

# Desarrollo de modelos matemáticos para la optimización del proceso productivo de una línea de laminado de vidrio.

Marcelo Gabriel Corbalan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Engineering, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Argentina, marce\_corbalan@hotmail.com

**Abstract**— *La utilización de programas informáticos enfocados a la modelización de problemas complejos permite mejorar diversos aspectos en una organización. En este ensayo, se explicará la mejora realizada en una línea de producción encargada de fabricar vidrio laminado.*

*La mejora radica en minimizar el tiempo empleado para producir, durante una semana, los siete productos de mayor demanda con las cantidades que solicita el área de PCP. Para lograr dicho objetivo, previamente fue necesario relevar datos sobre la producción para confeccionar el diagrama de Pareto y obtener los productos con mayor demanda. Además se realizó un estudio de métodos y tiempos para conocer los tiempos de producción y de setup de máquinas. Por otra parte, se identificaron todas las variables y condiciones que interactúan y restringen al sistema para luego modelarlas en los programas Excel y GAMS.*

**Keywords**— *Planificación, optimización de proceso, modelización, estudio de métodos y tiempos, GAMS.*

## I. INTRODUCCIÓN

El creciente avance de la tecnología generó en las organizaciones la necesidad de valerse de éste, lo que conduce a una mayor competitividad y obtención de utilidades.

Uno de los avances más importantes radica en la informática, a partir del desarrollo de nuevos programas y computadoras con procesadores que permiten ejecutar comandos y resolver problemas a una velocidad mayor que la de cualquier humano. El crecimiento de este rubro permite que en la actualidad se pueda simular y/o modelar cualquier proceso, entre ellos, el productivo. Llevar a cabo estas actividades promueve la identificación de oportunidades de mejora en diversos aspectos dentro de las organizaciones. La cuantificación de dichas oportunidades es lo que determina el crecimiento de las organizaciones.

## II. PROCESO DE FABRICACIÓN DE VIDRIO LAMINADO

El proceso de producción de vidrio laminado está constituido por siete actividades principales, ilustradas en la Fig. 1. Además, se puede observar que hay dos tipos de actividades: las combinadas, es decir, una operación más un control de calidad, y las simples, que hacen referencia a operaciones.

Un detalle a considerar es que las actividades combinadas son realizadas por el personal del sector, mientras que las operaciones restantes son llevadas a cabo por máquinas previamente configuradas para el producto que se debe hacer.

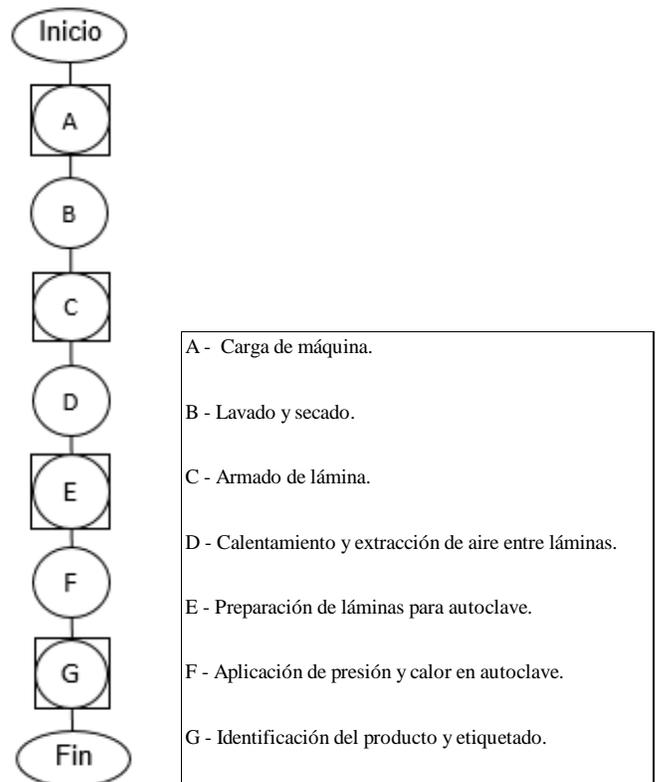


Fig. 1 Sinóptico del proceso de vidrio laminado

## II. PRODUCTOS A EVALUAR

Para conocer los productos con mayor demanda se realizó un diagrama de Pareto, para el cual se relevaron los datos históricos de producción de septiembre del 2019 a enero del 2020.

Una vez realizado el diagrama, se desarrolló la “TABLA I”, en la cual se exponen los resultados obtenidos ordenados de mayor a menor.

TABLA I

Valoración de productos según su volumen de producción

Código	Porcentaje	% acumulado	Código	Porcentaje	% acumulado
2951	51,48	51,48	2162	0,37	97,12
2954	10,94	62,42	2211	0,33	97,45
2946	5,92	68,34	2211	0,33	97,78
12058	3,51	71,84	8727	0,32	98,11
2950	3,13	74,97	2134	0,26	98,37
8162	3,02	77,99	2947	0,26	98,62
15051	2,48	80,47	11862	0,23	98,86
15902	2,07	82,54	7477	0,20	99,05
8464	1,83	84,37	15908	0,13	99,19
2214	1,55	85,91	2215	0,10	99,29
11096	1,27	87,18	16940	0,10	99,38
15052	1,18	88,37	15950	0,08	99,46
11059	1,07	89,44	15393	0,07	99,54
8728	1,00	90,43	11356	0,07	99,61
15046	0,86	91,29	2143	0,07	99,67
12100	0,82	92,11	15691	0,07	99,74
15695	0,60	92,71	2129	0,04	99,78
14800	0,57	93,28	2945	0,04	99,83
8777	0,56	93,84	12892	0,04	99,87
8777	0,56	94,39	17042	0,04	99,91
15047	0,54	94,94	9330	0,03	99,94
2948	0,51	95,45	15716	0,03	99,97
12764	0,51	95,96	17230	0,02	99,99
15360	0,42	96,38	17079	0,01	100,00
2135	0,38	96,76			

