



UNIVERSITÀ DI PISA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA DEI SISTEMI  
DEL TERRITORIO E DELLE COSTRUZIONI

RELAZIONE PER IL CONSEGUIMENTO DELLA  
LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

***Ramp-up design di una linea mixed-model  
in Automobili Lamborghini S.p.A.***

**SINTESI**

---

RELATORI

Prof. Ing. Gionata Carmignani

*Dipartimento di Ingegneria dell'Energia  
dei Sistemi del Territorio e delle Costruzioni,  
Università di Pisa*

Dott. Ing. Italo Aiello

*Automobili Lamborghini S.p.A*

Dott. Ing. Alberto Ghianda

*Automobili Lamborghini S.p.A*

IL CANDIDATO

Alessia Castiglia

[a.castiglia1@studenti.unipi.it](mailto:a.castiglia1@studenti.unipi.it)

Sessione di Laurea Magistrale del 15/06/2022

### Sommario

Lo scopo di questo elaborato è riassumere e presentare le attività condotte e i risultati raggiunti durante il percorso di tirocinio in Automobili Lamborghini S.p.A. Il principale obiettivo di questa collaborazione è stato quello di individuare le regole necessarie per determinare un corretto sequenziamento delle vetture e dei “buchi” in fase di *ramp-up*, così da garantire un giusto compromesso tra manodopera impiegata e margine di tempo a disposizione per la messa a punto del processo. Tale strategia viene ricercata per dimensionare la manodopera durante il *ramp-up* di un nuovo modello che viene introdotto in una linea *mixed-model* che produce già un modello a regime. Pertanto, si è deciso di mappare tutti i processi della funzione aziendale coinvolta, Industrial Engineering, nell’ambito del ciclo di sviluppo di un nuovo prodotto, per comprendere come questi interagiscano al fine di garantire ogni input necessario al processo di progettazione del *ramp-up*. Successivamente, quest’ultimo viene approfondito e dettagliato: in primis, vengono descritte le fasi di un classico *ramp-up* in Lamborghini per una linea single-model, allo scopo di comprendere le logiche di base e la strategia consolidata. In seguito, tali risultati e *best practice* sono applicati al caso studio di questa tesi. Dopo aver registrato l’incompatibilità fra le logiche classicamente adottate in fase di *ramp-up* e le esigenze tipiche di una linea *mixed-model*, sono state effettuate diverse valutazioni per ricercare ed identificare la strategia di sequenziamento delle vetture che garantisca il miglior compromesso tra tutte le esigenze in gioco. Infine, vengono presentati i risultati raggiunti e la strategia che si intende implementare.

### Abstract

The purpose of this paper is to summarize and present the activities carried out and the results achieved during the internship at Automobili Lamborghini S.p.A. The main objective of this collaboration was to identify the rules necessary to determine a correct sequencing of the cars and of the “holes” in the ramp-up phase, to ensure a fair compromise between the manpower and the margin of time available for the process implementation. This strategy is sought to size the manpower during the ramp-up of a new model that is introduced in a mixed-model line that already produces a fully operational model. Therefore, it was decided to map all the processes of the company function involved, Industrial Engineering, as part of the development cycle of a new product, to understand how these interact in order to ensure any necessary input to the ramp-up management process. Subsequently, the latter is deepened and detailed: first of all, the phases of a classic ramp-up in Lamborghini for a single-model line are described, in order to understand the basic logic and the consolidated strategy. These results and best practices have been applied to the case study of this thesis. After recording the incompatibility between the logics classically adopted in the ramp-up phase and the typical needs of a mixed-model line, various evaluations were carried out to research and identify the vehicle sequencing strategy that guarantees the best compromise between all needs. Finally, the results achieved and the strategy to be implemented are presented.

