Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Investigação Operacional

Universidade do Minho

2025/2026

Escalonamento da Produção

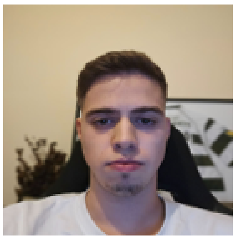
SmartFab

Afonso Martim
Carvalho Leite
a108552 — LEGSI
a108552@alunos.uminho.pt

Pedro Manuel
Mendes Neves
a108556 — LEGSI
a108556@alunos.uminho.pt

Rodrigo Santiago
Fonseca Faria Abreu
a109233 — LEGSI
a109233@alunos.uminho.pt

Sérgio Paulo
Vieira Carvalho
a108274 — LEGSI
a108274@alunos.uminho.pt



Índice

Parte I - Modelo base

Símbolo	Descrição	Dimensão	Campo
N	Número total de módulos IoT considerados	Escalar	"N"
T	Número total de períodos do horizonte	Escalar	"T"
p_i	Tempo de processamento por unidade do módulo i	i = 1, ... , N	"p"
$s_{i,j}$	Tempo de reconfiguração da linha ao transitar do módulo i para o módulo j	i, j = 1, ..., N	"s"
$c_i\ prod$	Custo unitário de produção do módulo i	i = 1, ..., N	"cProd"
$c_i\ stock$	Custo de armazenagem por unidade do módulo i	i = 1, ..., N	"cStock"
$k_{i,j}$	Custo de reconfiguração da linha ao transitar do módulo i para o módulo j	i, j = 1, ..., N	"k"
$d_{i,t}$	Procura do módulo i até ao final do período t	i = 1, ..., N; t = 1, ..., T	"d"
$I_{i,0}$	Stock inicial do módulo i	i = 1, ..., N	"I0"
C_t	Capacidade total no período t	t = 1, ..., T	"C"
$S_i\ max$	Limite máximo de stock do módulo i	i = 1, ..., N	"Smax"

1. Geração da instância do problema

De acordo com o enunciado, a instância do problema de escalonamento da produção deve ser gerada a partir do menor número mecanográfico pertencente aos elementos do grupo, garantindo que cada equipa trabalha com um conjunto de dados único e irrepetível.

No nosso caso, o menor número mecanográfico corresponde a 108274, pelo que a aplicação *Gerador_dados_trabalho_IO.exe* foi executada com este valor. O ficheiro resultante, *escalonamento_108274.json*, contém todos os parâmetros necessários à modelação do problema, incluindo:

- tempos de processamento dos módulos;
- custos de produção e custos de armazenagem;
- tempos e custos de reconfiguração;
- capacidade temporal da linha por período;
- procura de cada módulo ao longo dos diferentes períodos;
- stocks iniciais.

Este ficheiro constitui a base de todos os cálculos e decisões modeladas no presente trabalho. Os parâmetros específicos da instância gerada serão apresentados de seguida:

- Número de módulos: N = 3
- Número de períodos: T = 4

Tempos de processamento (p):

- Módulo 1: 0.45
- Módulo 2: 0.78
- Módulo 3: 0.49

Tempos de reconfiguração (s):

$$\begin{bmatrix} 0 & 1.66 & 0.85 \\ 1.25 & 0 & 1.70 \\ 1.05 & 1.81 & 0 \end{bmatrix}$$

Custos de produção (cProd):

- Todos os módulos: 9

Custos de armazenagem (cStock):

- Módulo 1: 0.38
- Módulo 2: 1.17
- Módulo 3: 1.15

Custos de reconfiguração (k):

$$\begin{bmatrix} 0 & 28 & 15 \\ 37 & 0 & 21 \\ 21 & 30 & 0 \end{bmatrix}$$

Procura (d):

$$\begin{bmatrix} 11 & 11 & 7 & 6 \\ 10 & 7 & 4 & 15 \\ 11 & 12 & 15 & 6 \end{bmatrix}$$

Stocks iniciais (I0):

$$\begin{bmatrix} 23 & 19 & 24 \end{bmatrix}$$

Capacidade da linha por período (C):

$$\begin{bmatrix} 23.3 & 25.3 & 24.8 & 22.5 \end{bmatrix}$$

2. Formulação problema de planeamento da produção

Antes da definição das variáveis de decisão, importa esclarecer os conjuntos e respetivos índices utilizados no modelo. Assim:

- i = {1,2,3} - representa o módulo de produção de origem (módulo atual);
- j = {1,2,3} - representa o módulo para o qual a linha pode ser reconfigurada;
- t = {1,2,3,4} - representa cada um dos períodos do horizonte temporal considerado.

