou Constante.

Custos parametrizados: K (R\$ 50-200), h (20-40% do custo), p (R\$ 25-75/un), analisados via sensibilidade para verificar robustez das conclusoes.

4.3 Simulacao Monte Carlo com SimPy

A simulacao de eventos discretos (SimPy) executa o fluxo diario: geracao de demanda -> atendimento -> verificacao de reposicao -> chegada de pedidos com lead time estocastico -> apuracao de custos. Cada cenario e replicado N vezes (padrao: 30) para obter intervalos de confianca de 95%.

Componentes implementados:

- SimulationConfig: dataclass com todos os parametros (horizonte, warmup, replicacoes, distribuicoes);
- InventoryMetrics: coleta custo total, fill rate, CSL, dias com falta, estoque medio/maximo;
- InventorySimulation: processo SimPy com 4 fases diarias;
- run_monte_carlo(): executa N replicacoes e calcula IC 95%;
- compare_policies(): compara multiplas politicas com mesma semente.

4.4 Politicas de Estoque Implementadas

Tres familias de politicas foram implementadas:

Politica	Mecanismo	Classe
(R,Q) — Revisao Continua	Quando $IP \leq R$, pedir Q fixo (EOQ). $R = \mu_L + z \cdot \sigma_L$	RQPolicy
(s,S) — Min-Max	Quando $IP \leq s$, pedir ate S. Lote variavel. $s=R$, $S=s+Q_{EOQ}$	sSPolicy
(P,S) — Revisao Periodica	A cada P dias, pedir ate S. P derivado do ciclo EOQ	PSPolicy

4.5 Localizacao e Risk Pooling

Localizacao: 3 CDs candidatos (CD_West/Fresno, CD_Central/Texas, CD_North/Wisconsin) com alocao de lojas por distancia Haversine minima (src/location/). Risk pooling

(src/inventory/pooling_advanced.py): compara cenários descentralizado, centralizado e híbrido ABC (itens A descentralizados, B/C centralizados). Variância pooled calculada com correlações reais entre lojas.

4.6 Dashboard e Reprodutibilidade

Dashboard Streamlit acessível em <https://logistica.tominho.com> com 5 páginas: Visão Geral, Análise de Demanda, Previsão (com ranking de modelos), Gestão de Estoques (EOQ + política R,Q + sensibilidade) e Simulação Monte Carlo (comparação de políticas com motor de decisão). Todos os parâmetros são configuráveis via sidebar.

5. Resultados, Cenários e Comparações

5.1 Cenário-Base e Parâmetros

Parâmetro	Valor
Loja / Item	CA_1 / FOODS_3_090
Horizonte de simulação	365 dias (+ 30 dias warmup)
Replicações Monte Carlo	30
Demanda média	10 un/dia ($\sigma = 3$ un/dia)
Lead time médio	5,0 dias ($\sigma = 1,5$ dias, truncado em [2, 10])
Custo por pedido (K)	R\$ 100,00
Holding anual (h)	20% do custo unitário (R\$ 10)
Custo de falta (p)	R\$ 50,00/un
CSL alvo / Fill rate mínimo	95% / 95%

5.2 Ranking de Políticas — Resultado Principal

O motor de decisão (src/decision_support.py) aplica ranking multicritério com pesos: custo (55%), serviço (30%) e risco (15%). Políticas que não atendem o fill rate mínimo recebem penalidade de 35% no score.

Política	Score	Custo Total	Fill Rate	Faltas	Status
(R,Q): R=61, Q=85	88,8	R\$ 15.230	96,8%	118 un	Atende meta
(s,S): s=61, S=146	70,2	R\$ 15.890	97,2%	102 un	Atende meta
(P,S): P=7d, S=172	—	R\$ 16.450	95,5%	160 un	Atende meta

5.3 Composição de Custos

Na política recomendada (R,Q), o custo total de R\$ 15.230/ano se decompõe em: custo de holding R\$ 5.230 (34%), custo de pedidos R\$ 4.200 (28%) e custo de falta R\$ 5.800 (38%). O custo de falta domina, justificando a priorização do fill rate no ranking.

5.4 Comparação: Determinístico vs. Estocástico

O EOQ determinístico ($Q^* = 85$ un, CT = R\$ 8.540/ano) subestima o custo real em 44%, pois ignora completamente o custo de falta. Ao incorporar incerteza via política (R,Q) com estoque de segurança SS = 11 un, o custo total sobe para R\$ 15.230, mas o fill rate atinge 96,8% vs. ~60% estimado sem SS. O ganho de serviço justifica o investimento adicional em estoque.

5.5 Cenários de Pooling e Localização

A análise de risk pooling compara três cenários de centralização:

Cenário	SS Total	Redução vs. Descentralizado
Descentralizado (cada loja com SS próprio)	Referência	0%
Centralizado (1 CD por estado)	Reduzido	15-30% (depende da correlação)
Híbrido ABC (A local, B/C central)	Intermediário	10-20%

A correlação média entre lojas (0,35-0,60) limita o efeito portfólio teórico ($1 - 1/\sqrt{n} = 42\%$ para 3 lojas), mas a redução de SS permanece economicamente significativa. O benefício cresce com o CSL alvo (análise de sensibilidade 85%-98%).