## 1. Introduzione e Obiettivi

In Automobili Lamborghini S.p.A., la produzione di un nuovo prodotto mostra generalmente una fase di *ramp-up*, ossia di evidente accelerazione dei volumi, durante la quale il rateo di produzione aumenta fino a raggiungere uno stato stazionario, rappresentato dalla produzione di serie. Considerando che in letteratura esistono definizioni diverse in termini di limiti cronologici di tale fase, questo elaborato considera il *ramp-up* come il lasso di tempo che intercorre tra il primo inserimento del nuovo prodotto in linea e il raggiungimento della capacità a regime. Il primo step di questo intervallo temporale consiste nel produrre le vetture Pre-Serie e Zero Serie. La loro realizzazione permette di intercettare i problemi sul prodotto, sulle tecnologie installate, sulla fornitura e qualità dei componenti, ma, soprattutto, sul processo e di risolverli prima che si avvii la produzione di serie, riuscendo così a congelare un processo robusto e consistente. Inoltre, gli operatori, non conoscendo la vettura e le operazioni di montaggio, possono sfruttare questa fase per apprendere i nuovi contenuti di lavoro in modo da diventare esperti prima che inizi la produzione a regime. In questa fase di progressivo avvicinamento alla capacità produttiva prevista a regime, la linea, progettata per poter garantire tale capacità, risulta evidentemente sovradimensionata. Pertanto, le vetture prodotte sono intervallate da “buchi”, corrispondenti a mancati inserimenti di vetture, che possono essere sfruttati per gli scopi sopra citati. Ad un quantitativo inferiore di vetture prodotte è necessario che corrisponda un adeguato livello di manodopera da prevedere in linea, ridotto rispetto a quello previsto a regime. L’obiettivo, pertanto, è quello di dimensionare la manodopera in modo da garantire il giusto compromesso tra l’efficienza e le esigenze degli enti produttivi (Produzione e Program Planning). Il caso studio presentato si concentra sulla fase di *ramp-up* di un nuovo modello inserito in una linea *mixed-model* già impegnata nella produzione di un modello a regime.

## 2. Ciclo sviluppo nuovo prodotto: i processi di Industrial Engineering

In primo luogo, considerando che il processo di progettazione del *ramp-up* riceve molti input da altri processi di Industrial Engineering (IE) coinvolti nella fase di sviluppo nuovo prodotto, si è deciso di mapparli e collocarli cronologicamente all’interno del ciclo di sviluppo nuovo prodotto in Automobili Lamborghini.

Per la gestione e il monitoraggio dello stato di avanzamento dello sviluppo di un nuovo prodotto, Automobili Lamborghini segue lo standard del gruppo Volkswagen *QPN-i, Qualification Program New part – integral*. Esso prevede di scomporre il ciclo in otto sottofasi, denominate ML (*Maturity Level*) ognuna delle quali concorre al raggiungimento di una o più milestones di progetto. Di seguito,

vengono illustrati (Figura 1) e descritti sinteticamente i processi di Industrial Engineering coinvolti nei diversi *Maturity Level*.

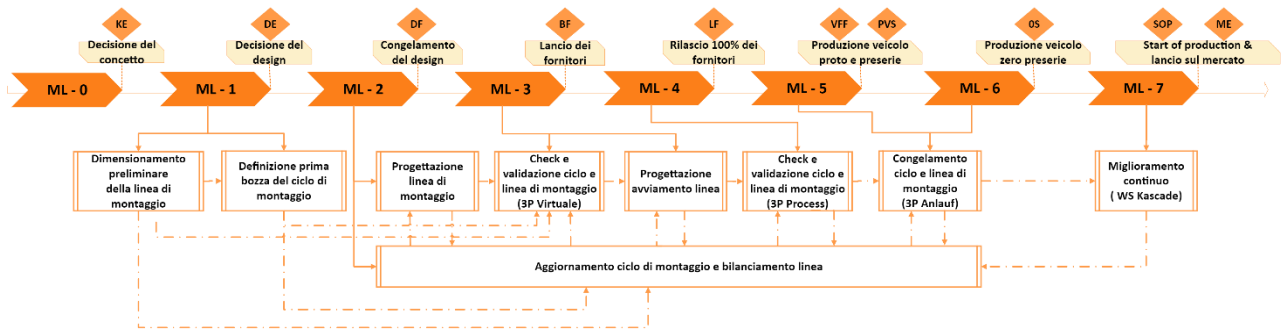


Figura 1: Ciclo sviluppo nuovo prodotto in Lamborghini - processi di Industrial Engineering.

- **Dimensionamento preliminare della linea di montaggio:** setting di tutti i valori in input necessari alla definizione del numero di stazioni (stime iniziali);
- **Definizione prima bozza del ciclo di montaggio:** definizione e valutazione dei tempi di montaggio, precedenze tecniche e vincoli per la creazione delle cartelle di lavoro;
- **Aggiornamento ciclo di montaggio e bilanciamento linea:** aggiornamento dei dati generati dai processi precedenti con informazioni reali (e non più stime);
- **Progettazione linea di montaggio:** definizione della configurazione delle stazioni di linea (layout ed elementi fisici) a partire dal ciclo di montaggio aggiornato;
- **Check e validazione del ciclo e della linea di montaggio (3P Virtuale):** simulazione virtuale del processo di montaggio per evidenziare criticità nel ciclo, nel prodotto e nel processo;
- **Check e validazione del ciclo e della linea di montaggio (3P Process):** simulazione fisica del processo di montaggio per evidenziare criticità nel ciclo, nel prodotto e nel processo;
- **Congelamento del ciclo e della linea di montaggio (3P Anlauf):** validazione delle ultime caratteristiche del processo produttivo e verifica dei punti rimasti aperti dai 3P precedenti;
- **Progettazione del *ramp-up* della linea:** definizione del sequenziamento delle vetture per ridurre l'inefficienza fisiologica caratterizzante il *ramp-up*.