Assim, os índices i, j e t percorrem os conjuntos relevantes do modelo, representando diferentes dimensões da decisão:

- i → módulo antes da reconfiguração;
- j → módulo após a reconfiguração,
- t → período em que essa reconfiguração ocorre e em que a produção é planeada

Variáveis de decisão:

1. $x_{i,t}$ - "Quantidade produzida no módulo i no período t"

Representa a quantidade do módulo i produzida no período t.

É uma variável inteira não negativa. Esta variável determina o plano de produção propriamente dito e permite satisfazer as necessidades da procura ao longo do horizonte temporal.

2. $I_{i,t}$ - "Stock no módulo i no final do período t"

Corresponde ao nível de stock do módulo i existente no final do período t.

É igualmente uma variável inteira não negativa.

O stock funciona como elemento de ligação entre os períodos, absorvendo diferenças entre a produção disponível e a procura exigida.

3. $y_{i,t}$ - Variáveis Binárias de Ativação do Módulo

São variáveis binárias que indicam se o módulo está ativo no período t:

$$y_{i,t} = \begin{cases} 1, & \text{se a linha estiver configurada para produzir o módulo i} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Esta variável assegura que em cada período, **apenas é produzido um módulo**, conforme a natureza da linha de montagem.

4. $z_{i,t}$ - Variáveis Binárias de Reconfiguração

Variável binária que representa se, no início do período t , ocorreu uma reconfiguração da linha do módulo i para o módulo j:

$$z_{i,j,t} = \begin{cases} 1, & \text{se houver setup de } i \to j \text{ no início de } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Permite contabilizar tanto o tempo como o custo económico associado às mudanças de módulo da linha.

Função Objetivo:

A função objetivo do modelo consiste em minimizar o custo total da operação ao longo dos quatro períodos, agregando três componentes fundamentais:

$$Min\ z\ = Custos\ de\ Produção\ +\ Custos\ de\ Stock\ +\ Custos\ de\ Reconfiguração$$

Interpretação económica da Função Objetivo:

- Produzir demasiado cedo gera stock, que tem um custo.
- Produzir demasiado tarde pode ser impossível devido aos limites da capacidade temporal da linha.
- Mudar frequentemente de módulo gera reconfiguração, penalizando planos de produção com muitas alternâncias.

A função objetivo equilibra estes três aspetos para encontrar o plano ótimo de produção, sendo este, aquele que satisfaz a procura ao menor custo total possível:

$$\begin{aligned} Min\ z\ = {} & 9x_{1,1} + 0.38I_{1,1} + 9x_{2,1} + 1.17I_{2,1} + 9x_{3,1} + 1.15I_{3,1} + \\ & 9x_{1,2} + 0.38I_{1,2} + 9x_{2,2} + 1.17I_{2,2} + 9x_{3,2} + 1.15I_{3,2} + \\ & 9x_{1,3} + 0.38I_{1,3} + 9x_{2,3} + 1.17I_{2,3} + 9x_{3,3} + 1.15I_{3,3} + \\ & 9x_{1,4} + 0.38I_{1,4} + 9x_{2,4} + 1.17I_{2,4} + 9x_{3,4} + 1.15I_{3,4} + \\ & 28z_{1,2,2} + 15z_{1,3,2} + 37z_{2,1,2} + 21z_{2,3,2} + 21z_{3,1,2} + 30z_{3,2,2} + \\ & 28z_{1,2,3} + 15z_{1,3,3} + 37z_{2,1,3} + 21z_{2,3,3} + 21z_{3,1,3} + 30z_{3,2,3} + \\ & 28z_{1,2,4} + 15z_{1,3,4} + 37z_{2,1,4} + 21z_{2,3,4} + 21z_{3,1,4} + 30z_{3,2,4} + \end{aligned}$$