A modo de síntesis de la tabla anterior, se expone la “TABLA II”, la cual muestra los siete productos más solicitados, desde septiembre del 2019 a enero del 2020. La suma de estos siete productos representa el 80,47% del total.

TABLA II  
Productos seleccionados

Código	Grupo	Esp	Color	PVB	Medidas	Hojas	Est
2951	LFL	6,4	IN	I	3600 x 2500	17	3A3
2954	LFL	8,4	IN	I	3600 x 2500	13	4A4
2946	LFL	10,4	IN	I	3600 x 2500	10	5A5
12058	LFL	6,4	IN	I	3210 x 2400	16	3A3
2950	LFL	6,4	IN	E	3600 x 2500	17	3A3
8162	LCL	8,4	GR	I	3210 x 2400	12	4A4
15051	LFL	6,4	GR	I	3600 x 2140	17	3A3

Con los productos ya definidos, se prosigue con el estudio de métodos y tiempos con el fin de conocer cuánto se tarda en producir un paño de vidrio laminado de los que figuran en la “TABLA II” y en consecuencia, cuánto tiempo toma producir un paquete de dicho material.

### III. ESTUDIO DE MÉTODOS Y TIEMPOS

A partir del conocimiento del proceso productivo de la línea laminado y de los productos con mayor volumen de producción, se expondrán los tiempos de cada actividad para conformar un paquete de vidrio laminado y las actividades complementarias que son necesarias para el *setup* de la línea.

Cabe aclarar que para conocer el tiempo estándar de cada producto y de cada actividad, se utilizaron las fórmulas aprendidas en la cátedra “Organización Industrial”, y se emplearon los suplementos dispuestos por la OIT.

Tiempos Observados: Es el tiempo que se observa y mide con el cronómetro.

Tiempo Normal: Es el tiempo resultante de multiplicar el “Tiempo Observado” por la “Valoración de la Actividad”.

$$T_n = \left( \frac{\sum(T_{oi} * A_i)}{100} \right) / n \quad (1)$$

Valoración del ritmo de trabajo o Actividad: Se mide en diversas escalas, aunque la más común en diversos documentos es la siguiente:

- Actividad nula, o reposo, se puntúa con 0 (cero).
- Actividad normal, se valora con 100 (cien).
- Actividad óptima, a máxima velocidad sin fatiga, se marca como 140 (ciento cuarenta).

Tiempos Estándar o Tipo: Es el “Tiempo Normal” con el agregado de “Suplementos” según la naturaleza del trabajo.

$$T_s = T_n * (1 + S) \quad (2)$$

Suplementos: son un conjunto de tiempos adicionales, de diversa naturaleza, expresados generalmente de manera porcentual, que se agregan al tiempo normal para obtener el estándar.

Las actividades principales se desglosaron en dos grupos: las que son realizadas 100% por máquinas y las que tienen intervención del personal.

#### A. Actividades automáticas

- Cargadora automática, también conocida como Lovati por el personal del sector
- Lavadora
- Pre-horno, también conocido como Calandra por el personal del sector
- Autoclave

TABLA III  
Tiempos de máquinas según el producto

Producto	Parámetros (m/min)			Tiempos (seg)		
	Lovati	Lavadora	Calandra	Lovati	Lavadora	Calandra
2951	Fijo	9,5	3,5	30	24,4	98,57
2954	Fijo	9,5	2,7	30	24,4	127,78
2946	Fijo	9,5	2,4	30	24,4	156,82
12058	Fijo	9,5	3,6	30	24,4	95,83
2950	Fijo	9,5	3,5	30	24,4	98,57
8162	Alt	9	2,7	30	25,2	127,78
15051	Alt	9	3,5	30	25,2	98,57

Los tiempos de los equipos hacen referencia a una hoja, es decir, que los 30 seg de la Lovati y los 24/25 seg de la Lavadora corresponden a una hoja de vidrio crudo, mientras que los tiempos de la Calandra, a una hoja pre-laminada. El ciclo del Autoclave es independiente del tipo de producto que se fabrique. Su duración es de 4.30 hs y la capacidad del autoclave es de cinco paquetes de vidrio laminado.

#### B. Actividades con intervención del personal

1. Armado de lámina
2. Consolidado de vidrio laminado
3. Identificación del producto y etiquetado

##### 1. Armado de lámina

A continuación se expondrán las observaciones realizadas para llevar a cabo la actividad de armado de lámina para uno de los productos seleccionados.