### 3. Il passaggio da una linea *single-model* ad una linea *mixed-model*

Rispetto al passato, Automobili Lamborghini ha iniziato a valutare un approccio differente nella progettazione delle linee di assemblaggio, scegliendo una soluzione *mixed-model*, per tre ragioni fondamentali: le sinergie esistenti tra i futuri modelli, lo spazio insufficiente per poter realizzare due linee *single-model* e la necessità di garantire continuità produttiva tra i vecchi e i nuovi modelli.

Pertanto, seguendo questo cambio di strategia, in un primo momento è stato pianificato di realizzare una linea che produrrà un solo modello con le sue varianti, nominato X, e successivamente

ampliare la stessa linea per accogliere un secondo modello Y. In questa seconda fase, si dovrà gestire la produzione a regime della vettura X e l'avviamento del nuovo modello Y.

Rispetto al caso dell'avviamento tradizionale, in una linea *mixed-model* non si riescono ad avere tutti i buchi che si avrebbero in una linea *single-model*, in quanto la presenza del modello X, la cui produzione a regime deve essere garantita, sottrae una parte dei buchi a disposizione del modello Y. L'analisi di seguito riportata si concentra sul comprendere se sia possibile adottare le logiche tradizionalmente impiegate nell'avviamento di una linea *single-model* anche per l'avviamento di una linea *mixed-model* (assegnando tutti i buchi a disposizione al nuovo modello) o se esista una strategia alternativa che minimizzi le variabili di costo coinvolte.

#### 4. Progettazione del ramp-up della linea mixed model

Il processo di progettazione del *ramp-up* inizia quando si hanno a disposizione notizie sufficientemente attendibili sulle previsioni di vendita e una bozza del ciclo di montaggio più matura. In *figura 2* viene schematizzato, mediante un diagramma di flusso, il processo in esame.

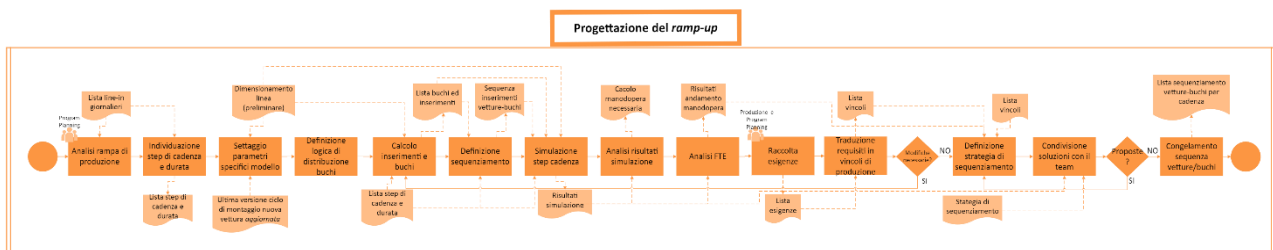


Figura 2: Diagramma di flusso del processo di progettazione del ramp-up.

L'avvio di questo processo ha inizio con la condivisione da parte di Program Planning del piano giornaliero delle vetture da produrre. L'ente IE analizza il documento per individuare quali siano i *line-in* richiesti in ogni step di cadenza e la relativa durata (impostata a 15 giorni per questioni di riservatezza), da utilizzare come input per le successive simulazioni di sequenziamento (*Tabella 1*).

In seguito, vengono definiti tutti i parametri specifici della linea *mixed-model*: alcuni di questi sono già stati impostati in fase di dimensionamento; altri, invece, vengono dettagliati in corrispondenza di questo processo, utilizzando una versione del ciclo abbastanza completa.

Per il modello X il volume produttivo raggiunto a regime è pari a 6.5 vetture/giorno, al quale si aggiungono le 15.5 vetture/giorno, richieste per il nuovo modello Y. Dato il volume complessivo giornaliero di 22 vetture, considerando i vincoli di spazio e i tempi di alcuni macchinari che rappresentano i colli di bottiglia della linea, si considera una produzione su doppio turno. Pertanto, il Takt time che ne risulta viene calcolato come segue:

Step di cadenza [vetture/giorno]	Durata step [giorni]
0,2	15
0,6	
1	
2	
3,5	
15,5	

Tabella 1: Step di cadenza per le simulazioni del modello Y.

$$Takt\ time = \frac{\text{tempo disponibile}}{\text{vetture al giorno}} = \frac{395 * 2}{22} = 35,91\ \text{minuti a vettura}$$