Sujeito a:

1. Restrições Balanço de Stock

Período $(t = 1)$:

$I_{1,1} + k_{1,1} = 12$

$I_{2,1} + k_{2,1} = 9$

$I_{2,1} + k_{3,1} = 13$

Período $(t = 2)$:

$k_{1,2} - I_{1,2} + I_{1,1} = 11$

$k_{2,2} - I_{2,2} + I_{2,1} = 7$

$k_{3,2} - I_{3,2} + I_{3,1} = 12$

Período $(t = 3)$:

$k_{1,3} - I_{1,3} + I_{1,2} = 7$

$k_{2,3} - I_{2,3} + I_{2,2} = 4$

$k_{3,3} - I_{3,3} + I_{3,2} = 15$

Período $(t = 4)$:

$k_{1,4} - I_{1,4} + I_{1,3} = 6$

$k_{2,4} - I_{2,4} + I_{2,3} = 15$

$k_{3,4} - I_{3,4} + I_{3,3} = 6$

Para cada módulo e período, a soma do stock trazido do período anterior $(I_{i,t-1})$ com a quantidade produzida no período atual $(x_{i,t})$ deve ser suficiente para satisfazer a procura atual $(d_{i,t})$ e constituir o stock final $(I_{i,t})$ que transita para o período seguinte.

2. Restrições de Módulo ativo único

Período 1: $y_{1,1} + y_{2,1} + y_{3,1} = 1$
Período 2: $y_{1,2} + y_{2,2} + y_{3,2} = 1$
Período 3: $y_{1,3} + y_{2,3} + y_{3,3} = 1$
Período 4: $y_{1,4} + y_{2,4} + y_{3,4} = 1$

Em qualquer período t, a linha de montagem tem de estar configurada para produzir exatamente um tipo de módulo. Isto é garantido forçando a soma das variáveis binárias de estado ($y_{i,t}$) a ser igual a 1. Assim, apenas um módulo pode estar "ativo" em cada período.

3. Restrições de Capacidade da Linha

Período 1: $0.45x_{1,1} + 0.78x_{2,1} + 0.49x_{3,1} \leq 23.3$

Período 2: $0.45x_{1,2} + 0.78x_{2,2} + 0.49x_{3,2} + 1.66z_{1,2,2} + 0.85z_{1,3,2} + 1.25z_{2,1,2} + 1.7z_{2,3,2} + 1.81z_{3,2,2} \leq 25.3$

Período 3: $0.45x_{1,3} + 0.78x_{2,3} + 0.49x_{3,3} + 1.66z_{1,2,3} + 0.85z_{1,3,3} + 1.25z_{2,1,3} + 1.7z_{2,3,3} + 1.81z_{3,2,3} \leq 24.8$

Período 3: $0.45x_{1,4} + 0.78x_{2,4} + 0.49x_{3,4} + 1.66z_{1,2,4} + 0.85z_{1,3,4} + 1.25z_{2,1,4} + 1.7z_{2,3,4} + 1.81z_{3,2,4} \leq 22.5$

O consumo total de recursos temporais em cada período t não pode exceder a capacidade máxima disponível (C_t). O tempo consumido é composto por duas parcelas:

- Tempo de Produção: O tempo unitário de processamento (p_i) multiplicado pela quantidade produzida.
- Tempo de Reconfiguração: O tempo gasto ($s_{i,j}$) se ocorrer uma mudança de configuração de um módulo para outro.

4. Restrições de Ligação Produção-Configuração

Período 1

$x_{1,1} - 1000\, y_{1,1} \leq 0$

$x_{2,1} - 1000\, y_{2,1} \leq 0$

$x_{3,1} - 1000\, y_{3,1} \leq 0$

Período 2:

$x_{1,2} - 1000\, y_{1,2} \leq 0$

$x_{2,2} - 1000\, y_{2,2} \leq 0$

$x_{3,2} - 1000\, y_{3,2} \leq 0$

Período 3:

$x_{1,3} \ - 1000\ y_{1,3} \leq 0$

$x_{2,3} \ - 1000\ y_{2,3} \leq 0$

$x_{3,3} \ - 1000\ y_{3,3} \leq 0$

Período 4:

$x_{1,4} \ - 1000\ y_{1,4} \leq 0$

$x_{2,4} \ - 1000\ y_{2,4} \leq 0$

$x_{3,4} \ - 1000\ y_{3,4} \leq 0$

Caso a variável binária de configuração for zero ($y_{i,t} = 0$, a linha não está preparada para o módulo i), então a produção $x_{i,t}$ é forçada a ser zero. Se a linha estiver preparada ($y_{i,t} = 0$), a produção pode assumir qualquer valor positivo até ao limite M (onde M é um número suficientemente grande que não limita a capacidade real).