TABLA IV

Registro de tiempos para el armado de láminas del producto 2951

Nº de observaciones	Tiempo observado (To)	Actividad (Ai)	To x Ai
1	124,2	110	136,620
2	124,2	110	136,620
3	123,6	110	135,960
4	124,2	100	124,200
5	127,8	100	127,800
6	124,2	110	136,620
7	127,8	100	127,800
8	132,6	95	125,970
9	124,8	110	137,280
10	126,6	100	126,600
11	128,4	95	121,980
12	124,2	110	136,620
13	132	95	125,400
14	127,2	95	120,840
15	124,2	110	136,620
16	127,8	100	127,800
17	127,8	100	127,800
18	129	95	122,550
19	125,4	100	125,400

20	124,8	110	137,280
Tiempo normal:			129,888

Cálculo de suplementos:

- Suplementos fijos
  - Suplemento base por fatiga: 4%
- Suplementos variables
  - Suplemento por trabajar de pie: 2%
  - Trabajo bastante monótono: 1%
- Suplemento por contingencias: 5%

Porcentaje total de suplementos: 12%.

Tiempo estándar para el armado del producto 2951:  
 $129.888 \text{ seg} + (1 + 12\%) = 147.6 \text{ seg} = 2.46 \text{ min}.$

##### 2. Consolidado de vidrio laminado

A continuación se expondrán las observaciones realizadas para llevar a cabo la actividad de consolidado de vidrio laminado para uno de los productos seleccionados.

TABLA V

Registro de tiempos para el consolidado de vidrio laminado del producto 2951

Nº de observaciones	Tiempo observado (To)	Actividad (Ai)	To x Ai
1	30	95	28,500
2	20	105	21,000
3	25	100	25,000
4	26	100	26,000
5	33	90	29,700
6	22	100	22,000
7	28	95	26,600
8	21	105	22,050
9	25	100	25,000
10	26	100	26,000
11	27	100	27,000
12	24	100	24,000
13	25	100	25,000
14	25	100	25,000
15	23	100	23,000
16	26	100	26,000
17	21	105	22,050
18	27	100	27,000
19	20	105	21,000
20	22	100	22,000
Tiempo normal:			24,695

Cálculo de suplementos:

- Suplementos fijos
  - Suplemento base por fatiga: 4%
- Suplementos variables
  - Suplemento por trabajar de pie: 2%
  - Trabajo muy monótono: 4%
- Suplemento por contingencias: 5%

Porcentaje total de suplementos: 15%.

Tiempo estándar para el armado del producto 2951:

24.695 seg + (1 + 15%) = 28.399 seg = 0.47 min.

### 3. Identificación del producto y etiquetado

A continuación se expondrán las observaciones realizadas para llevar a cabo la actividad de desconsolidado de vidrio laminado para uno de los productos seleccionados.

TABLA VI  
Registro de tiempos para el desconsolidado de vidrio laminado del producto 2951

Nº de observaciones	Tiempo observado (To)	Actividad (Ai)	To x Ai
1	20	95	19,000
2	10	105	10,500
3	15	100	15,000
4	16	100	16,000
5	23	90	20,700
6	12	100	12,000
7	18	95	17,100
8	11	105	11,550
9	15	100	15,000
10	16	100	16,000
11	17	100	17,000
12	14	100	14,000
13	15	100	15,000
14	15	100	15,000
15	13	100	13,000
16	16	100	16,000
17	11	105	11,550
18	17	100	17,000
19	10	105	10,500
20	12	100	12,000
Tiempo normal:			14,695

Cálculo de suplementos:

- Suplementos fijos
  - Suplemento base por fatiga: 4%
- Suplementos variables
  - Suplemento por trabajar de pie: 2%
  - Trabajo muy monótono: 4%
- Suplemento por contingencias: 7%

Porcentaje total de suplementos: 17%.

Tiempo estándar para el armado del producto 2951:

214.695 seg + (1 + 17%) = 251.193 seg = 0.69 min.

### C. Actividades complementarias

1. Carga de máquina
2. Cambio de PVB
3. Cambio de carro

Dichas actividades se definieron como complementarias porque además de ser necesarias para el *setup* de la línea, son las actividades que producen el *downtime* programado, es decir, tener la línea parada porque se debe cambiar un insumo sea PVB o vidrio crudo.

También se mencionó el cambio de carro, que es una actividad que se produce cuando la etapa E de la Fig. 1

(preparación de láminas para autoclave) está terminada. De la misma manera que sucede con las actividades anteriores, se produce un *downtime*, dado que la línea de producción está a la espera de que se desplace el carro terminado y se coloque uno vacío donde estaba ubicado el anterior.

### 1. Carga de máquina

La diferencia de tiempos en la actividad de carga de máquina es el modo con el que debe operar la cargadora automática, es por eso que en la "TABLA VII" se identifica cómo opera la cargadora para cada tipo de producto.

TABLA VII  
Modo de operación de cargadora automática

Producto									Lovati
Código	Grupo	Esp	Color	PVB	Medidas		Hojas	Est	Modo
2951	LFL	6,4	IN	I	3600	x 2500	17	3A3	Fijo
2954	LFL	8,4	IN	I	3600	x 2500	13	4A4	Fijo
2946	LFL	10,4	IN	I	3600	x 2500	10	5A5	Fijo
12058	LFL	6,4	IN	I	3210	x 2400	16	3A3	Fijo
2950	LFL	6,4	IN	E	3600	x 2500	17	3A3	Fijo
8162	LCL	8,4	GR	I	3210	x 2400	12	4A4	Alt
15051	LFL	6,4	GR	I	3600	x 2140	17	3A3	Alt

A continuación se mostrará una de las mediciones realizadas donde se puede observar en qué momento la línea se encuentra parada. Esta medición corresponde a la producción del vidrio laminado incoloro 4+4 estándar. En la línea se había terminado de producir vidrio laminado incoloro 3+3 estándar por lo que la cargadora estaba operando en modo fijo.

