

# Asignación de maquinaria a los operarios de una tintorería, mediante simulación del proceso. Una aplicación de cadenas de Markov



## Martha Eugenia Álvarez Villa

Ingeniera Industrial, especialista en Sistemas de Información.  
Profesora del Departamento de Ciencias Básicas  
de la Universidad EAFIT.  
ealvarez@eafit.edu.co

## Ramiro Orrego Posada

Ingeniero Industrial. Profesor del Departamento de  
Ciencias Básicas de la Universidad EAFIT. Especialista en  
Gerencia de la Calidad.  
rorrego@eafit.edu.co

Recepción: 21 de noviembre de 2005 | Aceptación: 23 de febrero de 2006

## Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un modelo de simulación de un proceso de tintorería, mediante cadenas de Markov de primer orden, desarrollado para la empresa Hilos de Colombia<sup>1</sup>. El estudio tuvo como objetivo crear un modelo que permitiera evaluar diferentes configuraciones de asignación de operarios a máquinas, para comparar la eficiencia para minimizar el tiempo de perturbaciones con el fin de posteriormente decidir cuál configuración implementar.

## Palabras Clave

Cadenas de Markov  
Simulación  
Proceso de tintorería

<sup>1</sup> Nombre ficticio de una empresa del Valle del Aburrá, Colombia.

## Machinery assignment to machinists of a dyeing factory by means of simulation of the process. An application of Markov Chains

### Abstract

This article presents the development of a simulation model of a dyeing process, by means of Markov chains of first order, developed for the company Hilos de Colombia\*. the objective of the study was to create a model that would allow the evaluation of different configurations of the assignment of workers to machines, in order to compare its efficiency and then decide which configuration to apply.

### Key words

Markov Chains

Simulation

Dyeing process

### Introducción

**U**n problema clásico de la industria ha sido la asignación de operarios a máquinas, lo cual busca optimizar una función de eficiencia o productividad en un entorno considerado como determinístico, y que se soluciona mediante programación lineal, específicamente aplicando el algoritmo de asignación de recursos (Hillier, 2002, p. 381). Sin embargo, en el proceso de tintorería la complejidad del problema se incrementa por la presencia de factores aleatorios, representados en:

- Los tiempos de llegada de los pedidos.
- Las diferentes referencias.
- La cantidad de kilogramos por teñir de cada referencia (por política de la empresa se aceptan pedidos desde un kilogramo).
- Los tiempos de las curvas de teñido son diferentes, según la máquina en la que se realice el proceso.
- Los tiempos de las operaciones manuales que ejercen los operarios en las máquinas, que son factores variables por procedimiento y por máquina.
- La secuencia de listas de colores.

La complejidad de la asignación se incrementa cuando se desea minimizar los tiempos de perturbación, es decir, el tiempo en el que dos o más máquinas requieren simultáneamente la atención de un operario que atiende varias. La solución del problema demanda la aplicación de

un modelo estocástico y no de uno determinístico. La construcción de un modelo apropiado, según las características del proceso y de la información disponible, fue realizada por los autores como producto de una asesoría realizada a Hilos de Colombia, compañía que produce, tiñe y vende hilos para el mercado nacional e internacional, en la cual se estableció como objetivo evaluar las demandas simultáneas (que en esencia miden el efecto de los tiempos de perturbación sobre la eficiencia de una configuración), mediante cadenas de Markov, simulando diversas configuraciones para comparar su respectiva eficiencia. Se utilizaron tiempos reales, medidos por cronómetro, de las actividades desarrolladas por los operarios y tiempos de ejecución de máquina, aportados por el sistema de información del proceso.

