

# Efecto del tamaño del portafolio sobre el inventario agregado: Un caso de estudio

LUCAS D. BETANCOURT L.

Universidad EAFIT  
lbetanc7@eafit.edu.co

## Resumen

*Al momento de tomar decisiones sobre aumentar o disminuir el tamaño del portafolio de productos de una compañía manufacturera es importante entender cual será el impacto sobre el inventario agregado, para establecer si los ingresos adicionales que las nuevas referencias generen son menores a los costos adicionales de producirlas. En este trabajo se presenta un análisis cuantitativo sobre el comportamiento del portafolio a medida que se incrementa la cantidad de referencias a producir en una línea de producción de sartenes y ollas antiadherentes. Una vez establecido un orden de importancia de las referencias que se producen en la línea de producción usando una clasificación ABC multicriterio, se utiliza un modelo de cantidad económica de lotes a producir con el fin de establecer la diferencia marginal entre ingresos y costos para múltiples escenarios. De esta manera se logra establecer de manera empírica el punto en el cual la diferencia de estas dos variables llega a cero. Para el caso estudiado el tamaño óptimo del portafolio se alcanza con las 104 referencias más relevantes de las 129 que producen, usando 83.63 % de ocupación de la línea al año.*

**Palabras clave:** *Inventario, ELSP, portafolio de productos, factor de congestión.*

## 1. Introducción

En este trabajo se aborda el problema de la definición del tamaño del portafolio de productos fabricados en un mismo sistema productivo; es decir, un sistema de producción en el cual todas las referencias son fabricadas por el mismo recurso (i.e., máquina, línea de producción, planta, etc.), y donde para iniciar la fabricación de cada referencia es necesario incurrir en un tiempo de alistamiento del recurso que no es despreciable. En este contexto, identificar el tamaño adecuado del portafolio es un problema relevante en la medida en que esta decisión tiene implicaciones directas sobre el desempeño comercial y financiero de la empresa.

Por un lado, un portafolio amplio hace posible llegar a un mercado mayor, en la medida en que permite satisfacer una mayor cantidad de necesidades, lo cual a su vez se traduce en una mayor cantidad de unidades

ventas, y por ende en mayores ingresos. Sin embargo, lo anterior puede impactar negativamente los costos de operación; en particular aquellos asociados al mantenimiento de los niveles de inventario agregado necesarios para que el sistema opere. Adicionalmente un portafolio amplio puede ocasionar mayores costos asociados a la pérdida de productividad del sistema de manufactura como consecuencia de una mayor cantidad de tiempo invertido en llevar a cabo los cambios de referencia. Como agravante, la ineficiencia operativa que ocasiona sostener altos niveles de inventario puede afectar negativamente el flujo de caja, el margen neto y las utilidades de la compañía.

Por otra parte, un portafolio reducido en la mayoría de casos tiene como consecuencia que se limita el mercado objetivo, tanto en términos de cantidades vendidas como de segmentos; lo cual aumenta la dependencia de productos específicos (principio de Pareto), y se puede ser más vulnerable ante cambios drásticos en el comportamiento del mercado. Desde el punto de vista de la cadena de abastecimiento, un portafolio de tamaño controlado trae beneficios, tales como una alta eficiencia en los procesos de fabricación asociada a menores tiempos de cambio de referencia, un menor costo asociado al mantenimiento de los inventarios, y la facilidad en la gestión y la planeación de la producción.

Para determinar el impacto económico de las decisiones que implican cambios en el tamaño del portafolio, en este trabajo se propone utilizar el modelo de Lote Económico de Producción, conocido en la literatura como el ELSP (i.e., *Economic Lot Sizing and Scheduling Problem*), propuesto en [11], el cual permite calcular los tamaños de lote de fabricación y por ende, estimar el inventario agregado en el sistema. Tomando este modelo como base, se plantea el problema de estimar el costo marginal asociado a la decisión de introducir una nueva referencia al mercado, para de esta manera determinar, con base en un soporte teórico, las referencias para las cuales el beneficio marginal de introducirlas al portafolio es mayor al costo marginal que implica su incorporación al mismo. Para este análisis el costo marginal asociado a incluir una referencia en el portafolio solo tendrá como base el costo asociado al incremento en el inventario agregado que esta nueva referencia ocasiona.

Este estudio aborda el problema descrito anteriormente a través de un estudio de caso para la línea de ollas y sartenes antiadherentes de una compañía local (Medellín, Colombia). Todas las referencias o *SKUs* (*stock keeping units*) que se producen usan el mismo recurso (máquina). Esta línea de producción tiene una cantidad de cambios de sku's significativos (y de tiempos de setup asociados), debido al alto número de productos que se hacen en la misma.

## 2. Revisión de Literatura

### 2.1. Literatura asociada al portafolio de productos

Entre los estudios publicados que abordan el problema de determinar qué tipo de producto se debe incluir en el portafolio, se encuentra la referencia [7], en la cual los autores proponen usar análisis de datos para plantear una plataforma modular que determine en qué productos se debe enfocar el equipo de investigación y desarrollo al momento de elegir tanto los nuevos productos como los que deben ser retirados o modificados, teniendo en cuenta tres factores a los cuales llama dimensiones, que son: requerimientos de los clientes, funcionalidades de los productos y solución técnica. A su vez los autores en [8] plantean que el desarrollo de nuevos productos, dentro del concepto de innovación abierta (OI por sus siglas en inglés) se divide en dos etapas, la primera es el “OI desarrollo céntrico” y la segunda es el “OI comercialización céntrica”, para sustentar el modelo propuesto se basan en un análisis estadístico de datos recopilado de 239 empresas de alimentos. Estos estudios se enfocan en el posible éxito comercial que tendrán los nuevos productos, pero no hacen mención sobre el impacto de los mismos sobre los costos de cadena de abastecimiento.

Si bien estos estudios no abordan el problema a tratar en el caso de estudio, se hace mención para ilustrar que a lo largo de este trabajo no se encontró en la literatura consultada ningún estudio que evalúe el impacto de aumentar o disminuir el tamaño de portafolio en los costos asociados a la cadena de abastecimiento. La única publicación que aborda indirectamente el problema del tamaño del portafolio es la referencia [1], en la cual el autor plantea que aumentar el portafolio de productos puede tener un efecto contrario al esperado en términos de ingresos. El autor afirma que el número de productos no afecta al principio de Pareto, además insiste en que hay que hacer revisiones periódicas para determinar qué productos del portafolio deben entrar y salir.