Di seguito, si riporta (Tabella 2) una schematizzazione riassuntiva dei dati che sono stati utilizzati per determinare il numero di stazioni, la cui la terza colonna riassume le formule necessarie per ottenerli. Gli *f-zeit* (tempo di produzione) stimati per il modello X e Y sono stati maggiorati del 5% per tenere in considerazione il tempo di set-up nel passaggio da un modello all'altro (ad esempio cambio gripper dei manipolatori o prelievo di maschere differenti). Infine, per calcolare il numero di stazioni è stato utilizzato il tempo di produzione della vettura più complessa, poiché in questa fase il bilanciamento viene effettuato basandosi sul caso peggiore. Aggiungendo, infine, una stazione di buffer e due di controllo, si ottengono le 32 stazioni che costituiscono la linea *mixed-model*.

Numero di stazioni linea <i>mixed-model</i> , modelli X e Y cad. 22 vetture/giorno			
Volume giornaliero X	vetture/giorno	6,5	input
Volume giornaliero Y	vetture/giorno	15,5	input
Tempo disponibile per operatore(BC)	min/BC/giorno	395	input
Numero di turni lavorativi	-	2	input
Takt time	min/vettura	35,9	Tempo disponibile per operatore * Numero di turni lavorativi / Volume giornaliero(X+Y)
Saturazione della linea	%	89	input
Max. numero di operatori per stazione	-	2	input
Numero medio di operatori per stazione	-	1,75	input
F-Zeit modello X (caso peggiore)	min/car	1500	input
F-Zeit modello Y (caso peggiore)	min/car	1400	input
Set-up modello X	%	5	input
Set-up modello Y	%	5	input
F-Zeit modello X rettificato	min/car	1575	F-Zeit modello X (caso peggiore) * (1+ Set-up modello X/100)
F-Zeit modello Y rettificato	min/car	1470	F-Zeit modello Y(caso peggiore) * (1+ Set-up modello Y/100)
F-Zeit medio per operatore	min/car	31,96	Takt time * Saturazione della linea
F-Zeit medio per stazione	min/car	55,93	F-Zeit medio per operatore * Numero medio di operatori per stazione
Numero teorico di stazioni	-	28,16	F-Zeit modello X (caso peggiore) rettificato / F-Zeit medio per stazione
Numero reale di stazioni	-	29	Intero superiore (Numero teorico di stazioni)
<b>Numero totale di stazioni</b>	-	<b>32</b>	<b>output</b>

Tabella 2: Dimensionamento della linea *mixed-model*

A partire dal dimensionamento iniziale della linea, è stata realizzata una prima bozza del bilanciamento che ha permesso di calcolare il numero di operatori necessari per ciascuna stazione. Gli operatori sono stati distribuiti lungo la linea di assemblaggio e nell'area dei premontaggi secondo la configurazione riportata in Figura 3. In generale, tutti gli operatori presenti in linea sono coordinati da un team leader, che può gestirne al massimo dieci. A partire da questo numero, sono stati raggruppati gli operatori e le stazioni da associare allo stesso team leader, cercando di distribuirli il più uniformemente possibile (i gruppi sono evidenziati in figura con rettangoli di colore differente). All'interno di ciascun gruppo, ogni operatore conosce il contenuto di lavoro di tutte le altre stazioni, oltre a quella che gli è stata assegnata. In fase di avviamento, questa flessibilità

permette di intercambiare gli operatori tra le varie stazioni del gruppo, richiedendo una quantità di manodopera inferiore lungo la linea.

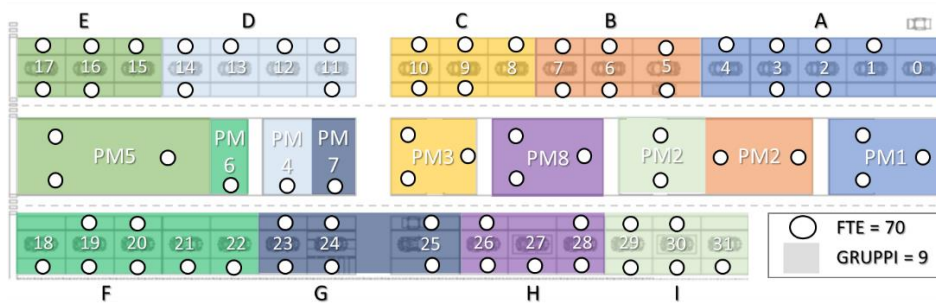


Figura 3: Distribuzione degli operatori e gruppi di stazioni

Allo scopo di configurare sin da subito la linea come a regime, il Takt time viene settato uguale a quello a regime sin dai primi step di cadenza. Tuttavia, fino a che è possibile associare almeno un buco ad ogni vettura Y (quarto step di cadenza), si produce su turno singolo.