TABLA VIII  
Registro de carga de máquina

Carga de máquina		
Hora	Descripción de las tareas	Estado de la línea
11:18:00	Posicionamiento de pinza lateral en el paquete N1	Produciendo
11:20:00	Posicionamiento de paquete N1 en el carro1	Produciendo
11:23:00	Posicionamiento de pinza lateral en el paquete N2	Produciendo
11:25:00	Posicionamiento de paquete N2 en el carro1	Produciendo
11:27:00	Apertura de FASS / Movimiento de carro N2 / Posicionamiento de pinza lateral en el paquete N3	Parada
11:30:00	Posicionamiento de paquete N3 en el carro2 / Movimiento de ambos carros	Parada
11:32:00	Cierre de FASS	Reactivación de la producción

Se puede ver que el tiempo total de la operación es de 14 min, pero el tiempo que la línea estuvo parada fue de 5 min. Esto se debe a que al operar en modo fijo se puede realizar el movimiento de los paquetes de vidrio mientras la línea sigue consumiendo vidrio crudo del carro N°2 siguiendo este caso.

Tras realizar sucesivas mediciones, se puede concluir que en promedio se demora 3 min en dejar un paquete de vidrio

crudo del módulo a uno de los carros de la Lovati y otros 3 min para que la pinza lateral vuelva al módulo para efectuar otro traslado de paquete. También se puede identificar que el tiempo promedio de apertura del FASS hasta su cierre es de 5 min.

Con estos datos obtenidos se puede confirmar que lo máximo que se podría tardar en realizar la carga de máquina es de 32 min y esto solo sería para el caso de trabajar en modo alternado. El resultado de los 32 min surge de la demora de trasladar 5 paquetes de vidrio crudo, lo que equivale a cuatro movimientos completos de 6 min y uno de 3 min para el traslado del quinto paquete. Además se suman los 5 min de la apertura y cierre del FASS.

## 2. Cambio de PVB

A continuación se expondrán las observaciones realizadas para llevar a cabo la actividad de cambio de PVB.

TABLA IX  
Registro de tiempos para el cambio de PVB

Nº de observaciones	Tiempo observado (To)	Actividad (Ai)	To x Ai
1	672	95	638,400
2	552	110	607,200
3	594	100	594,000
4	642	95	609,900
5	564	100	564,000
6	594	100	594,000
7	606	100	606,000
8	720	90	648,000
9	690	95	655,500
10	486	105	510,300
11	546	105	573,300
12	570	100	570,000
13	642	95	609,900
14	516	105	541,800
15	582	100	582,000
16	606	100	606,000
17	504	105	529,200
18	576	100	576,000
19	648	95	615,600
20	528,0	105	554,400
<b>Tiempo normal:</b>			<b>589,275</b>

Cálculo de suplementos:

- Suplementos fijos
  - Suplemento base por fatiga: 4%

Porcentaje total de suplementos: 4%.

Tiempo estándar para el cambio de PVB:

$$589.275 \text{ seg} + (1 + 4\%) = 612.846 \text{ seg} = 10.2141 \text{ min.}$$

Luego de obtener el tiempo estándar para realizar el cambio de PVB, se desarrolla la “TABLA X” donde se puede apreciar los tiempos necesarios para el cambio de PVB para cada producto.

TABLA X  
Tiempo de cambio de PVB por producto (min)

Código	2951	2954	2946	12058	2950	8162	15051
2951	-	-	-	10,2	10,2	10,2	10,2
2954	-	-	-	10,2	10,2	10,2	10,2
2946	-	-	-	10,2	10,2	10,2	10,2
12058	10,2	10,2	10,2	-	10,2	-	10,2
2950	10,2	10,2	10,2	10,2	-	10,2	10,2
8162	10,2	10,2	10,2	-	10,2	-	10,2
15051	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	-

Aclaración: Un rollo de PVB rinde para producir 5 paquetes de vidrio laminado. Otro dato a tener en cuenta es que las celdas que figuran en 0 (-) se deben a que el rollo de PVB ya está cargado.

## 3. Cambio de carro

A continuación se expondrán las observaciones realizadas para llevar a cabo la actividad de cambio de carro.

Tabla XI  
Registro de tiempos para el cambio de carro

Nº de observaciones	Tiempo observado (To)	Actividad (Ai)	To x Ai
1	582	100	582,000
2	630	100	630,000
3	618	100	618,000
4	552	105	579,600
5	666	95	632,700
6	630	100	630,000
7	600	100	600,000
8	606	100	606,000
9	576	100	576,000
10	546	105	573,300
11	606	100	606,000
12	546	105	573,300
13	624	100	624,000
14	636	100	636,000
15	606	100	606,000
16	654	95	621,300
17	582	100	582,000
18	540	105	567,000
19	672	95	638,400
20	390,0	100	390,000
<b>Tiempo normal:</b>			<b>593,580</b>

Cálculo de suplementos:

- Suplementos fijos
  - Suplemento base por fatiga: 4%
- Suplemento por contingencias: 3%

Porcentaje total de suplementos: 7%.