5. Restrições de Definição de Transição

Transições para o Período 2:

$y_{1,1} + y_{2,2} - z_{1,2,2} \leq 1$

$y_{1,1} + y_{3,2} - z_{1,3,2} \leq 1$

$y_{2,1} + y_{1,2} - z_{2,1,2} \leq 1$

$y_{2,1} + y_{3,2} - z_{2,3,2} \leq 1$

$y_{3,1} + y_{1,2} - z_{3,1,2} \leq 1$

$y_{3,1} + y_{2,2} - z_{3,2,2} \leq 1$

Transições para o Período 3:

$y_{1,2} + y_{2,3} - z_{1,2,3} \leq 1$

$y_{1,2} + y_{3,3} - z_{1,3,3} \leq 1$

$y_{2,2} + y_{1,3} - z_{2,1,3} \leq 1$

$y_{2,2} + y_{3,3} - z_{2,3,3} \leq 1$

$y_{3,2} + y_{1,3} - z_{3,1,3} \leq 1$

$y_{3,2} + y_{2,3} - z_{3,2,3} \leq 1$

Transições para o Período 4:

$y_{1,3} + y_{2,4} - z_{1,2,4} \leq 1$

$y_{1,3} + y_{3,4} - z_{1,3,4} \leq 1$

$y_{2,3} + y_{1,4} - z_{2,1,4} \leq 1$

$y_{2,3} + y_{3,4} - z_{2,3,4} \leq 1$

$y_{3,3} + y_{1,4} - z_{3,1,4} \leq 1$

$y_{3,3} + y_{2,4} - z_{3,2,4} \leq 1$

Esta inequação relaciona o estado da máquina no período anterior (t_{i-1}) com o estado no período atual (t). Se a máquina estava a produzir o módulo i e passa a produzir o módulo j (ou seja, ambos $y_{i,t-1} = 1$ e $y_{j,t} = 1$), a expressão torna-se $1 + 1 - 1 \leq z_{i,j,t}$, forçando a variável de transição a assumir o valor 1. Isto "ativa" os custos e tempos de reconfiguração correspondentes na Função Objetivo e na restrição de capacidade.

Domínio das Variáveis

- $x_{i,t} \geq 0$
- $I_{i,t} \geq 0$
- $y_{i,t} \in \{0, 1\}$
- $z_{i,j,t} \in \{0, 1\}$

3. Análise dos Resultados

a) Plano ótimo de produção por período

Período (t)	Módulo Ativo	Quantidade Produzida (un.)
1	Módulo 1	12
2	Módulo 3	20
3	Módulo 2	2
4	Módulo 2	15

b) Sequência ótima de módulos ativos

$$Módulo\ 1 \rightarrow (t\ =\ 2)\ Módulo\ 3 \rightarrow (t\ =\ 3)\ Módulo\ 2 \rightarrow (\ t\ =\ 4)\ Módulo\ 2$$

Transições: Ocorrem apenas **duas reconfigurações** de linha:

1. No início do período 2: de Módulo 1 para Módulo 3 ($z_{1,3,2}\ =\ 1$).
2. No início do período 3: de Módulo 3 para Módulo 2 ($z_{3,2,2}\ =\ 1$).
3. No período 4, a linha mantém-se configurada para o Módulo 2 (sem custo/tempo de reconfiguração).

c) Níveis de stocks obtidos

Período	Stock Módulo 1	Stock Módulo 2	Stock Módulo 3
1	24	9	13
2	13	2	21
3	6	0	6
4	0	0	0

d) Custo total da solução

O valor da Função Objetivo (Custo Mínimo Total) é de **561,21 €**.

e) Interpretação crítica dos resultados

1. Agrupamento de Produção

O módulo 1 é produzido exclusivamente no Período 1 (12 unidades). Somado ao stock inicial (23), perfaz o total exato (35) necessário para satisfazer a procura de todos os 4 períodos (11 + 11 + 7 + 6 = 35). O modelo optou por produzir tudo de uma vez e carregar stock para evitar voltar a configurar a linha para o Módulo 1 mais tarde.