### 2.2. Literatura asociada al modelo ELSP y sus variantes

Los autores de [9] desarrollaron un modelo no lineal de ELSP para determinar la secuencia de producción de  $n$  productos para una línea de  $m$  estaciones, con un horizonte de planeación determinado y parámetros constantes. Con el fin de determinar el menor tiempo de ciclo para cada programación de la producción minimizando los costos de setup, inventario de producto en proceso y producto terminado.

Para una línea de una sola maquina multi-producto, en [2] se presenta un modelo capaz de maximizar el tiempo antes de que se presente un faltante (i.e., *stockout*), el cual entrega una secuencia de producción determinada. El modelo da información anticipada a los gerentes de manufactura para identificar posibles situaciones de stock-out dándole herramientas de detección para los momento de bajos niveles inventario.

El modelo heurístico de tecnología de grupo integrado con ELSP o GT-ELSP propuesto en [13] el cual realiza una agrupación por productos, usa el concepto de tamaño de lote que varía con el tiempo igualando los tiempos ociosos en cada grupo, con el fin de iterar n veces hasta encontrar el ciclo menos costoso.

La publicación presentada en [12] describe el desarrollo de una hoja de cálculo que usando como principio ELSP aplica un modelo de programación y planeación de la producción con restricción de recursos o modelos productivos en los que solo se puede realizar un producto a la vez por célula de trabajo para múltiples plantas, en este muestra ahorros por US\$ 820,000 por año.

los investigadores de [10] usan la herramienta MATLAB con el fin de programar un modelo para un problema de programación de lote económico, el cual tenga en cuenta un inventario mínimo de cada referencia con el fin de prevenir un stockout ya que plante que los ELSP tradicionales permiten que las referencias lleguen a cero cada ciclo.

En el trabajo de grado [15] se presentan tres modelos matemáticos que optimizan el tamaño del portafolio para tres diferentes aplicaciones. Los primeros dos modelos son aplicados a portafolios de productos financieros (acciones), y en el tercer modelo se aplica al tamaño de portafolio de productos que una compañía ofrece a grandes superficies, usado un modelo ELSP para optimizar los costos totales en los que incluye costos de transformación, de materias primas y de transporte, bajo diferentes políticas de envío.

Para la investigación presentada en [3] se desarrolló un modelo analítico con el fin identificar el máximo tiempo en el cual se presentaría un desabastecimiento variando el orden de producción de las referencias de una línea de producción, esto con el fin de entregar herramientas de detección temprana con el fin de prever un posible stockout y poder sostener niveles de servicio deseados.

La elaboración del modelo de programación lineal estocástico de enteros mixtos (SILP) presentada en [5], para determinar la cantidad de referencias a producir que maximice el valor económico generado de una compañía (EVA). Cabe resaltar que dentro de la definición de las variables que intervienen en el modelo se dejaron constantes la cantidad de referencias que se producen,

es decir, no se buscó optimizar el tamaño del portafolio, ya que, plantean, este depende de las decisiones de las diferentes áreas de cada empresa, tales como mercadeo, ventas y producción, además indica que cada dependencia usa diferentes argumentos para aumentar o disminuir el portafolio, sin hacer una alusión cuantificada al impacto económico.

En otro estudio, [14] muestra una adaptación del modelo estocástico de tamaño de lote capacitado (SCLSP) con demanda aleatoria y reprocesos, con el fin de determinar el tamaño de los lotes de materia prima a utilizar, dependiendo de la fuente de la cual proviene (materia prima reutilizada o materia prima virgen) con base en la disponibilidad de los insumos de cada una de las fuentes y con una demanda desconocida. El sistema estudiado tiene capacidad dinámica multiproducto y se consideró un sistema estocástico. Usaron el modelo SCLP debido que la demanda es incierta y soportan en su revisión bibliográfica que para problemas de tamaño de lotes con una demanda conocida se debe usar modelos ELSP.

la investigación desarrollada en [6] incluye dentro de su modelo ELSP, los costos energéticos de la línea de producción como variable a minimizar, en conjunto con la suma del total de cambios de referencias y tamaño del inventario. En una segunda fase determina los momento en los que debe prender o apagar la máquina durante los periodos de cambio de referencia, encontrando una disminución que llama “notable” en los costos de energía de la compañía manteniendo los niveles de servicio esperados.

Cabe resaltar que en las menciones anteriores no hay una determinación explícita de cuál es el impacto de incrementar o decrecer el portafolio de productos, ni presentan modelos para valorar económicamente lo anterior. A su vez se presenta una cantidad considerable de casos de éxito y asertividad del los modelos desarrollados en [11] para diferentes casos de estudio, lo que indica las fortalezas teóricas del modelo que se usa en este trabajo.

### 3. Método

El enfoque propuesto toma como base el modelo de lote económico de [11] aplicado a una conjunto de escenarios, que varía desde un escenario con portafolio de tamaño dos (a saber, las dos referencias más relevantes), y en cada escenario se va aumentando una referencia (aquella que le sigue en relevancia), a fin de perfilar el tamaño del portafolio y la diferencia entre ventas marginales y costos marginales para cada conjunto a medida que se incrementa cada sku. La relevancia de las referencias se realiza con base en una clasificación ABC multicriterio propuesta en [4].

### 3.1. Recolección de información

La información considerada para cada sku  $i = 1, \dots, I = 129$  que se producen en la línea, se muestra a continuación en Tabla 1, con sus consideraciones asociadas al modelo ESLP.