Tiempo estándar para el cambio de carro:  
 $593.580 \text{ seg} + (1 + 7\%) = 635.131 \text{ seg} = 10.58551 \text{ min.}$

Como se explicó en la sección de “Preparación de láminas para autoclave”, los carros de producción tienen una capacidad de 5 paquetes de vidrio laminado. Dado a que la restricción que se va a plantear en el segmento de optimización se basará en la disponibilidad del tiempo, se producirán como máximo 10 paquetes. Por lo tanto realizarán dos cambios de carro como máximo, lo que equivale a 21.17 min.

Resumen de los tiempos de producción para los productos seleccionados:

En la “TABLA XII” se expondrán los tiempos de producción para cada producto, los cuales fueron calculados en base a los datos registrados para este ensayo.

TABLA XII  
Resumen de tiempos de producción

Código	Hojas	Tiempo x pl	Tiempo x paq
2951	17	2,46	41,82
2954	13	2,46	31,98
2946	10	2,62	26,2
12058	16	2,48	39,68
2950	17	2,46	41,82
8162	13	2,48	32,24
15051	17	2,5	42,5

#### IV. OPTIMIZACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN

En esta sección del ensayo se demostrará cómo se puede planificar una semana (7 días) de producción buscando optimizar los tiempos de la línea, es decir, minimizar los tiempos generados por los cambios de los productos obtenidos mediante el diagrama de Pareto.

Para lograr dicha optimización, en primer lugar se identificarán las variables que participan del sistema, en segundo lugar las restricciones que el sistema debe cumplir y, por último, la función objetivo.

Variables:

Cantidad de Producto 2951 (Cant\_Prod\_2951):

Producto 2951<sub>día1 TN</sub> ... Producto 2951<sub>día1 TN</sub>  
 Producto 2951<sub>día1 TM</sub> ... Producto 2951<sub>día1 TM</sub>  
 Producto 2951<sub>día1 TT</sub> ... Producto 2951<sub>día1 TT</sub>

Cantidad de Producto 2954 (Cant\_Prod\_2954):

Producto 2954<sub>día1 TN</sub> ... Producto 2954<sub>día1 TN</sub>  
 Producto 2954<sub>día1 TM</sub> ... Producto 2954<sub>día1 TM</sub>  
 Producto 2954<sub>día1 TT</sub> ... Producto 2954<sub>día1 TT</sub>

Cantidad de Producto 2946 (Cant\_Prod\_2946):

Producto 2946<sub>día1 TN</sub> ... Producto 2946<sub>día1 TN</sub>  
 Producto 2946<sub>día1 TM</sub> ... Producto 2946<sub>día1 T</sub>  
 Producto 2946<sub>día1 TT</sub> ... Producto 2946<sub>día1 TT</sub>

Cantidad de Producto 12058 (Cant\_Prod\_12058):

Producto 12058<sub>día1 TN</sub> ... Producto 12058<sub>día1 TN</sub>

Producto 12058<sub>día1 TM</sub> ... Producto 12058<sub>día1 TM</sub>  
 Producto 12058<sub>día1 TT</sub> ... Producto 12058<sub>día1 TT</sub>  
 Cantidad de Producto 2950 (Cant\_Prod\_2950):  
 Producto 2950<sub>día1 TN</sub> ... Producto 2950<sub>día1 TN</sub>  
 Producto 2950<sub>día1 TM</sub> ... Producto 2950<sub>día1 TM</sub>  
 Producto 2950<sub>día1 TT</sub> ... Producto 2950<sub>día1 TT</sub>  
 Cantidad de Producto 8162 (Cant\_Prod\_8162):  
 Producto 8162<sub>día1 TN</sub> ... Producto 8162<sub>día1 TN</sub>  
 Producto 8162<sub>día1 TM</sub> ... Producto 8162<sub>día1 TM</sub>  
 Producto 8162<sub>día1 TT</sub> ... Producto 8162<sub>día1 TT</sub>  
 Cantidad de Producto 15051 (Cant\_Prod\_15051):  
 Producto 15051<sub>día1 TN</sub> ... Producto 15051<sub>día1 TN</sub>  
 Producto 15051<sub>día1 TM</sub> ... Producto 15051<sub>día1 TM</sub>  
 Producto 15051<sub>día1 TT</sub> ... Producto 15051<sub>día1 TT</sub>

Los programas de apoyo utilizados para encontrar la solución al problema fueron GAMS y Excel (usando el complemento Solver).

El resultado arrojado por Excel fue: **9587.78**. Este valor representa el tiempo mínimo en minutos para producir lo que PCP requiere.

Además de observar el resultado final, se puede analizar el total de operaciones complementarias, integradas por:

- Carga de máquina: 77
- Cambio de PVB: 50
- Cambio de carro: 35

En contraste con el resultado obtenido, lo registrado en la línea para producir el mismo pedido fue de 9606.46 min, teniendo en cuenta que quedó pendiente la producción de 3 paquetes del producto 2954 y 1 del 15051.

#### V. PROGRAMACIÓN EN GAMS

Con el programa GAMS se realizaron dos modelos, denominados **PPS Simplificada** y **PPS**. Esto fue necesario debido a que la versión no comercial restringe a 50 la cantidad de variables enteras, mientras que para resolver el problema de esta práctica se necesitan 147 (ya que son 3 turnos por día y 7 los productos seleccionados, con una planeación de 7 días). Por lo mencionado anteriormente, solo se expondrá el resultado del modelo de “PPS Simplificada”. Se mostrarán, también, fragmentos de ambos códigos donde se puede apreciar que la lógica aplicada es la misma, con diferencia en las cantidades de variables y restricciones que interactúan en el sistema.