### 1. Descripción del Proceso de Teñido

El proceso parte de órdenes dadas por clientes, para teñir conos de hilo en un conjunto de varios colores. Una lista ordenada de colores es construida para los conos de hilo que serán teñidos sucesivamente. La determinación de cuál secuencia formar y en qué máquina programar el pedido es hecha por personal técnico sobre la base de los niveles de tono, limpieza del color y cantidad de kilos de hilo que se va a teñir. Cuando la cantidad de colores aumenta se hace cada vez más difícil alcanzar el óptimo real, aunque las secuencias de colores sean determinadas por la experiencia, por ejemplo para 8 colores, el número

\* Name given to company in the Aburrá valley, Colombia.

de secuencias diferentes es igual a 40.320 es decir 8!

De acuerdo con las órdenes, la empresa codifica los pedidos como nombres de programas por cargar en diferentes máquinas, por ejemplo, entre algunos códigos se tienen: *RD01*, *RD02*, *Lubricar*, *Lubrical*, *RDTINCLA*, *RDTINOSM*, *0006N*, etc.

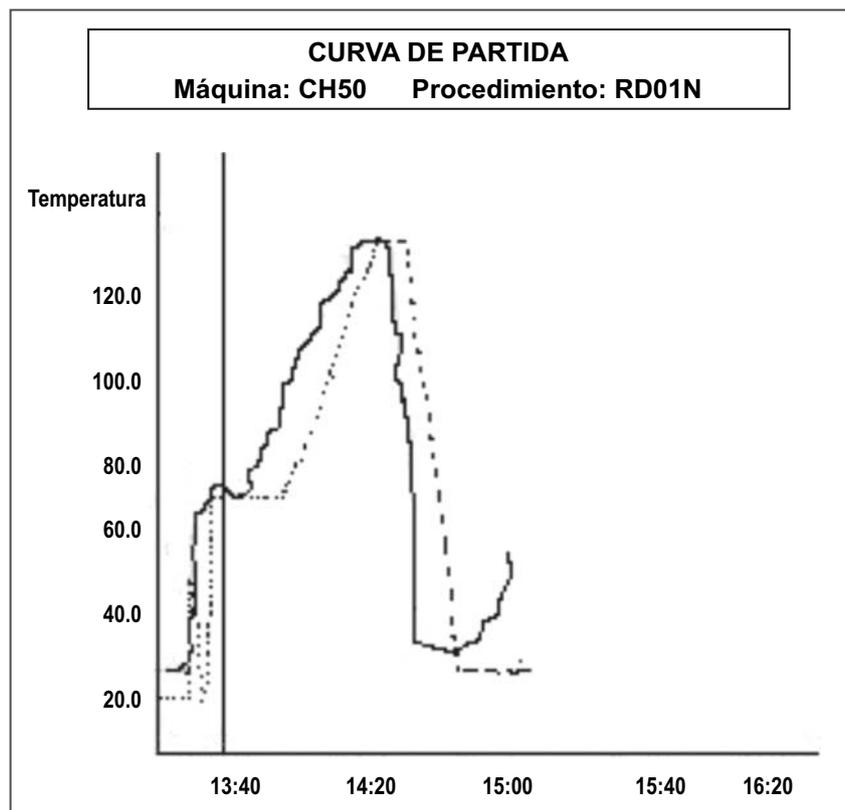
Características de tipo técnico: parámetros de operación de las máquinas tales como tiempo y temperatura, cantidades adecuadas de los reactivos correctos y secuencia de programación de la carga en las máquinas, dependen del volumen de conos por teñir, color deseado, acabado final, colorantes usados del lote anterior y tipo de hilo (algodón, sintético, mezcla). Cuando se sabe que el último

color de teñido afecta al color siguiente, se detiene el proceso y se lava el equipo. Esta situación no es deseable porque implica tiempo muerto de la máquina.

Según el programa seleccionado, el proceso seguirá las instrucciones relativas a la curva de teñido (tiempos de teñido y temperaturas) que se desea procesar. La Figura 1 es un ejemplo de la curva de teñido para la referencia *RD01N* realizada en la máquina *CH50*.

En este estudio se consideran las siguientes máquinas: *Long Close*, *MF1*, *MF2*, *MF3*, *CH60*, *HL20*, *CH50*, *CH95* y *FRAUCHIGER*. El nombre de cada una de ellas obedece a la codificación dada por la empresa.