2. Sequência de Menor Custo

A transição escolhida 1 → 3 → 2 tira partido da matriz de custos (k). A mudança de 1 → 3 custa 15€ (mais barato que 1 → 2, que custaria 28€).

O Módulo 2 foi deixado para o fim (Períodos 3 e 4) para evitar qualquer tempo de reconfiguração adicional no último período.

3. Eficiência de Stock Final:

Como se pode observar na tabela de stocks, no final do Período 4 (o último), os stocks de todos os módulos são zero. Isto indica uma eficiência perfeita: não houve desperdício de recursos a produzir unidades que não seriam vendidas dentro do horizonte de planeamento.

4. Utilização da Capacidade:

A capacidade da linha (Ct), não foi um gargalo restritivo nessa instância. A antecipação agressiva da produção sugere que havia tempo disponível suficiente nos primeiros períodos para produzir grandes lotes, permitindo poupar nos custos fixos de reconfiguração.

Parte II - Limites máximos de stock

1. Restrições dos Limites Máximos de Stock

Módulo 1: $I_{1,t} \leq 23$
Módulo 2: $I_{2,t} \leq 21$
Módulo 3: $I_{3,t} \leq 34$

Esta restrição reflete limitações físicas de capacidade do armazém ou políticas de gestão interna da empresa SmartFab. Impõe que, para cada tipo de módulo IoT, a quantidade de unidades mantidas em inventário no final de qualquer período não pode exceder um limite máximo predefinido (Smax).

Isto impede que o modelo "abuse" da antecipação de produção (produzir muito cedo para evitar reconfigurações futuras) se não houver espaço suficiente para guardar esses produtos.

2. Análise dos Resultados

a) Plano ótimo de produção por período

A tabela seguinte indica a quantidade produzida ($x_{i,t}$) em cada período:

Período (t)	Módulo Ativo	Quantidade Produzida (un.)
1	Módulo 2	2
2	Módulo 1	12
3	Módulo 3	20
4	Módulo 2	15

b) Sequência ótima de módulos ativos

A sequência de configurações da linha alterou-se significativamente em relação à Parte I:

$$Módulo\ 2 \rightarrow (t = 2)\ Módulo\ 1 \rightarrow (t = 3)\ Módulo\ 3 \rightarrow (\ t = 4)\ Módulo\ 2$$

Transições: Ocorrem apenas **duas reconfigurações** de linha:

4. No início do período 2: de Módulo 2 para Módulo 1 ($z_{2,1,2} = 1$).
5. No início do período 3: de Módulo 1 para Módulo 3 ($z_{1,3,3} = 1$).
6. No início do período 4: de Módulo 3 para Módulo 2 ($z_{3,2,4} = 1$).

c) Níveis de stocks obtidos

A tabela mostra os níveis de stock ($I_{i,t}$) no final de cada período. Nota-se que nenhum valor excede os limites (Smax_1 = 23, Smax_2 = 21, Smax_3 = 34).

Período	Stock Módulo 1	Stock Módulo 2	Stock Módulo 3
1	12	11	13
2	13	4	1
3	6	0	6
4	0	0	0

d) Custo total da solução

O valor da Função Objetivo (Custo Mínimo Total) é de **575.33 €**.

e) Comparação com os resultados obtidos na Parte I

A introdução das restrições de capacidade máxima de armazenagem (*Smax*) no modelo matemático teve um impacto determinante na solução ótima do problema de escalonamento da SmartFab. A comparação entre os resultados obtidos na Parte I (modelo sem limites de *stock*) e na Parte II (modelo com limites de *stock*) permite evidenciar o compromisso (*trade-off*) entre a eficiência operacional e as restrições logísticas.