#### 4.1 Ipotesi 1: gestione tradizionale del transitorio

Nel seguente sotto-paragrafo viene riportata l'analisi dell'avviamento del nuovo modello Y seguendo le logiche tradizionali. Esse impongono di assegnare tutti i buchi disponibili alla nuova vettura Y distribuendo uniformemente gli inserimenti previsti.

I motivi che stanno alla base di questa valutazione sono due, schematizzati in Figura 4:

- se una delle due vetture non dovesse avanzare, considerando che gli operatori sono ancora poco esperti e possono verificarsi diverse difficoltà (ad esempio legate alla fornitura e qualità dei componenti o allo scorretto funzionamento delle tecnologie), l'evento non provocherebbe il blocco della linea perché ogni vettura avrebbe a disposizione diversi buchi di margine da poter sfruttare;
- aver allontanato le vetture tra di loro (distribuzione uniforme degli inserimenti) consente di prevedere un numero inferiore di operatori per ciascun gruppo individuato (cella in verde).

Come mostrato in Figura 4, la creazione di un treno di vetture sequenziali impone un numero maggiore di operatori contemporaneamente attivi ed impedisce loro di muoversi all'interno delle stazioni del gruppo seguendo la vettura, inibendo la flessibilità precedentemente descritta.

Stazione	3,5 vetture / giorno	FTE teorici	FTE attivi (caso peggiore)
0	X	-	4
1	-	2	
2	X	1	
3	-	2	
4	X	2	3
5	-	2	
6	X	2	
7	-	1	4
8	X	1	
9	-	2	
10	X	2	
11	-	2	4
12	X	2	
13	-	2	
14	X	1	
15	-	2	6
16	X	1	
<b>Totale</b>		<b>27</b>	<b>15</b>

Stazione	3,5 vetture / giorno	FTE teorici	FTE attivi (caso peggiore)
0	X	-	7
1	X	2	
2	X	1	
3	-	2	
4	-	2	6
5	-	2	
6	X	2	
7	-	1	8
8	X	1	
9	-	2	
10	X	2	
11	-	2	6
12	X	2	
13	X	2	
14	X	1	
15	X	2	6
16	-	1	
<b>Totale</b>		<b>27</b>	<b>27</b>

Rischio blocco

Figura 4: Step di cadenza 3,5 vetture/giorno single-line. A destra con distribuzione uniforme, a sinistra senza.

#### 4.1.1 Simulazioni

Il primo step di cadenza prevede 0,2 vetture/giorno del modello Y, 6,5 vetture/giorno del modello X, Takt Time = 35,9min e line-in/giorno = 12,67. Le simulazioni effettuate imponendo la distribuzione uniforme delle vetture X e Y e l'assegnazione di ogni buco disponibile al modello Y generano una sequenza 32X-1Y-30buchi, ripetuta per tre volte nei 15 giorni dello step di cadenza. Secondo questa configurazione, la linea sarà impegnata per due giorni nella produzione delle vetture del modello X e per altri due giorni, invece, si troverà ad attendere a seguito dell'inserimento della vettura del nuovo modello Y e dei 30 buchi ad essa dedicati.

#### 4.1.2 Analisi risultati

Le simulazioni si interrompono dopo il primo step di cadenza, in quanto la strategia mostra sin da subito la sua inadeguatezza nell'applicazione ad una linea *mixed-model*. I problemi che questa simulazione ha portato alla luce possono essere raggruppati in due categorie:

- capacità produttiva giornaliera della vettura X non garantita;
- generazione in linea di un treno di vetture X, che, scorrendo lungo la linea, impone la presenza di tutta la manodopera della linea sin dal primo step di cadenza.

Pertanto, risulta necessario trovare il numero massimo di buchi che possono essere associati alla vettura Y per rispettare il vincolo di capacità e, successivamente, tra le alternative possibili, valutare quale sia il blocco di buchi Y che risolva il trade-off tra efficienza nella manodopera impiegata ed esigenze imposte da Produzione e Program Planning.

#### 4.2 Ipotesi 2: gestione ottimizzata del transitorio

Per effettuare le simulazioni di ogni step di cadenza, considerando l'aumento di complessità dell'analisi, viene utilizzato un software che effettua il sequenziamento automatico degli ordini di produzione a partire da alcune regole (*capacità, blocco buchi, vicinanza*). Poiché non è possibile impostare come funzione obiettivo la minimizzazione della manodopera, questa viene ottenuta imponendo una quarta regola (*distribuzione uniforme*). In questo modo, il programma consente di individuare il sequenziamento "vetture-buchi" che minimizzi la manodopera impiegata, rispettando i vincoli imposti. È compito dell'analista identificare come sia opportuno vincolare lo spazio delle soluzioni messo a disposizione del software, utilizzando le regole sopra citate.