**Figura 1.** Curva de teñido



La Figura 1 ilustra las diferentes temperaturas que automáticamente la máquina va cambiando con el tiempo, según la cantidad de hilo por teñir y el color deseado para el programa *RD01N*. Esta curva es específica para la máquina *CH50*, y es diferente para otras máquinas como por ejemplo para la *Long Close*. (Curvas de teñido, 2002).

La curva de teñido de cada programa determina una secuencia de eventos: cargar (c), agregar químicos

(q), funcionar (f), medir ph (ph), sacar placa muestra (sp), descargar (d); secuencia que depende de cada programa.

## 2. Metodología

En el análisis del proceso de tintorería en Hilos de Colombia se cumplieron las siguientes etapas:

2.1 Se hizo un diagrama de Pareto para conocer cuáles eran los programas más frecuentes, clasificados por máquina y por turnos, basados en los datos aportados en medio magnético por la empresa. De este estudio se concluyó que existían frecuencias relativas similares de los programas asignados en ambos turnos.

2.2 Posteriormente, se analizaron los programas y se encontró que algunos seguían la misma curva de teñido, lo que permitió simplificar la cantidad de programas a ser estudiados (Manual de procesos, documento interno de la empresa, 2002)

2.2 Se estudió el tiempo de funcionamiento de la máquina según la curva. Para los eventos que tenían relación con las actividades del operario, se estimaron los tiempos para cada máquina mediante cronómetro y se determinó, mediante prueba

de bondad del ajuste Kolmogorov Smirnov que las distribuciones eran normales. Se realizó esta prueba debido a que los tamaños de muestra por cada actividad del operario fueron menores de 30.

En la Tabla 1 se ilustran, como ejemplo, los estadísticos del tiempo de carga de material y de químicos en la máquina *Long Close*, así como los resultados de las pruebas de bondad del ajuste a la distribución Normal mediante la  $\chi^2$  y la Kolmogorov Smirnov.

Las frecuencias esperadas en el caso del ajuste con la  $\chi^2$  fueron menores que cinco, por ende se realizó la prueba Kolmogorov Smirnov por ser más apropiada para tamaños de muestra pequeños. Los valores de la prueba fueron mayores que el nivel de significancia elegido (0.05), por lo tanto no se halló evidencia para rechazar la hipótesis de que los tiempos de tales actividades se pueden describir mediante una distribución Normal. Para todas las actividades de los operarios se usaron las anteriores pruebas, llegando a las mismas conclusiones.



**Tabla 1.** Estadísticos relacionados con los tiempos de carga de material y de químicos en la máquina *Long Close*

Actividad en la Long Close	Estadísticos	$\chi^2_{\text{Calculado},4}$	Valor de la prueba	Dn	Valor de la prueba aproximado
Carga	$\bar{X} = 5.07$	2.72	0.61	0.13	0.80
	S = 0.63				
Químicos	$\bar{X} = 3.66$	6.08	0.19	0.15	0.59
	S = 0.72				

La Tabla 2 muestra las estadísticas de los tiempos de las tareas del operario en cada máquina, independientes del tipo de programa cargado.