1. Viabilidade da Solução Base

A solução ótima obtida na Parte I revelou-se inviável no contexto da Parte II. Na modelação inicial, a estratégia de minimização de custos privilegiou a antecipação total da procura do Módulo 1 logo no primeiro período, resultando num nível de stock final de 24 unidades ($I_{1,1}$= 24). Contudo, as novas restrições impõem um limite máximo de 23 unidades para este módulo (S_1max = 23). Uma vez que 24 > 23, a restrição de capacidade tornou-se ativa, forçando o modelo a reconfigurar integralmente o plano de produção.

2. Alteração da Estratégia de Planeamento

Para acomodar a limitação física do armazém, observou-se uma mudança significativa no padrão de produção e na sequência de módulos ativos:

- **Fragmentação da Produção:** Enquanto o modelo da Parte I adotou uma estratégia de produção em grandes lotes, produzindo toda a procura do Módulo 1 de uma só vez, o modelo da Parte II foi obrigado a fragmentar esta produção. A impossibilidade de armazenar a totalidade das unidades necessárias no Período 1 forçou o adiamento da produção principal do Módulo 1 para o Período 2.
- **Sequenciamento e Reconfigurações:** A sequência linear e eficiente da Parte I (1 → 3 → 2), que implicava apenas duas reconfigurações de linha, foi substituída por uma sequência oscilatória (2 → 1 → 3 → 2). Esta alteração resultou num aumento do número de reconfigurações de 2 para 3, evidenciando uma perda de eficiência operacional para cumprir os requisitos de *stock*.

3. Impacto Económico

As adaptações operacionais necessárias para cumprir as restrições de stock traduziram-se num agravamento dos custos globais. O valor da Função Objetivo aumentou de 561,21 € para 575,33 €, representando um acréscimo de aproximadamente 2,5%. Este aumento é justificado, primordialmente, pelos custos fixos incorridos com a reconfiguração adicional da linha, necessária para contornar a falta de capacidade de armazenagem no início do horizonte de planeamento.

Em suma, a análise comparativa demonstra que as restrições de stock máximo atuam como um fator limitante à flexibilidade da linha de montagem. A incapacidade de armazenar apenas uma unidade excedentária do Módulo 1 desencadeou uma reação em cadeia que obrigou à alteração de toda a estrutura do plano ótimo, penalizando o custo total da solução e impedindo o aproveitamento total das economias de escala associadas à antecipação da produção.

3. Análise Crítica do Impacto dos Limites de Stock

A análise da instância NM_108274 permite concluir que a introdução de limites máximos de *stock* ($Smax$) teve um impacto direto e restritivo na flexibilidade operacional da linha de montagem da SmartFab. As restrições de capacidade de armazenagem atuaram como um entrave à estratégia pura de minimização de custos, obrigando o modelo a desviar-se do ótimo global original (sem limites) para uma solução subótima em termos de *tempos de reconfiguração*, a fim de garantir a viabilidade logística. Em seguida detalha-se o impacto destas restrições nas três vertentes analisadas:

1. Antecipação da Produção

Cenário Sem Limites: O modelo privilegiou a produção da totalidade da procura do Módulo 1 logo no Período 1, gerando um *stock* final de 24 unidades. Esta estratégia permitia satisfazer toda a procura futura sem incorrer em novos custos de preparação para este módulo.

Cenário Com Limites: O limite imposto para o Módulo 1 (S_1max = 23) tornou a estratégia anterior inviável por apenas uma unidade, forçando o modelo a fragmentar a produção. Não sendo possível armazenar a totalidade das unidades necessárias no início, a produção principal do Módulo 1 teve de ser adiada para o Período 2.

A capacidade de armazém limitou a formação de lotes económicos, obrigando a um planeamento mais fragmentado e próximo do consumo, o que se revelou mais oneroso devido à perda de economias de escala nas reconfigurações.

2. Utilização da Capacidade ao Longo dos Períodos

Embora a capacidade total da linha (C_t) não tenha constituído um gargalo (não foi a restrição ativa principal), a limitação de stock alterou a distribuição temporal da carga de trabalho.