Código en GAMS:

```

PPS simplificada.gms PPS simplificada.lst PPS.gms
$title Practica Profesional Supervisada V2.0

$ontext
Titulo:
    Planificación de una semana de producción, considerando los tiempos
    de fabricación de cada producto y los tiempos complementarios,
    los cuales son: Carga de maq. Cambio de PVB Cambio de carro.

Alumno: Corbalan Marcelo
DNI: 39709236
mail: marce_corbalan@hotmail.com
$offtext

```

En el modelo de “PPS Simplificada” el campo de acción de las variables enteras queda reducido a:

```

Sets
P productos /P2951, P2954, P2946, P12058, P2950/
D dias / d1*d3 /
Tu turnos / TN, TM, TT/
;

Parameter
*Tiempo de produccion por paquete en minutos
TP (P) tiempo de produccion por paquete
    /P2951 41.82
    P2954 31.98
    P2946 26.2
    P12058 39.68
    P2950 41.82/

Table
    lim_max_de_paquetes(Tu,D,F) cantidad maxima
    P2951 P2954 P2946 P12058 P2950
TN.d1 10 10 10 10 10
TN.d2 10 10 10 10 10
TN.d3 10 10 10 10 10
TM.d1 10 10 10 10 10
TM.d2 10 10 10 10 10
TM.d3 10 10 10 10 10
TT.d1 10 10 10 10 10
TT.d2 10 10 10 10 10
TT.d3 10 10 10 10 10
;

```

Mientras que en el modelo original presentan los siguientes parámetros:

```

Sets
P productos /P2951, P2954, P2946, P12058,
D dias / d1*d7 /
Tu turnos / TN, TM, TT/
;

Parameter
TP (P) tiempo de produccion por paquete
    /P2951 41.82
    P2954 31.98
    P2946 26.2
    P12058 39.68
    P2950 41.82
    P8162 32.24
    P15051 42.5/

```

Table	lim_max_de_paquetes(Tu,D,F)					cantidad maxima de paquetes que se pueden producir				
	P2951	P2954	P2946	P12058	P2950	P8162	P15051			
TN.d1	10	10	10	10	10	10	10			
TN.d2	10	10	10	10	10	10	10			
TN.d3	10	10	10	10	10	10	10			
TN.d4	10	10	10	10	10	10	10			
TN.d5	10	10	10	10	10	10	10			
TN.d6	10	10	10	10	10	10	10			
TN.d7	10	10	10	10	10	10	10			
TM.d1	10	10	10	10	10	10	10			
TM.d2	10	10	10	10	10	10	10			
TM.d3	10	10	10	10	10	10	10			
TM.d4	10	10	10	10	10	10	10			
TM.d5	10	10	10	10	10	10	10			
TM.d6	10	10	10	10	10	10	10			
TM.d7	10	10	10	10	10	10	10			
TT.d1	10	10	10	10	10	10	10			
TT.d2	10	10	10	10	10	10	10			
TT.d3	10	10	10	10	10	10	10			
TT.d4	10	10	10	10	10	10	10			
TT.d5	10	10	10	10	10	10	10			
TT.d6	10	10	10	10	10	10	10			
TT.d7	10	10	10	10	10	10	10			

A continuación se muestran algunos de los nombramientos de las ecuaciones a utilizar:

```

Equations
Objetivo2951 objetivo semanal del producto 2951
Suma2951 cumplimineto del objetivo semanal del producto 2951
Objetivo2954 objetivo semanal del producto 2954
Suma2954 cumplimineto del objetivo semanal del producto 2954
Objetivo2946 objetivo semanal del producto 2946
Suma2946 cumplimineto del objetivo semanal del producto 2946
Objetivo12058 objetivo semanal del producto 12058
Suma12058 cumplimineto del objetivo semanal del producto 12058
Objetivo2950 objetivo semanal del producto 2950
Suma2950 cumplimineto del objetivo semanal del producto 2950
***Ecuaciones suprimidas para la versión simplificada***
*Objetivo8162 objetivo semanal del producto 8162
*Suma8162 cumplimineto del objetivo semanal del producto 8162
*Objetivo15051 objetivo semanal del producto 15051
*Suma15051 cumplimineto del objetivo semanal del producto 15051

Tiempo_total_de_ProdT suma de todos los tiempos

Max_TN1a_Turno
Max_TN2a_Turno
Max_TN3a_Turno

```

Planteo de algunas de las ecuaciones desarrolladas en GAMS:

\*\*\*Cambio de de PVB día 1 turno noche\*\*\*

$$\text{Suma\_IN250\_N1} .. \text{IN250aN1} =E= \text{round}(\sqrt{\sqrt{X('Tn','d1','P2951')}+ X('Tn','d1','P2954')}+ X('Tn','d1','P2946'))); \quad (3)$$

$$\text{Suma\_IN240\_N1} .. \text{IN240aN1} =E= \text{round}(\sqrt{\sqrt{X('Tn','d1','P12058')}}); \quad (4)$$

$$\text{Suma\_E250\_N1} .. \text{E250aN1} =E= \text{round}(\sqrt{\sqrt{X('Tn','d1','P2950')}}); \quad (5)$$

$$\text{Suma\_PVB\_N1} .. \text{PVB\_N1} =E= (\text{IN250aN1} + \text{IN240aN1} + \text{E250aN1}) * 10.2 ; \quad (6)$$

$$\text{Suma\_FIJO\_N1} .. \text{FIJOaN1} =E= \text{round}((\text{round}((X('Tn','d1','P2951')}+ X('Tn','d1','P2950'))/2)/2)+ \text{round}((\text{round}(X('Tn','d1','P2954')/2)/2) + \text{round}((\text{round}(X('Tn','d1','P2946')/2)/2) + \text{round}((\text{round}(X('Tn','d1','P12058')/2)/2)); \quad (7)$$

$$\text{Suma\_Cam\_N1} .. \text{CamN1} =E= \text{sign}(\text{sign}(X('Tn','d1','P2951')}+ X('Tn','d1','P2954')}+ X('Tn','d1','P2946')}+ X('Tn','d1','P12058')}+ X('Tn','d1','P2950') -5)+1)+ \text{sign}(\text{sign}(X('Tn','d1','P2951')}+ X('Tn','d1','P2954')}+ X('Tn','d1','P2946')}+ X('Tn','d1','P12058')}+ X('Tn','d1','P2950') -10)+1); \quad (8)$$

Función objetivo:

La función objetivo como se observa en la fórmula 9, es una sumatoria de todos los componentes la matriz. Esto involucra la suma de los tiempos de producción de cada día con sus respectivos turnos más las actividades complementarias.

$$\text{Tiempo\_total\_de\_ProdT} \dots TT = \sum [D, \sum (Tu, \sum (P, X(Tu,D,P)*TP(P)))] + PVB\_N1 + PVB\_M1 + PVB\_T1 + PVB\_N2 + PVB\_M2 + PVB\_T2 + PVB\_N3 + PVB\_M3 + PVB\_T3 + \text{Carro} + \text{FIJO}; \quad (9)$$

Por último se le explica al programa que se quiere modelar todas las ecuaciones planteadas y que resuelva el problema, es decir, que busque minimizar la variable TT usando MINLP.

```
Model PPS /all/;
Solve PPS using minlp minimizing TT;
```

Aclaración: Los modelos MINLP son modelos que combinan aspectos mixtos con no linealidades. Son mucho más difíciles que los de Programación Lineal Entera Mixta (MIP) y Programación No Lineal (PNL).

Asignación de los productos seleccionados a fabricar durante toda la semana, desglosado en días con sus respectivos turnos:

--- VAR X												
LO: LOWER	LV: LEVEL	UP: UPPER	M: MARGINAL		LO	LV	UP	M	LO	LV	UP	M
TN.d1.P2951	.	1.000	10.000	41.820	TN.d1.P2954	.	2.000	10.000	31.980			
TN.d1.P2946	.	.	10.000	26.200	TN.d1.P12058	.	3.000	10.000	39.680			
TN.d1.P2950	.	1.000	10.000	41.820	TN.d2.P2951	.	.	10.000	41.820			
TN.d2.P2954	.	7.000	10.000	31.980	TN.d2.P2946	.	.	10.000	26.200			
TN.d2.P12058	.	.	10.000	39.680	TN.d2.P2950	.	.	10.000	41.820			
TN.d3.P2951	.	2.000	10.000	41.820	TN.d3.P2954	.	.	10.000	31.980			
TN.d3.P2946	.	5.000	10.000	26.200	TN.d3.P12058	.	.	10.000	39.680			
TN.d3.P2950	.	.	10.000	41.820	TM.d1.P2951	.	.	10.000	41.820			
TM.d1.P2954	.	.	10.000	31.980	TM.d1.P2946	.	.	10.000	26.200			
TM.d1.P12058	.	7.000	10.000	39.680	TM.d1.P2950	.	.	10.000	41.820			
TM.d2.P2951	.	.	10.000	41.820	TM.d2.P2954	.	7.000	10.000	31.980			
TM.d2.P2946	.	.	10.000	26.200	TM.d2.P12058	.	.	10.000	39.680			
TM.d2.P2950	.	.	10.000	41.820	TM.d3.P2951	.	.	10.000	41.820			
TM.d3.P2954	.	.	10.000	31.980	TM.d3.P2946	.	.	10.000	26.200			
TM.d3.P12058	.	.	10.000	39.680	TM.d3.P2950	.	7.000	10.000	41.820			
TT.d1.P2951	.	.	10.000	41.820	TT.d1.P2954	.	.	10.000	31.980			
TT.d1.P2946	.	7.000	10.000	26.200	TT.d1.P12058	.	.	10.000	39.680			
TT.d1.P2950	.	.	10.000	41.820	TT.d2.P2951	.	8.000	10.000	41.820			
TT.d2.P2954	.	.	10.000	31.980	TT.d2.P2946	.	.	10.000	26.200			
TT.d2.P12058	.	.	10.000	39.680	TT.d2.P2950	.	.	10.000	41.820			
TT.d3.P2951	.	7.000	10.000	41.820	TT.d3.P2954	.	.	10.000	31.980			
TT.d3.P2946	.	.	10.000	26.200	TT.d3.P12058	.	.	10.000	39.680			
TT.d3.P2950	.	.	10.000	41.820								