#### 4.2.1 Simulazioni

A titolo di esempio, si riporta il sequenziamento generato per il primo step di cadenza con 0.2 vetture/giorno, mostrato in *figura 5*. In primis, la simulazione viene effettuata assegnando ad Y il numero massimo di buchi che consenta di rispettare la produzione giornaliera richiesta (13 buchi).



Stazione	0,2 vettura Y/ giorno	FTE teorici	FTE attivi (caso peggiore)
0	BUCO	-	
1	X	1	6
2	BUCO	2	
3	X	2	
4	BUCO	1	
5	X	2	6
6	X	2	
7	X	2	
8	X	1	5
9	X	2	
10	X	2	
11	X	2	
12	B1Y	1	6
13	B1Y	1	
14	B1Y	2	
15	B1Y	1	
16	B1Y	2	5
17	B1Y	2	
18	B1Y	1	7
19	B1Y	2	
20	B1Y	2	
21	B1Y	1	
22	B1Y	1	
23	B1Y	2	
24	B1Y	2	
25	Y	2	6
26	X	2	
27	X	1	
28	X	2	
29	X	2	5
30	X	2	
31	X	1	
<b>Totale</b>		51	51

Figura 5: Sequenziamento vetture - step 0,2 vetture Y /giorno 13 B1Y

Gli ordini di produzione generati, vengono inseriti all'interno della linea di produzione per calcolare il numero di operatori contemporaneamente attivi all'interno di ciascun gruppo nel caso peggiore. In questo caso, per garantire la capacità produttiva giornaliera, può succedere che vengano collocate 6 vetture X una di seguito all'altra. In tal modo, sarà necessario prevedere tutte la manodopera in linea, sin dal primo step di cadenza, per garantire la produzione del treno di vetture che passa per ogni blocco di stazioni. Evidentemente questa simulazione, nonostante rispetti il vincolo di capacità produttiva giornaliera, non può essere presa in considerazione per il numero di operatori che richiederebbe. Le simulazioni successive sono state effettuate considerando un numero di buchi destinati ad ogni Y (B1Y) via via inferiore (ossia, modificando una delle regole in input all'algoritmo), fino ad un minimo di un buco. In *tabella 3* vengono riportati i risultati restituiti: si noti come il numero di vetture consecutive nel caso peggiore determini il numero di FTE attivi nel caso peggiore. Lo

Cadenza 0,2 vetture/giorno		
Numero di buchi per Y (B1Y)	FTE attivi (caso peggiore)	Numero di vetture di seguito (caso peggiore)
13	51	6
12	51	6
11	51	6
10	51	6
9	48	3
8	48	3
7	38	2
6	38	2
5	38	2
4	38	2
3	38	2
2	38	2
1	38	2

Tabella 3: Valori della manodopera al variare del numero di buchi per Y - step 0,2 vetture/giorno

stesso procedimento viene applicato per ogni step di cadenza.

### 4.3 Scelta della strategia

#### 4.3.1 Raccolta delle esigenze e traduzione in requisiti

Dopo aver completato tutte le simulazioni, i risultati sono stati analizzati dall'ente Industrial Engineering e condivisi con le altre funzioni interessate, Produzione e Program Planning, durante *workshop* dedicati, per individuare la strategia d'azione. Per prima cosa, sono state raccolte le esigenze da parte di ogni ente coinvolto e trasformate nei requisiti di seguito riportati.

- **Produzione:** prevedere almeno un'ora di margine dopo ogni vettura del modello Y, per evitare un blocco della linea se questa non riuscisse ad avanzare alla stazione successiva. Questa esigenza viene tradotta in requisito attraverso un vincolo di almeno 2 buchi per ogni vettura Y negli step di cadenza da 0,2 a 3,5 (i primi cinque step, nei quali si ipotizza di riuscire a *debuggare* il processo);
- **Program Planning:** considerando possibili ritardi che si hanno nella catena di fornitura, che talvolta possono intaccare il sequenziamento pianificato degli ordini di produzione, l'esigenza è quella di non vincolare troppo la sequenza delle vetture in linea. Pertanto, il requisito è quello di

prevedere un numero di buchi per Y tale per cui un mancato inserimento non generi la richiesta di un numero superiore di operatori in linea;

- **Industrial engineering:** minimizzare, entro i limiti del possibile, l'inefficienza fisiologica della manodopera nella fase di avviamento. In particolare, il numero di buchi da associare alla vettura Y deve essere tale per cui il numero di operatori sia costante, o al massimo debolmente crescente, da uno step al successivo. Per questo motivo, la scelta del numero di buchi da associare alla vettura Y deve essere effettuata considerando il comportamento della linea in ciascuno step di cadenza. Inoltre, per evitare la creazione di un treno di vetture, sarà necessario destinare parte dei buchi disponibili alle vetture X.