Ao impedir a concentração exclusiva da produção do Módulo 1 no primeiro período, o modelo teve de encontrar uma ocupação alternativa para a capacidade disponível em t=1. A solução encontrada foi antecipar uma pequena quantidade do Módulo 2 (2 unidades).

Isto demonstra que, perante um armazém limitado, a linha de montagem perde a "liberdade" de produzir o item que minimizaria as transições futuras. O planeamento deixa de ser guiado apenas pela eficiência produtiva e passa a ser condicionado pelo espaço disponível ("o que cabe no armazém"), resultando numa utilização da capacidade menos eficiente do ponto de vista do custo global.

3. Quantidade e Padrão das Reconfigurações

Foi nesta vertente que o impacto dos limites de stock se revelou mais severo, alterando a estrutura sequencial do plano.

Observou-se um aumento no número total de reconfigurações, passando de duas (na Parte I) para três (na Parte II). Consequentemente, a sequência de produção, anteriormente linear e eficiente (1 → 3 → 2), alterou-se para um padrão oscilatório (2 → 1 → 3 → 2). Esta modificação foi imposta pela restrição de capacidade de stock do Módulo 1 no Período 1, forçando o sistema a iniciar a produção com o Módulo 2. No entanto, dada a elevada procura pelo Módulo 1 nos períodos subsequentes, foi imperativo reconfigurar a linha para este módulo logo no Período 2. Este comportamento de alternância resultou num custo de transição adicional, que seria evitável num cenário com capacidade de armazenagem suficiente.

Síntese

Para a instância considerada, os limites de stock revelaram-se uma restrição ativa e penalizadora. A impossibilidade de armazenar apenas 1 unidade adicional do Módulo 1 (a diferença crítica entre as 24 desejadas e as 23 permitidas) desencadeou uma reação em cadeia que alterou todo o plano produtivo, elevando o custo total da solução.

Conclusão

O presente trabalho prático, desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Investigação Operacional, permitiu a aplicação de métodos de Programação Inteira na resolução de um problema complexo de escalonamento da produção para a empresa SmartFab. Através da modelação matemática e da utilização do solver LPSolve, foi possível analisar o comportamento do sistema produtivo sob diferentes conjuntos de restrições, evidenciando o papel crucial da modelação quantitativa no suporte à tomada de decisão industrial.

Na primeira fase do estudo, a formulação do modelo base (sem limites de stock) revelou uma estratégia orientada para a maximização da eficiência operacional. O plano ótimo obtido privilegiou a antecipação da produção e a formação de grandes lotes, resultando numa sequência de produção linear (1 → 3 → 2) que minimizou as reconfigurações da linha. Esta abordagem permitiu alcançar o custo mínimo global de 561,21 €, tirando partido das economias de escala e da flexibilidade de armazenamento para absorver as flutuações da procura.

A introdução das restrições de capacidade máxima de armazenamento, na segunda fase, alterou profundamente a dinâmica do problema. A análise da instância processada demonstrou a sensibilidade do modelo às limitações logísticas: o facto de o stock ideal do Módulo 1 exceder o limite físico em apenas uma unidade (24 unidades planeadas face a um limite de 23) foi suficiente para inviabilizar a solução original. Para garantir a viabilidade do plano, o modelo foi forçado a adotar uma estratégia de fragmentação da produção, resultando num padrão de sequenciamento oscilatório (2 → 1 → 3 → 2) e num aumento do número de reconfigurações. Consequentemente, o custo total da operação sofreu um agravamento de aproximadamente 2,5%, fixando-se em 575,33 €.

Em suma, a comparação entre os dois cenários permitiu quantificar o "preço da rigidez" logística. Conclui-se que, num ambiente de produção flexível, a capacidade de armazenamento atua como um buffer estratégico que permite dissociar os ritmos de produção dos ritmos de procura. Quando este buffer é limitado, o sistema perde a liberdade de otimizar os custos de reconfigurações, sendo obrigado a transferir a complexidade para o planeamento temporal da linha. Este estudo comprova, assim, que a excelência operacional não depende apenas da eficiência das máquinas, mas sim do equilíbrio sistémico entre a capacidade produtiva e as restrições logísticas, validando a Investigação Operacional como uma ferramenta indispensável para a gestão eficiente de recursos em cenários industriais.