**Tabla 1:** Variables calculadas de acuerdo con la información de línea para el año 2015 de la compañía caso.

Variable	Descripción	Símbolo	Unidades
Tasa de demanda	Demanda de un sku $i$ que se produce en la línea de antiadherentes de la compañía.	$\delta_i$	<i>uni/año</i>
Costo total	Costo anual de inventario asociado a cada $sku_i$	$C_{Total}$	$\$/año$
Ventas totales	Volumen de ventas en dinero del sku $i$	$V_i$	$\$/año$
Tiempo de alistamiento	Es el tiempo de alistamiento asociado a la producción de un sku $i$ . Este tiempo es independiente de la secuencia de producción.	$S_i$	<i>Minutos</i>
Tasa de rendimiento	Es la tasa de rendimiento de producción o velocidad de producción.	$\rho_i$	<i>uni/año</i>
Tasa de calidad promedio	Es el porcentaje de unidades producidas a conformidad para comercialización para cada $sku_i$	$k_i$	%

Fuente: Elaboración propia, de acuerdo con [11]

Esta información permite la construcción de los escenarios, tanto desde el punto de vista del cálculo asociado a la diferencia marginal entre ventas y costos para cada escenario  $n$ , como desde las consideraciones técnicas mínimas razonables para el tiraje de los lotes mínimos por cada referencia.

### 3.2. ABC multicriterio

Con las variables definidas en 3.1 para cada  $sku_i$  se estableció un orden teórico de producción de los mismas, a fin de obtener los resultados de costo del inventario agregado promedio, ventas totales, y margen total <sup>1</sup>. Este orden implica la priorización de cada referencia para producción, y

<sup>1</sup>Es la diferencia entre ventas para cada referencias y el costo de producción de las misma en el periodo evaluado (año 2015)

de este modo evaluar cada escenario, primero produciendo la referencia de mayor relevancia (escenario 0), luego produciendo la primera y segunda en relevancia (escenario 1), y así sucesivamente añadiendo una referencia hasta agotar los que la compañía produce en la línea, e identificar el escenario de margen total conjunto máximo, que corresponde al tamaño óptimo de portafolio, garantizando la inclusión de aquellos sku's que logran una mejor combinación entre factores razonables para la rentabilidad.

Para establecer la priorización se usó el método propuesto por [4] de clasificación ABC multicriterio. Los  $j = 1, \dots, J = 3$ , criterios seleccionados fueron: 1) la tasa de demanda ( $\delta_i$ ), 2) las Ventas Totales ( $V_i$ ) y 3) el Margen Total ( $M_i$ ) de cada uno de las referencias, ya que son las variables que impactan de manera más significativa la rentabilidad, de acuerdo con la disponibilidad de información que se tuvo por parte de la compañía. Estos criterios deben tener una importancia relativa entre ellos,  $w_j$ , y así dimensionar el nivel de contribución al resultado final de priorización, y son de 0.3 (30%), 0.3 (30%) y 0.4 (40%), sumando 1 (100%), que es el total de la decisión. De acuerdo con lo anterior, sea  $y_{ij}$  el valor real del criterio  $j$  para el sku  $i$ ;  $yn_{ij}$  el valor normalizado de cada criterio  $j$  para cada  $sku_i$ , y está definido como la proporción entre su distancia frente al menor valor del mismo criterio y el rango de valores totales del criterio:

$$yn_{i,j} = \frac{y_{i,j} - \min_{i=1,2,\dots,I}\{y_{i,j}\}}{\max_{i=1,2,\dots,I}\{y_{i,j}\} - \min_{i=1,2,\dots,I}\{y_{i,j}\}} \quad (1)$$

Con los valores normalizados,  $P_i$  es el puntaje total de cada referencia con base en los criterios evaluados.<sup>2</sup>

$$P_i = \sum_{j=1}^I (w_j yn_{i,j}) \quad (2)$$

Esta es una medida relativa que permite priorizar las referencias a producir, y ordenándolos de mayor a menor se define el orden teórico de producción, lo cual ha sido aplicado a los 129 sku's del caso de aplicación.

### 3.3. Problema de programación económica de lotes (ELSP)

#### 3.3.1. Modelo

Una vez definido el orden teórico de producción de cada uno de los sku's, se plantea el problema de programación económica de lotes. Para ello se usó

<sup>2</sup>En el artículo original, lo que aquí se denomina  $P_i$  se define como "PuntajeTotal", sin hacer distinción formal entre elementos.

una variación del modelo propuesto por [11], en el cual se considera el orden de producción como factor relevante del problema.

El modelo se corre para todos los escenarios establecidos en orden ascendente para cada referencia de acuerdo con la priorización realizada con base en subsección 3.2, es decir, el escenario 1 incluye los dos primeros sku's según la clasificación ABC, el escenario 2 tiene en cuenta los 3 primeros, y así sucesivamente hasta que el ultimo escenario abarca las 129 referencias existentes. Sea entonces, para cada  $sku_i$ , con base en las variables definidas en 3.1:

- $\delta'_i$ : Es la tasa de demanda ajustada, la cual es tasa de demanda dividida por el factor de calidad  $k_i$ ,  $\delta'_i = \delta_i/k_i$ .
- $TC$ : tiempo de ciclo. Es el tiempo que transcurre entre que se empieza a producir la primera unidad del primer sku hasta que se produce la unidad final del último sku y la línea está disponible para empezar un nuevo ciclo de producción.
- $Q_i$ : tamaño económico de lote a producir del  $sku_i$ .
- $t_i$ : tiempo de producción del lote.
- $c$ : factor de congestión, o porcentaje de ocupación de la línea.

Partiendo de las definiciones anteriores, se procede a mostrar el modelo en abstracto:

El tamaño de lote económico a producir es:

$$Q_i = \delta'_i(TC) \quad (3)$$

Tiempo de producción del lote, se expresa como:

$$t_i = Q_i/\rho_i \quad (4)$$

La expresión para el factor de congestión es:

$$c = \sum_{i=1}^I \frac{\delta'_i}{\rho_i} \quad (5)$$

El tiempo de ciclo se define entonces como la sumatoria de todos los tiempos de producción sumado a todos los tiempos de setup o alistamiento:

$$TC = \sum_{i=1}^I t_i + \sum_{i=1}^I S_i \quad (6)$$

Reemplazando ecuación (4) en ecuación (6):

$$TC = \sum_{i=1}^I \frac{Q_i}{\rho_i} + \sum_{i=1}^I S_i \quad (7)$$

Reemplazando ecuación (3) en ecuación (7) y despejando el tiempo de ciclo:

$$TC = \frac{\sum_{i=1}^I S_i}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{\delta'_i}{\rho_i}} \quad (8)$$

Reemplazando la fórmula de ecuación (5) en ecuación (8):

$$TC = \frac{\sum_{i=1}^I S_i}{1 - c} \quad (9)$$

Por último se obtiene reemplazando la fórmula ecuación (3) en ecuación (9):

$$Q_i = \delta'_i \left( \frac{\sum_{i=1}^I S_i}{1 - c} \right) \quad (10)$$

Una vez calculados los tamaños económicos de lote para cada referencia, se calcula el costo de cada escenario, entendido como: costo promedio del inventario agregado; ingresos por ventas, y la diferencia arroja el margen total. En este modelo, que es de carácter académico.