#### 4.3.2 Definizione strategia di sequenziamento

Svolgendo le simulazioni sopra riportate è emersa la possibilità di individuare un numero di buchi da associare a Y differente a seconda dello step di cadenza, identificando dinamicamente l'ottimo locale piuttosto che vincolarsi ad una stessa soluzione per ogni step. Durante la scelta della strategia sono state effettuate le seguenti valutazioni:

1. In primo luogo, è stato verificato se il numero massimo di buchi tra quelli in grado di minimizzare manodopera (7 buchi, nell'esempio in *Tabella 3*) fosse sufficiente a rispettare i vincoli di Produzione (almeno 2 buchi). In questo è possibile congelare la manodopera prevista.
2. Successivamente, per selezionare il numero di buchi tra le opzioni disponibili è stato preso in considerazione vincolo imposto da Program Planning. Ad esempio, per garantire la flessibilità richiesta per lo step di cadenza in *Tabella 3*, è stato necessario assegnare ad ogni Y un numero di buchi inferiore rispetto al massimo individuato al punto 1 (5 buchi anziché 7).
3. Benché il numero minimo di buchi richiesto da Produzione rimanga lo stesso per tutti i primi cinque step di cadenza, si è cercato di garantire un margine supplementare nei primissimi step di cadenza, durante i quali il processo è molto più instabile.

Una volta selezionato il sequenziamento ottimale per ogni step di cadenza, è stato calcolato il tasso di attività della linea. Tale valore si ottiene considerando il numero di operatori attivi in corrispondenza di ogni scatto della linea ed effettuando la media aritmetica.

In *tabella 4*, viene riassunto quanto sopra esposto e viene riportato il valore del tasso medio di attività della linea, calcolato per ogni step di cadenza.

Cadenza [vetture/giorno]	Numero di buchi per Y (B1Y)	FTE attivi (caso peggiore)	Tasso medio di attività della linea [%]
0,2	5	38	70,31%
0,6	3	38	74,62%
1	2	38	78,50%
2	2	51	66,40%
3,5	2	76	59,93%
8	1*	76	88,27%
15,5	-	102	100%

Tabella 4: Tasso medio di attività della linea per ogni step di cadenza di Y.

### 4.3.3 Analisi dei risultati

In questo paragrafo vengono rappresentati graficamente i dati sopra riportati per studiarne l'andamento complessivo.

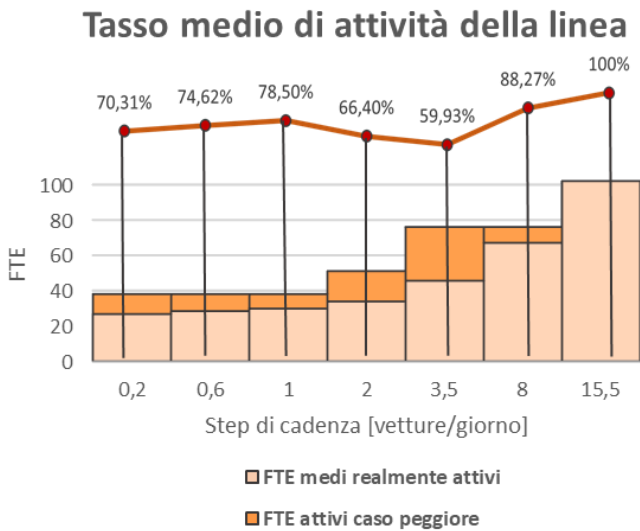


Grafico 1: Tasso medio di attività della linea.

Nella parte superiore del *grafico 1* viene riportata la curva del tasso medio di attività della linea (ottenuta da rapporto tra le due variabili), le cui percentuali si assestano intorno a valori più alti per i primi step di cadenza rispetto alla linea *single-model*. Questo perché, gli stessi operatori che assemblano la nuova vettura Y, sono impegnati nella produzione di tutte le vetture X, che saturano la linea. Nel caso della linea *mixed-model*, per quantificare il beneficio derivante dalla strategia dei buchi dedicati a Y sopra riportata, viene calcolato il *saving* di manodopera rapportandola al caso estremo in cui non fosse previsto alcun adeguamento della manodopera alla fase di *ramp-up*.

$$Saving\ manodopera = 1 - \frac{FTE\ (strategia\ mista\ dei\ buchi)}{FTE\ (regime)}$$

Osservando il *grafico 2*, si nota come il valore del *saving* raggiunto per ogni step di cadenza (curva in arancione) non ecceda mai 25,49%. Per i primi tre step di cadenza e per il penultimo, tale valore coincide con il massimo raggiungibile (quello ottenibile considerando di rispettare la capacità giornaliera di entrambi i modelli e non prendendo in considerazione i vincoli imposti dagli altri enti). Per gli altri step di cadenza, invece, si è scelto di selezionare una soluzione che non massimizza in termini assoluti il *saving* ottenuto, ma che garantisce il numero minimo di buchi associati ad ogni vettura Y (pari a due).