**Tabla 2.** Tiempo en minutos de las actividades de los operarios en las diferentes máquinas

OPERACIÓN	ESTADÍSTICA	MÁQUINAS								
		L.C.	MF1	MF2	MF3	CH60	HL20	CH50	CH95	Frauchiger
CARGA	PROMEDIO	5.07	3.96	3.91	3.91	5.74	2.48	4.28	2.92	9.14
	DESV. ESTÁNDAR	0.63	1.14	0.91	0.91	1.61	0.51	1.50	0.29	1.22
QUIMICOS	PROMEDIO	3.66	3.49	3.43	3.47	3.56	3.43	3.39	3.57	3.44
	DESV. ESTÁNDAR	0.72	0.68	0.80	0.72	0.75	0.67	0.65	0.74	0.75
PH	PROMEDIO	4.3	3.83	4.04	3.66	3.92	3.87	3.96	3.96	3.91
	DESV. ESTÁNDAR	1.07	0.96	1.14	1.01	1.02	1.17	1.16	1.00	0.97
PLACA	PROMEDIO	13.22	12.82	12.87	12.80	12.90	12.73	12.91	12.37	13.33
	DESV. ESTÁNDAR	1.85	1.85	2.01	2.09	1.85	2.05	2.04	2.18	1.99
DESCARGA	PROMEDIO	4.23	10.97	10.97	10.97	6.05	4.00	6.91	5.06	8.02
	DESV. ESTÁNDAR	1.19	0.92	1.01	1.05	1.16	1.05	0.91	0.85	1.98
MERCAR	PROMEDIO	6.19	6.49	6.13	6.39	6.18	6.32	6.43	6.18	6.29
	DESV. ESTÁNDAR	1.45	1.35	1.40	1.40	1.53	1.52	1.75	1.36	1.56
REGISTROS	PROMEDIO	2.85	3.01	2.99	2.94	2.90	2.99	2.98	3.09	3.07
	DESV. ESTÁNDAR	0.56	0.60	0.53	0.61	0.55	0.51	0.61	0.58	0.56

La Tabla 3 ilustra un ejemplo de los tiempos de funcionamiento en la máquina *Long Close (L.C.)*, con algunos programas cargados. Los nombres de los programas obedecen a la codificación hecha por la compañía, según el tipo de teñido que se realiza.

**Tabla 3.** Tiempos de funcionamiento para algunos programas en la máquina *L.C.* en minutos

Programa	Tiempo	Programa	Tiempo	Programa	Tiempo	Programa	Tiempo	Programa	Tiempo
<i>RD02</i>		<i>LUBRICAR</i>		<i>RTINCLA</i>		<i>RDTINOSM</i>		<i>1351</i>	
c		c		c		c		c	
f	2	q		f	5	f	5	q	
q		ph		q		q		ph	
ph		f	46	f	12	f	5	f	108
f	76	d		ph		ph		d	
sp		r		f	74	f	60	r	
f	10			q		q			
d				f	20	f	44		
r				q		q			
				f	45	f	20		
				q		q			
				f	27	f	16		
				sp		q			
				f	15	f	10		
				d		q			
				r		f	10		
						d			
						r			

Por ejemplo para el programa *RD02*, los tiempos de funcionamiento de máquina (f) dentro de su secuencia son de 2; 76 y 10 minutos respectivamente, estos tiempos son constantes e independientes del operario, obedecen a la curva de teñido del programa.

2.4 De la información suministrada en medio magnético por la empresa, se estudió la programación (demanda) de la carga de las máquinas, discriminada por días de la semana. Mediante una prueba de homogeneidad se encontró que no existía diferencia significativa en la demanda día tras día ( $\chi^2_{\text{calculado},5} = 3.42$ ; valor de la prueba = 0.635). Del sistema computarizado que controla el proceso, se recabó información en tiempo real de la ejecución de los programas, con el fin de establecer el número de llamadas simultáneas (dos máquinas o más requieren ser atendidas) minuto a minuto, de acuerdo con la configuración. Para efectos de hacer una comparación con los resultados de la simulación para una configuración específica, se contaron las llamadas simultáneas durante un período de 960 minutos. Este tamaño de muestra se estableció para tener un nivel de confiabilidad del 95% y un margen de error del 6.32% de  $\sigma$ .