Compilación realizada por GAMS:

```
--- DICOPT: Log File:
Major Major      Objective      CPU time  Itera-  Evaluation Solver
Step  Iter      Function      (Sec)    tions   Errors
NLP   1          2895.60000    0.01     6        0      conopt
MIP   1          2895.60000    0.13    75        0      cplex
NLP   2          2794.00000<   0.00     4        0      conopt
MIP   2          *Failure*     0.00     0        0      cplex

--- DICOPT: Terminating...
--- DICOPT: Stopped prematurely because of Solver Failure

      DICOPT terminated prematurely because of a solver
      failure. The listing file will contain additional
      logs from the NLP and MIP solvers which may reveal
      what was the cause of the failure.

--- DICOPT: Best integer solution found: 2794.000000
--- Restarting execution
--- PPS simplificada.gms(509) 2 Mb
--- Reading solution for model PPS
*** Status: Normal completion
```

La solución entregada por GAMS es 2794 (variable TT). Este valor es un óptimo local dado a que se trata de un problema complejo, es decir, un conjunto de ecuaciones que son no lineales. Las ecuaciones que producen esta complejidad son las de carga de máquina y de PVB, que son necesarias porque son restricciones del sistema.

## V. CONCLUSIÓN

Se puede observar que con el uso de herramientas informáticas es posible simular problemas reales y obtener mejores resultados cuando son utilizadas como material de soporte. Esto es así ya que, tanto Excel como GAMS, pueden iterar a una velocidad muchísimo mayor que la de cualquier persona, siempre y cuando se puedan identificar las variables, restricciones y función objetivo del sistema. El conocimiento de modelar y manejar estas herramientas informáticas fue adquirido en la cátedra de “Investigación operativa” y fue profundizado de manera extracurricular en la beca CIN.

Para lograr modelar/simular el problema de esta investigación fue necesario previamente conocer la línea de producción en profundidad. Con los conocimientos adquiridos se desarrolló un flujograma para identificar la secuencia de operaciones, siguiendo los lineamientos aprendidos de la cátedra de “Ingeniería de la calidad”. Con la secuencia definida se continuó con la toma de tiempos, una actividad aprendida en la cátedra de “Organización industrial”.

Por último se puede confirmar que la línea cuenta con dos cuellos de botella, debido al producto que se está fabricando. Teniendo en cuenta que el tiempo de algunas actividades dependen del espesor del producto:

- para espesores mayores o igual al 5+5, el pre-horno es el cuello de botella
- para espesores menores al 5+5, la etapa de armado es el cuello de botella.

Para disminuir estos cuellos de botella se considera necesario que la empresa tome medidas al respecto y evalúe la incorporación de nuevas tecnologías. Esta disminución genera

un impacto positivo en la productividad de la línea de producción.

## V. BIBLIOGRAFÍA

1. Operativa I, Sebastian P, Martin F, O LIOI. DA-1958, núm. 6. Investigación operativa. 1958;
2. Moller F, Struth G. Modelling Computing Systems. 2013. 507 p.
3. Walz D, Caplan SR, Scriven DRL, Mikulecky DC. Methods of mathematical modelling. Bioelectrochemistry: General Introduction. 1995. 49–131 p.
4. El entorno GAMS. :273–322.
5. Universitat E. Profesor : Manuel Mocholí Arce.
6. LINEAL. 1996;
7. Oficina Internacional del trabajo. Introduccion Al Estudio Del Trabajo - Kanawatypdf. 1996.
8. W. BN y AF. Niebel - 11va. Ed..pdf. 2001. p. 752.
9. J. Chem. Educ. 1998, 75, 1, 119 Publication January 1, 1998 <https://doi.org/10.1021/ed075p119>
10. Barati, R. Application of excel solver for parameter estimation of the nonlinear Muskingum models. *KSCE J Civ Eng* 17, 1139–1148 (2013). <https://doi.org/10.1007/s12205-013-0037-2>
11. Design and Use of the Microsoft Excel Solver Daniel Fylstra, Leon Lasdon, John Watson, and Allan Waren; *INFORMS Journal on Applied Analytics* 1998 28:5, 29-55
12. Mavrotas, G. (2007). Generation of efficient solutions in Multiobjective Mathematical Programming problems using GAMS. Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method. *Lecturer, Laboratory of Industrial and Energy Economics, School of Chemical Engineering. National Technical University of Athens.*
13. Bussieck, M. R., & Meeraus, A. (2004). General algebraic modeling system (GAMS). In *Modeling languages in mathematical optimization* (pp. 137-157). Springer, Boston, MA.
14. Grossmann, I. E., Viswanathan, J., Vecchiotti, A., Raman, R., & Kalvelagen, E. (2002). GAMS/DICOPT: A discrete continuous optimization package. *GAMS Corporation Inc*, 37, 55.
15. Soroudi, A. (2017). *Power system optimization modeling in GAMS* (Vol. 78). Switzerland: Springer.
16. Andrei, N., & Andrei, N. (2013). *Nonlinear optimization applications using the GAMS technology* (pp. 178-181). New York: Springer.
17. Bussieck, M. R., & Meeraus, A. (2004). General algebraic modeling system (GAMS). In *Modeling languages in mathematical optimization* (pp. 137-157). Springer, Boston, MA.
18. Geletu, A. (2008). GAMS-Modeling and Solving Optimization Problems. *Institute of Mathematics. Department of Operations Research & Stochastic, Ilmenau University of Technology.*