### 3.3.2. Supuestos y Parámetros

Es preciso asumir los siguientes supuestos y parámetros:

- Cada lote de una referencia sale completo, no fraccionado, y no se vuelve a fabricar hasta que se cumpla el tiempo de ciclo. Lo que determina que el inventario promedio cumple la siguiente expresión  $I_i = \frac{\delta'_i}{2}$ .
- La demanda de cada referencia es constante y la disponibilidad dura lo que dura el tiempo de ciclo. Es decir, en el tiempo de ciclo todo lo que se produce es vendido.
- De acuerdo con información de la compañía, la tasa de calidad promedio se estableció en 98.9%, y es aplicable para todas las referencias objeto del estudio.

- La base de cálculo usada para el tiempo de ciclo  $TC$  fue la siguiente: turnos de 7.25 horas (turno de producción), un turno por día, seis días por semanas y 50 semanas por año, para un total de 2,175 horas/año.
- En el modelo propuesto en [11] para este tipo de casos, la capacidad de producción siempre tiene que ser mayor a la demanda, condición que se cumple en este caso de estudio.

## 4. Resultados y Análisis

Por términos de confidencialidad, los valores presentados que hacen referencia al volumen de producción, a costos o a márgenes, se presentan como valores normalizados dentro del rango de los valores aplicables en el año 2015.

### 4.1. Clasificación multicriterio

En la tabla 2 se muestra un esquema del orden teórico en el cual se deben producir cada referencia arrojado por la clasificación ABC.

**Tabla 2:** *Clasificación ABC (detalle).*

$i(sku)$	$\delta_i$	$V_i$	$M_i$	$P_i$
1	1,00009	1,00008	0,50820	0,80333
2	0,28325	0,36314	0,99138	0,59047
3	0,23465	0,25619	0,86015	0,49131
4	0,06467	0,19108	0,72284	0,36586
5	0,07075	0,21717	0,55065	0,30664
6	0,09643	0,14835	0,57221	0,30232
7	0,08048	0,13683	0,47117	0,25366
8	0,02948	0,14274	0,39705	0,21049
9	0,11726	0,17727	0,3048	0,21028
10	0,08505	0,13323	0,27653	0,17610
127	0,00692	0,00709	-0,0086	0,00076
128	0,00018	0,00035	0,00086	0,0005
129	0,00009	0,00008	0,00013	0,0001

La Figura 1 muestra una forma de pareto invertido como consecuencia de la normalización asociada a los puntajes, en esta se observan el puntaje  $P_i$  para todas las referencias.

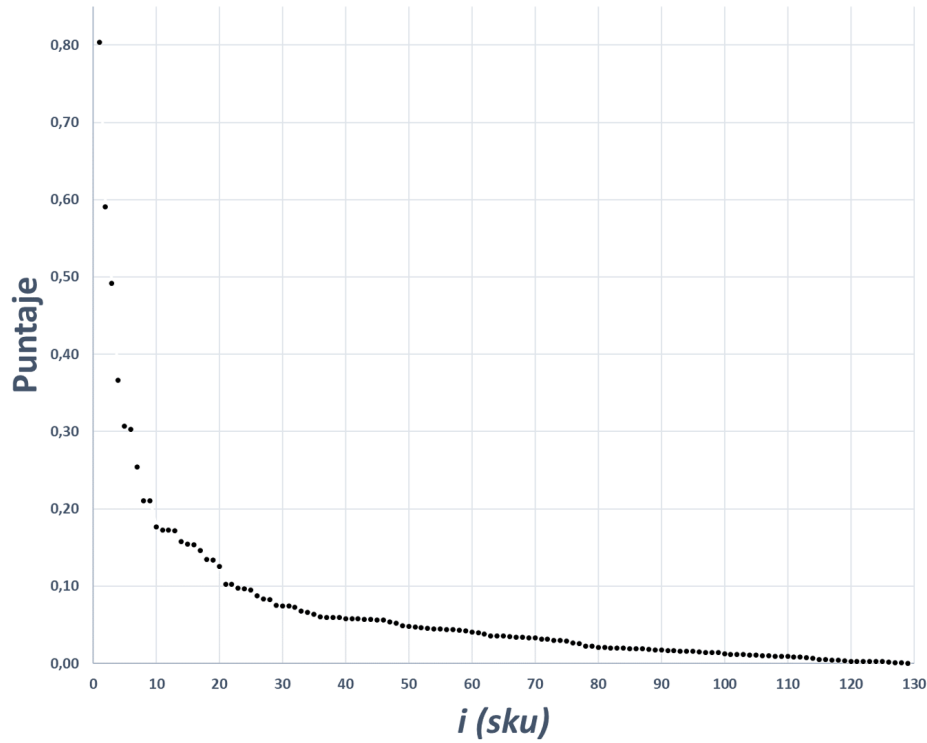


Figura 1: Puntaje por sku bajo priorización multicriterio

## 4.2. Desarrollo del modelo, revisión y análisis

### 4.2.1. Desarrollo del Modelo

A continuación se presenta el desarrollo del modelo para los escenarios de tamaño de portafolio 10 y tamaño de portafolio 11. en la tabla 3 se presenta la información necesaria para calcular el tiempo de ciclo, los tamaños de lote y el inventario promedio para cada  $SKU$ , y proceder a calcular el costo del inventario agregado para ambos escenarios, con el fin cuantificar el efecto de incluir la undécima referencia en el tiempo de ciclo, el factor de congestión, y el inventario agregado