Como ejemplo de lo que se interpreta como llamadas simultáneas, se presenta en la Figura 2 un diagrama que refleja lo ocurrido realmente en el sistema, durante 20 minutos en un día específico en el cual se tomó la muestra. Se puede observar que a la 1:00 p.m. había tres llamadas simultáneas (dos pidiendo descarga y la otra medición del ph). Igualmente a la 1:13 p.m. había cinco llamadas simultáneas (tres pidiendo descarga, una pidiendo medición del ph y la otra pidiendo carga)

**Figura 2.** Número de llamadas simultáneas (N.L.S.)

	L.C.	MF 3	MF 2	MF 1	CH 60	HL 20	CH 50	CH 95	N.L.S.
01:00	d	ph						d	3
01:01	d	ph						d	3
01:02	d	ph						d	3
01:03	d	ph						d	3
01:04	d	ph						d	3
01:05	d	ph				d		d	4
01:06	d	ph				d		d	4
01:07	d	ph				d		d	4
01:08	d	ph				d		d	4
01:09	d	ph			d	d		d	5
01:10	d	ph			d	d		d	5
01:11	d				d	d	ph	d	5
01:12	d				d	c	ph	d	5
01:13	d				d	c	ph	d	5
01:14	d				d	c	ph	d	5
01:15	d				d	c		d	4
01:16	d				d	c		d	4
01:17	d				d	c		d	4
01:18	d				d	c		d	4
01:19	d				d	c		d	4
01:20	d				d	c		d	4

**Celdas oscuras:** máquina que solicita atención.

**Celdas grises:** máquina funcionando

2.5 A partir de las distribuciones de probabilidad de las llegadas de los programas a las máquinas, de los tiempos de cada curva (compuestos por tiempos variables de ejecución del operario y tiempos constantes de máquina) y del estudio de las curvas de los programas similares, se planteó un modelo de simulación, que describiera el funcionamiento de los programas en nueve máquinas y que tuviera en consideración:

- La aleatoriedad de las llegadas de los programas.
- La atención de los operarios a las llamadas de las máquinas, según orden de llamada.
- Los tiempos de atención de los operarios.

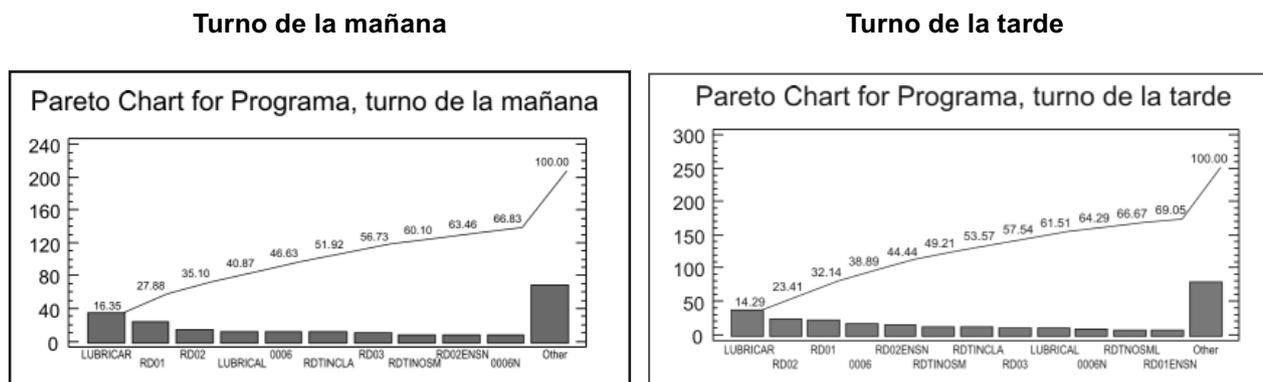
Esto se realizó con el fin de encontrar la configuración más eficiente, es decir, asignar el número de máquinas que minimice el número de llamadas simultáneas.

### 3. Análisis y formulación del modelo

#### 3.1 Análisis de Pareto

En la Figura 3, se presentan los diagramas de Pareto de los programas que se cargan en las máquinas, en forma aleatoria, en los turnos de la mañana y de la tarde.