Nel *grafico 1* si confronta l'andamento del numero medio di operatori realmente attivi e di quelli attivi nel caso peggiore per ciascuno step di cadenza. Si nota come, le barre delle due variabili non siano così distanti tra loro e l'unica differenza più evidente tra le due si abbia in corrispondenza del passaggio al doppio turno, in quanto l'aumento della manodopera richiesta non è assecondato da un proporzionale aumento del numero di vetture prodotte.

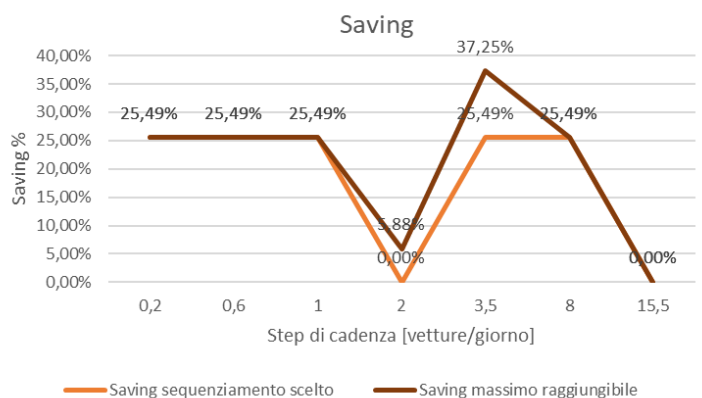


Grafico 2: Saving di manodopera.

Il saving medio giornaliero percentuale raggiunto è pari a:

con  $N=6$ ,

$$\text{Saving medio giornaliero (\%)} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i * s_i}{\sum_{i=1}^N d_i} = 18,2\%$$

$d_i$  = durata  $i$ -esimo step di cadenza,

$s_i$  = saving ottenuto all'  $i$ -esimo step di cadenza

Da notare che, tale percentuale non corrisponde a quella reale in quanto, per questioni di riservatezza, l'esempio riportato in questo elaborato considera step di cadenza di uguale durata, pari a 15 giorni. In un caso reale questa condizione non si verifica e la durata dei diversi step di cadenza deve essere inclusa all'interno del calcolo del saving medio %.

Un altro indicatore che viene misurato è legato alle ore di manodopera mediamente assorbite da una vettura. Il valore target viene calcolato considerando gli FTE teorici e il numero di vetture previste a regime, quando la saturazione della manodopera sarà massima. In *Tabella 5* vengono confrontati i valori effettivi per ogni step di cadenza con quello target. La differenza è espressa in maniera equivalente dall'inefficienza in ore, per ogni step di cadenza, dal tasso di insaturazione della manodopera e dalla numero di operatori in eccesso rispetto a quelli giustificati dai volumi prodotti.

Step di cadenza [vetture/giorno]	Step di cadenza X [vetture / giorno]	Ore/vettura target [h]	Ore/vettura cad i [h]	Inefficienza [h]	Tasso di insaturazione manodopera [%]	Manodopera in eccesso [n.op.]
0,2	6,5	37,09	45,37	8,28	18,25%	6,94
0,6	6,5		42,82	5,73	13,37%	5,08
1	6,5		40,53	3,44	8,49%	3,23
2	6,5		48,00	10,91	22,73%	11,59
3,5	6,5		60,80	23,71	39,00%	29,64
8	6,5		41,93	4,84	11,54%	8,77
15,5	6,5		37,09	-	-	-

Tabella 5: Confronto tra valore target e valori reali per ogni step di cadenza

## 5. Conclusioni

Pertanto, è emerso come un'adeguata strategia di sequenziamento come quella individuata consenta di ottenere un *saving* per l'intero periodo. Si osservi come, tuttavia, particolare attenzione dovrà essere dedicata al numero ridotto di buchi a disposizione della nuova vettura: il sequenziamento adottato, pur minimizzando l'impiego di risorse in fase di avviamento, rende la linea maggiormente esposta al manifestarsi di problemi nell'assemblaggio della nuova vettura. Ogni problematica che dovesse verificarsi non dovrà in nessun caso intaccare la capacità della linea di rispettare la cadenza prevista per la vettura a regime. Dopo aver progettato il *ramp-up*, il prossimo passo per Automobili Lamborghini S.p.A consisterà nel gestire la produzione a regime delle due vetture attraverso un adeguato bilanciamento della linea e sequenziamento delle vetture secondo le logiche del *mix-model*.