- **Escenario  $n = 10$ :** Cálculo del tiempo de ciclo  $TC = \frac{0,00218391}{1-0,29029229} = 0,003077198$  años, continuado con el calculo de la cantidad de unidades a producir de cada  $SKU$ :  $Q_1 = (0,003077198)(57686) = 178$ ,  $Q_2 = (0,003077198)(16338) = 50$ ,  $Q_3 = (0,003077198)(13535) = 42$ ,  $Q_4 = (0,003077198)(3731) = 11$ ,  $Q_5 = (0,003077198)(4081) = 13$ ,

**Tabla 3:** Datos de las primeras 11 referencias

$sku_i$	$K_i$	$\delta_i$	$\delta'_i$	$S_i(\text{años})$	$*S$	$\mathbf{c}$	$*c$
1	0,989	57051	57686	0,00034483	0,00034483	0,06630575	0,06630575
2	0,989	16158	16338	0,00011494	0,00045977	0,06009379	0,12639954
3	0,989	13386	13535	0,00011494	0,00057471	0,01743134	0,14383088
4	0,989	3689	3731	0,00034483	0,00091954	0,02171395	0,16554483
5	0,989	4036	4081	0,00034483	0,00126437	0,02375091	0,18929574
6	0,989	5501	5563	0,00011494	0,00137931	0,02046161	0,20975735
7	0,989	4591	4643	0,00011494	0,00149425	0,0170777	0,22683505
8	0,989	1682	1701	0,00022989	0,00172414	0,01663977	0,24347482
9	0,989	6689	6764	0,00011494	0,00183908	0,01862207	0,26209688
10	0,989	4852	4906	0,00034483	0,00218391	0,0281954	0,29029229
11	0,989	6772	6848	0,00011494	0,00229885	0,01885333	0,30914561

\*Representa los valores acumulados para el tiempo de alistamiento y el factor de congestión.

$Q_6 = (0,003077198)(5563) = 17$ ,  $Q_7 = (0,003077198)(4643) = 14$ ,  
 $Q_8 = (0,003077198)(1701) = 5$ ,  $Q_9 = (0,003077198)(6764) = 21$ ,  
 $Q_{10} = (0,003077198)(4906) = 15$ . Para estas cantidades a producir el inventario promedio de cada referencia es  $I_1 = 82$ ,  $I_2 = 23$ ,  $I_3 = 20$ ,  $I_4 = 5$ ,  $I_5 = 6$ ,  $I_6 = 8$ ,  $I_7 = 7$ ,  $I_8 = 2$ ,  $I_9 = 10$ ,  $I_{10} = 7$ . Lo que representa un costo de producir todas las referencias para este escenario de  $C_{Total} = 1,569,9$  Millones de pesos y un factor de congestión del 29 %.

- **Escenario  $n = 11$ :** Cálculo del tiempo de ciclo  $TC = \frac{0,00229885}{1-0,30914561} = 0,003327546$  años, continuado con el calculo de la cantidad de unidades a producir de cada  $SKU$ :  $Q_1 = (0,003327546)(57686) = 191$ ,  $Q_2 = (0,003327546)(16338) = 54$ ,  $Q_3 = (0,003327546)(13535) = 45$ ,  $Q_4 = (0,003327546)(3731) = 12$ ,  $Q_5 = (0,003327546)(4081) = 13$ ,  $Q_6 = (0,003327546)(5563) = 18$ ,  $Q_7 = (0,003327546)(4643) = 15$ ,  $Q_8 = (0,003327546)(1701) = 5$ ,  $Q_9 = (0,003327546)(6764) = 22$ ,  $Q_{10} = (0,003327546)(4906) = 16$ ,  $Q_{11} = (0,003327546)(6848) = 22$ . Para estas cantidades a producir el inventario promedio de cada referencia es  $I_1 = 89$ ,  $I_2 = 25$ ,  $I_3 = 22$ ,  $I_4 = 6$ ,  $I_5 = 6$ ,  $I_6 = 9$ ,  $I_7 = 7$ ,  $I_8 = 2$ ,  $I_9 = 11$ ,  $I_{10} = 7$ ,  $I_{11} = 11$ . Lo que representa un costo de producir todas las referencias para este escenario de  $C_{Total} = 1,665,8$  Millones de pesos y un factor de congestión del 30 %.

Al comparar los escenarios anteriores, se puede cuantificar el efecto sobre las  $TC$ ,  $C_{Total}$  y  $c$  los cuales se incrementan en un 8,14 %, 6,11 % y 15,02 %

respectivamente.

#### 4.2.2. Revisión y análisis

Para los  $n = 1, \dots, N$  escenarios, donde  $n$  es el número de referencia incluida de acuerdo con la priorización multicriterio, se puede observar en la tabla 4 y la Figura 2, que el aumento en el tiempo de ciclo a medida que se incluyen referencias tiene comportamiento exponencial.

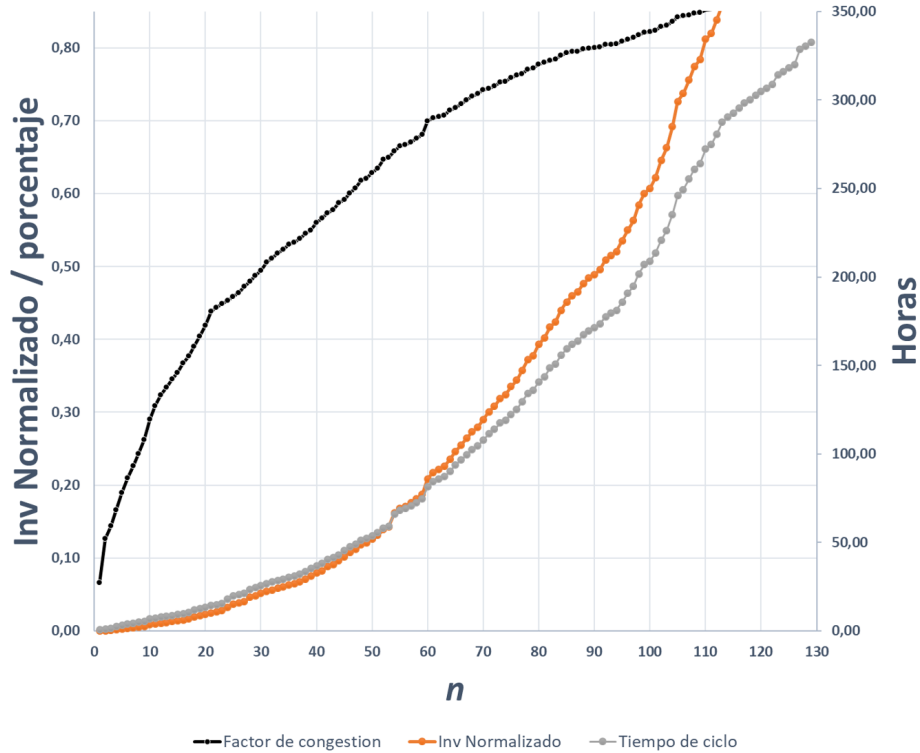
**Tabla 4:** *Tiempo de ciclo acumulado, expresado en horas, turnos y semanas.*