5.6 Análise de Sensibilidade

Parâmetros variados sistematicamente para avaliar robustez:

Parâmetro variado	Faixa	Efeito no ranking
K (custo pedido)	R\$ 50 a 200	Ranking estável: (R,Q) lidera em todos os cenários
h (holding)	20% a 40%	Ranking estável: custo total sobe 15-30%, ordem mantém
p (custo falta)	R\$ 25 a 75	Inversão quando $p > R\$ 75$: (s,S) assume liderança
CSL alvo	90% a 98%	SS cresce 40-80%; (R,Q) mantém vantagem até CSL = 97%
Lead time médio	3 a 14 dias	LT > 10 dias: (s,S) mais competitiva

Conclusão da sensibilidade: a política (R,Q) é robusta para a maioria dos cenários plausíveis. A inversão para (s,S) ocorre apenas em cenários de alta penalidade de falta ($p > R\$ 75/\text{un}$) ou lead time muito longo (> 10 dias), onde o fill rate se torna a dimensão dominante.

6. Tomada de Decisão e Análise de Trade-offs (C4)

[Critério C4 — Análise de resultados e tomada de decisão — CRITÉRIO CENTRAL]

6.1 Decisão Logística Recomendada

Com base na evidência quantitativa produzida pela simulação Monte Carlo, na análise de sensibilidade e na comparação multicritério, a decisão logística recomendada é:

RECOMENDACAO: Adotar a política (R,Q) com revisão contínua, R = 61 unidades e Q = 85 unidades (EOQ), para o cenário-base.

Justificativa quantitativa:

- Maior score ajustado (88,8) no ranking multicritério (custo 55%, serviço 30%, risco 15%);
- Atende o fill rate mínimo de 95,0% com folga (96,8%);
- Custo total médio de R\$ 15.230/ano, 4,0% melhor que a média das políticas;

- Fill rate de 96,8% — acima da media do cenario (96,5%);
- 118 faltas medias/ano — abaixo da media do cenario (126,7 un);
- Resultado robusto para variacoes de +/-20% em K e h.

6.2 Analise dos Trade-offs

Trade-off 1: Custo vs. Nivel de Servico

A politica (s,S) oferece fill rate superior (97,2%) com menos faltas (102 un), mas a um custo total 4,3% maior (R\$ 15.890 vs. R\$ 15.230). O ganho marginal de 0,4 pontos percentuais de fill rate custa R\$ 660/ano adicionais. Para o cenario-base, este custo marginal nao se justifica, pois o fill rate de 96,8% ja excede a meta de 95%. Porem, em operacoes com custo de falta muito alto ($p > R\$ 75/\text{un}$), a (s,S) torna-se preferivel.

Trade-off 2: Reatividade vs. Custo Operacional

A politica (P,S) com revisao periodica de 7 dias e a mais cara (R\$ 16.450, +8% vs. R,Q) e com mais faltas (160 un), pois nao reage imediatamente a quedas no estoque. A revisao continua da (R,Q) exige monitoramento diario do nivel de estoque, o que demanda sistemas de informacao mais sofisticados. O trade-off e: menor custo operacional de TI (P,S) vs. menor custo logistico total (R,Q). Para redes com sistemas de informacao modernos (como o dashboard implementado), a (R,Q) e viavel.

Trade-off 3: Centralizacao vs. Responsividade

O pooling centralizado reduz o SS total em 15-30%, gerando economia de holding. Porem, a centralizacao aumenta o lead time de entrega ao cliente final e reduz a responsividade local. O cenario hibrido ABC equilibra: itens A (alto giro) permanecem locais para resposta rapida; itens B/C sao centralizados para capturar o efeito portfolio. Esta estrategia reduz SS em 10-20% sem comprometer a disponibilidade dos itens mais demandados.

Trade-off 4: Custo Deterministico vs. Custo Real

O EOQ deterministico ($CT = R\$ 8.540$) subestima o custo real em 44%, pois ignora o custo de falta e a variabilidade. O investimento adicional em estoque de seguranca ($SS = 11$ un) eleva o custo para R\$ 15.230, mas o fill rate salta de ~60% para 96,8%. Em logistica, a solucao otima no papel raramente sobrevive ao contato com a variabilidade do mundo real.

6.3 Condicoes para Revisao da Decisao

A decisao deve ser revisada caso:

- O custo de falta real exceda R\$ 75/un — migrar para (s,S);
- O lead time medio suba acima de 10 dias — reavaliar com (s,S) ou aumentar SS;
- A operacao nao suporte revisao continua de estoque — adotar (P,S) como alternativa;
- A correlacao entre lojas caia abaixo de 0,30 — intensificar centralizacao do estoque.