<b>n</b>	<b>Horas</b>	<b>turnos</b>	<b>Semanas</b>
1	0,80	0,11	0,02
2	1,14	0,16	0,03
3	1,46	0,20	0,03
4	2,40	0,33	0,06
5	3,39	0,47	0,08
6	3,80	0,52	0,09
7	4,20	0,58	0,10
8	4,96	0,68	0,11
9	5,42	0,75	0,12
10	6,69	0,92	0,15
127	328,69	45,34	7,56
128	330,58	45,60	7,60
129	332,44	45,85	7,64

De acuerdo con lo anterior, para producir solo el 70% de las referencias actualmente disponibles se necesitaría un mes completo de disponibilidad de planta. Cabe aclarar que durante este tiempo no sería posible montar referencias diferentes a las programadas sin incurrir en gastos extras; además, de hacerlo la probabilidad de incumplir pedidos puede aumentar significativamente.

En la Figura 2 se observa, el comportamiento de inventario promedio agregado (suma total del inventario promedio de cada una de las referencias  $i$  para cada escenario  $n$ ), tiene un comportamiento exponencial, tanto en unidades como en costo del inventario. En pocas palabras, lo que se puede observar y cuantificar calculando los tiempos de ciclo, cantidades a producir e inventario agregado, es que a medida que aumenta el portafolio de referencias, disminuye la capacidad de producción de la línea, y hay un incremento ostensible en el costo del inventario agregado al igual que aumenta

el volumen de inventario a manipular y almacenar.



**Figura 2:** En el eje 1 se asocia el inventario agregado en \$ normalizados y el factor de congestión en porcentaje, en el eje 2 se asocia tiempo de ciclo para todos los escenarios evaluados.

El factor de congestión se muestra en la Figura 2, y se expresa en porcentaje de ocupación de la línea en el año de evaluación. En el escenario de menor número de sku ( $n = 1$ ), el factor de congestión es del 6,63%. En el caso en que se evalúan todos los sku ( $n = 129$ ) el factor de congestión es del 86,31%.

A continuación, se presenta en la tabla 5 a modo de esquema las cantidades económicas a producir de cada una de las referencias,  $Q_i$  en los escenarios evaluados. El incremento de la cantidad de unidades a producir aumenta a medida que se incrementan los sku's en el sistema. Esto implica, como es de esperarse, unos mayores costos de inventario, costo de almacenamiento y otros costos asociados.

**Tabla 5:** Cantidad económica de pedido para los escenarios evaluados

n\i	1	2	3	...	127	128	129
1	21,30	0	0	...	0	0	0
2	30,36	8,60	0	...	0	0	0
3	38,72	10,97	9,09	...	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...
127	8717,7	2469,1	2045,5	...	60,45	0	0
128	8767,8	2483,3	2057,2	...	60,80	1,67	0
129	8817,1	2497,2	2068,8	...	61,14	1,68	0,92

Debido a lo descrito anteriormente se debe tener especial cuidado al momento de aumentar la cantidad de SKU's en el portafolio, ya que incluir una nueva referencia a producir (con su respectiva demanda de lanzamiento), bajo este esquema, reduce la disponibilidad de máquina, y genera un aumento en la cantidad de unidades a producir de cada una de las referencias, con sus respectivos efectos asociados para la cadena de suministro.

La Figura 3 y Figura 3, está conformada por las siguientes series de datos para los escenarios  $n = 1, 2, 3, \dots, 129$ , a continuación se describen:

- **$V_{Costo}$ :** Representa la variación marginal del costo total del escenario  $n_i$  respecto  $n_{i-1}$ .

$$V_{Costo_n} = C_{Total_n} - C_{Total_{n-1}}$$

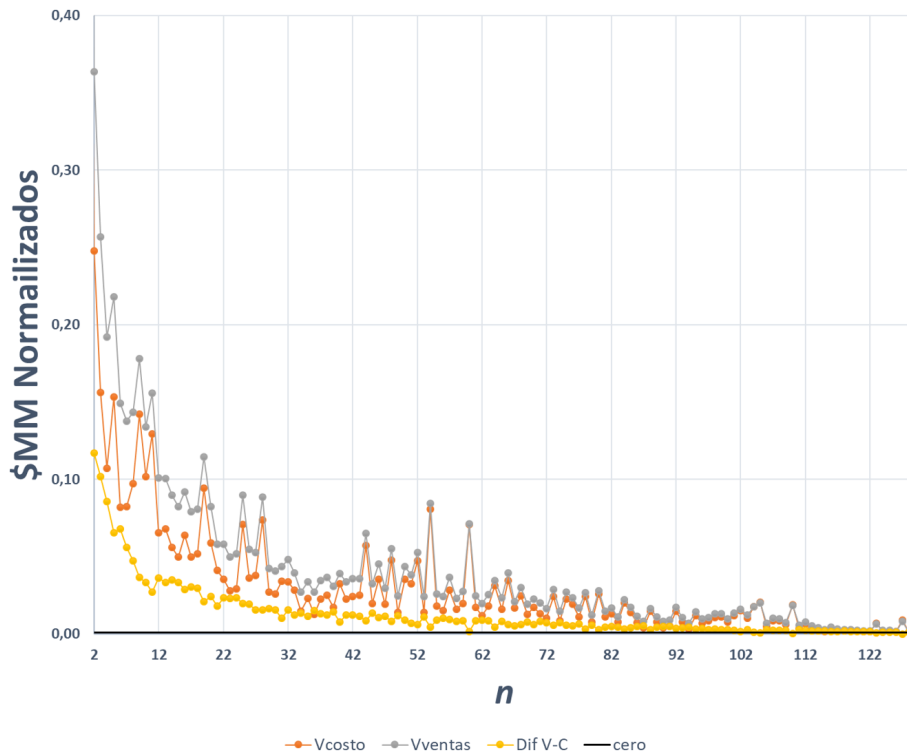
- **$V_{Ventas}$ :** Representa la variación marginal de las ventas totales del escenario  $n_i$  respecto  $n_{i-1}$ .

$$V_{Ventas_n} = V_{Totales_n} - V_{Totales_{n-1}}$$

- **Dif V-C:** Representa la variación marginal en los ingresos por ventas por cada referencia agregada en cada escenario  $n_i$  respecto  $n_{i-1}$ .

$$(DifV - C)_n = V_{Ventas_n} - V_{Costo_n}$$

- **cero:** Es un valor constante que representa el cero real, ya que los valores normalizados obtienen de la usando ecuación (1), estos valores nunca serán negativos, por tal motivo se calcula para cero (0) el valor normalizado correspondiente y se plasma en Figura 3 y Figura 4, con el fin de identificar los puntos en los que las otras series sean menores que el cero real.

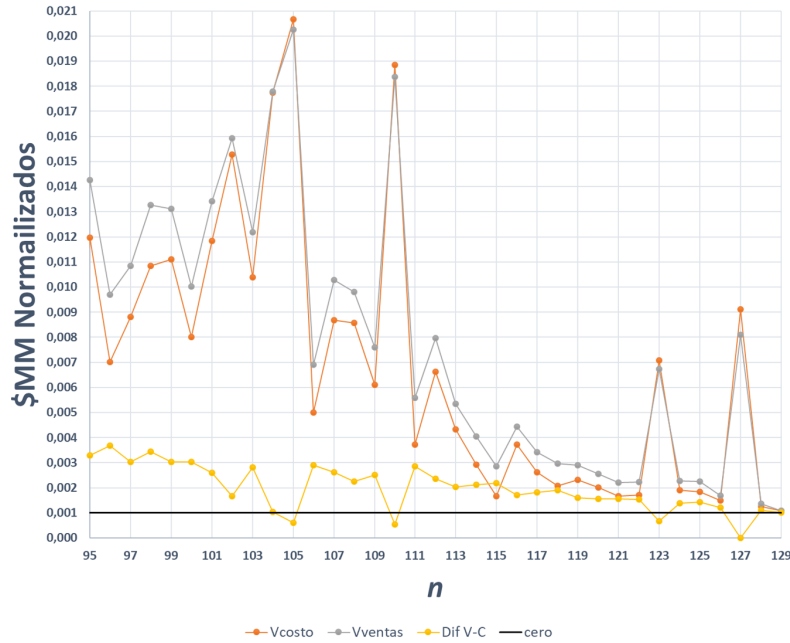


**Figura 3:** Variaciones marginales para cada escenario  $n = (2, i, 129)$  en millones de pesos normalizados.

Al realizar el análisis comparativo que se presenta en la Figura 3 para los escenarios desde para los escenarios  $n = 2$  hasta para los escenarios  $n = 129$ , se puede apreciar que:

1. Para todas las series de interés se observa un tendencia decreciente significativa hasta el escenario  $n = 55$ , punto en el cual las tendencias decreciente es menos representativa.
2. Con base en la observación anterior, se puede determinar para este caso de estudio, que el aporte de incrementar cada referencia al portafolio de productos de la compañía representa un incremento en el costo menor que la referencia que se incluyó en el escenario inmediatamente anterior. A su vez esta referencia representara menos ingresos por venta que la referencia que se incluyó en el escenario inmediatamente anterior.

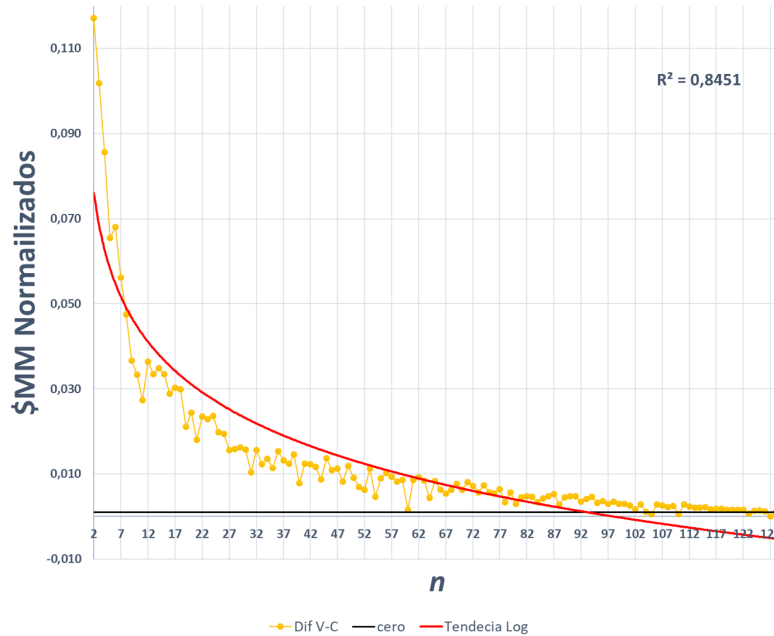
3. De la serie Dif V-C, se infiere que en la medida que se incrementa el tamaño del portafolio, es menor en ingreso que percibe por cada referencia adicional y esta variación posee una tendencia decreciente con una pendiente mayor que la variación del costo y en determinado punto esta diferencia es menor que cero (0) como se puede observar en Figura 4.



**Figura 4:** Variaciones marginales para cada escenario  $n = (95, i, 129)$  en millones de pesos normalizados.

4. En Figura 4 se observa para el escenario  $n = 104$  que la diferencia entre los ingresos marginales atribuibles a la referencia agregada son virtualmente iguales a los costos de producir la misma. A partir de ese escenario se observan varios puntos en los que los costos marginales de introducir nuevas referencias a la línea son mayores que los ingresos marginales respectivos.