6.4 Mapa de Criterios e Decisoes

Dimensao	Resultado	Decisao
Politica de reposicao	(R,Q) com score 88,8	Adotar para cenario-base
Nivel de servico	Fill rate 96,8% (meta: 95%)	Meta atendida com folga
Centralizacao	Hibrido ABC reduz SS 10-20%	Centralizar itens B/C

Modelo de previsao	LightGBM com WAPE 12-25%	Usar como modelo primario
Localizacao de CDs	3 CDs regionais	Manter por estado

7. Comunicacao Tecnica e Reprodutibilidade (C5)

[Critério C5 — Qualidade da comunicacao tecnica]

7.1 Organizacao do Relatorio

Este relatorio segue a estrutura recomendada pelo enunciado do projeto: resumo executivo com decisao, formulacao sintetica (C1), modelagem e dados (C2), implementacao computacional completa (C3), resultados e cenarios, tomada de decisao com trade-offs (C4) e consideracoes de comunicacao (C5). Tabelas, metricas e resultados quantitativos sao apresentados de forma objetiva para sustentar cada decisao.

7.2 Reprodutibilidade

Todos os resultados sao reprodutíveis através de:

- Repositorio GitHub publico: https://github.com/T0minh0/Logistica_trabalho_1_2026_1;
- Dashboard web: <https://logistica.tominho.com> (todos os cenarios recalculaveis);
- Sementes aleatorias fixas (random_seed=42) para simulacao Monte Carlo;
- requirements.txt com todas as dependencias e versoes;
- Scripts de validacao: scripts/validate_etapa2_requirements.py (6 criterios PASS);
- Relatorio Monte Carlo exportavel em PDF diretamente do dashboard.

7.3 Bibliotecas e Ferramentas

Biblioteca	Finalidade
pandas, numpy, scipy	Manipulacao de dados, estatistica, distribuicoes
statsmodels	ETS, ARIMA, decomposicao sazonal
lightgbm, scikit-learn	Previsao avancada e validacao
simpy	Simulacao de eventos discretos
streamlit, plotly	Dashboard interativo
reportlab	Exportacao de relatorios PDF

7.4 Limitacoes e Trabalhos Futuros

- Custos parametrizados (nao reais): resultados dependem dos cenarios assumidos;
- Coordenadas geograficas proxy: localizacao de CDs e aproximada;
- Correlacao entre itens nao modelada: assumiu-se independencia parcial;
- Trabalho futuro: incorporar custos reais, otimizacao simultanea de (R,Q) via busca e ampliar a simulacao para rede multi-echelon.

8. Conclusao

Este projeto demonstrou a capacidade de formular um problema logistico realista (C1), modelar quantitativamente o sistema com fundamentacao teorica (C2), implementar completamente a solucao computacional (C3), comparar cenarios e tomar uma decisao logistica justificada com base em evidencia quantitativa (C4), e comunicar os resultados de forma clara e reprodutivel (C5).

O problema de reposicionamento de estoque em rede varejista foi abordado integrando os sete topicos da disciplina, com foco central em Gestao de Estoques Estocasticos (Topico IV). A simulacao Monte Carlo com SimPy permitiu avaliar tres familias de politicas — (R,Q), (s,S) e (P,S) — sob incerteza de demanda e lead time, com 30 replicacoes e intervalos de confianca de 95%.

A decisao final recomenda a politica (R,Q) com revisao continua como melhor alternativa para o cenario-base, apresentando custo total de R\$ 15.230/ano e fill rate de 96,8%. A analise de trade-offs mostrou que este resultado e robusto para variacoes plausiveis nos parametros, com condicoes de revisao claramente definidas (custo de falta > R\$ 75/un ou lead time > 10 dias).

O cenario hibrido ABC de centralizacao e recomendado complementarmente, reduzindo o estoque de segurancia total em 10-20% sem comprometer a disponibilidade dos itens de maior giro. Todos os resultados sao reproduziveis via repositorio GitHub e dashboard web interativo.

Em Logistica, modelo e codigo sao meios — a decisao logistica e o fim. Este projeto traduz analise quantitativa rigorosa em recomendacoes acionaveis para o gestor de estoques.

Referencias

1. Kaggle. (2020). M5 Forecasting — Accuracy. <https://www.kaggle.com/competitions/m5-forecasting-accuracy/data>
2. Repositorio do projeto — GitHub. https://github.com/T0minh0/Logistica_trabalho_1_2026_1
3. Dashboard interativo. <https://logistica.tominho.com>
4. Syntetos, A. A. & Boylan, J. E. (2005). The accuracy of intermittent demand estimates. *International Journal of Forecasting*, 21(2), 303-314.
5. Silver, E. A., Pyke, D. F. & Thomas, D. J. (2017). *Inventory and Production Management in Supply Chains*. CRC Press.
6. Chopra, S. & Meindl, P. (2019). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. Pearson.