Con base en la Figura 3 y Figura 4 no se puede determinar a partir de qué punto no es conveniente incluir más referencias en el portafolio, por lo tanto se presenta a continuación la Figura 5. en la cual se agrega una línea de tendencia logarítmica para la diferencia en la variación marginal de los ingresos por ventas respecto a los costos en cada escenario.



**Figura 5:** *Tendencia logarítmica para la diferencia en la variación marginal de los ingresos por ventas respecto a los costos en los ingresos por ventas por cada referencia agregada en cada escenario  $n_i$  respecto  $n_{i-1}$ .*

Para la línea de tendencia se puede apreciar, que a partir de el escenario  $n = 93$  la tendencia de los datos es menor a cero y el coeficiente de correlación que se presenta es de 0,8451.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

Este modelo muestra cómo aumenta el nivel del inventario promedio al aumentar el portafolio de productos, y como esto impacta de manera significativa la contribución de ingresos marginales respecto a los costos marginales para cada referencia que se adicione.

En el caso evaluado también se ha podido constatar, para las condiciones y cifras que se realizó el estudio, aumentar el portafolio no representará una mayor rentabilidad de la línea, por el contrario es probable que la tendencia identificada se sostenga y sean mayores los costos de incluir una nueva referencia que los ingresos agregados por esta.

En  $n = 104$  punto en el cual los costos e ingresos marginales son iguales

se da una ocupación de la línea del 83,63% de la disponibilidad anual, lo cual se corresponde con múltiples enfoques teórico-prácticos que indican que la ocupación total de un recurso (para el caso una línea de producción) no garantiza una mayor rentabilidad, incluso bajo el supuesto de lo producido sea vendido. También es preciso notar que en el escenario  $n = 65$  (mediana de la cantidad de referencias actuales) el factor de congestión es 71,77% y la diferencia entre ventas y costos marginales es 192,62 veces mayor que  $n = 104$ .

También se puede observar para el caso de estudio, que a partir del escenario  $n = 93$  la tendencia logarítmica muestra que la diferencia en la variación marginal de los ingresos por ventas respecto a los costos para cada escenario  $n_i$  respecto al escenario  $n_i - 1$  es menos que cero, lo que indica para esta tendencia que a partir de este punto es probable que sean mayores los costos de incluir nuevas referencias al portafolio de productos.

Por otra parte, al aumentar el portafolio de productos aumenta el tiempo de ciclo de la línea de producción, y a su vez se incrementa la cantidad de unidades a producir de cada uno de los SKU's, con el fin de satisfacer la demanda a lo largo del tiempo de ciclo.

Este modelo permite dar soporte a la toma de decisiones estratégicas dentro de la cadena de suministro y la estrategia comercial, ya que permite identificar cuál es el impacto de variar el portafolio en los modos de rentabilidad que se consideren.

Se recomienda incluir costos de mano de obra, costos logísticos (almacenamiento, transporte, entre otros), y costos fijos asociados a cada línea de la compañía, con el fin de hacer un análisis discriminado. Se recomienda para este caso de estudio, realizar una revisión detallada del portafolio de productos de la línea de producción y su aporte real sobre el margen.

## Referencias

- [1] Tim Allen. Are your products profitable? *Strategic Finance: Montvale*, 83:32–37, 2002.
- [2] Michael G. Kay Russell E. King y Kristin A. Thoney-Barletta Brian B. Hanson, Thom J. Hodgson. On the economic lot scheduling problem: stock-out prevention and system feasibility. *International Journal of Production Research*, 53:4903–4916, 2010.
- [3] Michael G. Kay Russell E. King y Kristin A. Thoney-Barletta Brian B. Hanson, Thom J. Hodgson. On the economic lot scheduling problem:

- stock-out prevention and system feasibility. *International Journal of Production Research*, 53:4903–4916, 2015.
- [4] Carlos A Castro, Mario C. Velez-Gallego, and Jaime A. Castro. Clasificación abc multicriterio: Tipos de criterios y efectos en la asignación de pesos. *Iteckne*, 8:163–170, 2011.
- [5] Rafael Guillermo García Cáceres Fabricio Andrés y Niebles Atencio Dionicio Neira Rodado, John Willmer Escobar. A mathematical model for the product mixing and lot-sizing problem by considering stochastic demand. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8:237–250, 2017.
- [6] Konstantin Biel y Christoph H. Glock Fabian G. Beck. Integration of energy aspects into the economic lot scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, 209:399–410, 2019.
- [7] C. Ortlieb y J. Koch G. Schuh, M. Riesener. Identification of modular platform potential in complex product portfolios using data analytics. *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2016 IEEE International Conference on*, pages 4–7, 2016.
- [8] Deepa Chandrasekaran y Andrea Ordanini Gaia Rubera. Open innovation, product portfolio innovativeness and firm performance: the dual role of new product development capabilities. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 44:166–184, 2015.
- [9] B. Karimi y S.A. Torabi M. Heydari. The economic lot scheduling problem in flow lines with sequence-dependent setups. *International Journal of Industrial Engineering and Production Research: Montvale*, 20:1–10, 2009.
- [10] Anders Segerstedt y Erik van der Sluis Martin Holmbom. A solution procedure for economic lot scheduling problems even in high utilisation facilities. *International Journal of Production Research*, 51:3765–3777, 2013.
- [11] Michael L. Pinedo. *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. Springer-Verlag New York, 2nd edition, 2009.
- [12] George Pfeil y Michael Roumay Shahram Taj, Galia Novakova Nedeltcheva. A spread-sheet model for efficient production and scheduling of a manufacturing line/cell. *International Journal of Production Research*, 50:1141–1154, 2012.

- [13] R. Sridharan y V. Madhusudanan Pillai Vinay A. Shirodkar. Effective allocation of idle time in the group technology economic lot scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 49:7493–7513, 2011.
- [14] Timo Hilger y Florian Sahling. Capacitated dynamic production and remanufacturing planning under demand and return uncertainty. *H. OR Spectrum Springer-Verlag*, 38:849–876, 2016.
- [15] Ümit Saglam. *Advanced Optimization and Statistical Methods in Portfolio Optimization and Supply Chain Management*. PhD thesis, Drexel University, 2014.