**Figura 3.** Diagramas de Pareto de los programas cargados en dos turnos



**Tabla 4.** Pareto Chart with Cumulative Frequencies - Turno de la Mañana

Class Label	Rank	Count	Weight	Weighted Score	Cum. Score	Percent	Cum. Percent
LUBRICAR	1	34	1	34	34	16.35	16.35
RD01	2	24	1	24	58	11.54	27.88
RD02	3	15	1	15	73	7.21	35.10
LUBRICAL	4	12	1	12	85	5.77	40.87
0006	5	12	1	12	97	5.77	46.63
RDTINCLA	6	11	1	11	108	5.29	51.92
RD03	7	10	1	10	118	4.81	56.73
RDTINOSM	8	7	1	7	125	3.37	60.10
RD02ENSN	9	7	1	7	132	3.37	63.46
0006N	10	7	1	7	139	3.37	66.83
Other	11	69	1	69	208	33.17	100.00
Total		208		208			

**Tabla 5.** Pareto Chart with Cumulative Frequencies - Turno de la Tarde

Class Label	Rank	Count	Weight	Weighted Score	Cum. Score	Percent	Cum. Percent
LUBRICAR	1	36	1	36	36	14.29	14.29
RD02	2	23	1	23	59	9.13	23.41
RD01	3	22	1	22	81	8.73	32.14
0006	4	17	1	17	98	6.75	38.89
RD02ENSN	5	14	1	14	112	5.56	44.44
RDTINOSM	6	12	1	12	124	4.76	49.21
RDTINCLA	7	11	1	11	135	4.37	53.57
RD03	8	10	1	10	145	3.97	57.54
LUBRICAL	9	10	1	10	155	3.97	61.51
0006N	10	7	1	7	162	2.78	64.29
RDTNOSML	11	6	1	6	168	2.38	66.67
RD02ENSN	12	6	1	6	174	2.38	69.05
Other	13	78	1	78	252	30.95	100.00
Total		252		252			

El análisis de las curvas de teñido y de los valores de las frecuencias presentadas en las Tablas 4 y 5, permitieron concluir que la frecuencia de asignación de los programas en ambos turnos, se realiza en forma aproximadamente igual. Mediante una prueba de homogeneidad se encontró que no existía diferencia significativa entre ambos turnos ( $\chi^2_{\text{calculado},10} = 10.35$ ; valor de la prueba = 0.5896). Las cartas de Pareto presentadas en la Figura 3 y en las Tablas 4 y 5 permitieron conjuntamente con el análisis de homogeneidad, realizar la simulación para los dos turnos.

### 3.2 Distribución de probabilidad según programa

La Tabla 6 presenta la distribución de probabilidad para la llegada de programas a cada una de las máquinas. Los nombres de los programas obedecen a codificación hecha por la compañía, según el tipo de teñido a realizar.

La distribución de probabilidad para los programas no obedece a ninguna distribución teórica conocida, se toman entonces las frecuencias relativas y se establece una distribución de probabilidad empírica.

**Tabla 6.** Distribución de probabilidad de llegadas de programas, por máquina

L.C.		mf1		mf2		mf3		ch60		hl20	
Prog.	Prob.	Prog.	Prob.	Prog.	Prob.	Prog.	Prob.	Prog.	Prob.	Prog.	Prob.
rd01	0.019	lubricar	0.216	lubricar	0.281	lubricar	0.228	lubricar	0.235	lubricar	0.182
lubricar	0.185	rd01	0.196	rd01	0.157	rd01	0.316	rd01	0.177	6	0.159
rd03	0.463	rd02	0.117	rd02	0.203	rd02	0.105	rd02	0.098	rdtincla	0.068
rd02jas	0.148	6	0.196	6	0.172	6	0.14	6	0.196	rdtinclasm	0.023
suavizar	0.185	rd03	0.04	rd03	0.046	rd03	0.106	rdtincla	0.098	rd02jas	0.045
		rdtincla	0.019	rdtincla	0.063	rdtincla	0.052	rdtinclasm	0.078	rd02ensn	0.205
		rdtinclasm	0.138	rdtinclasm	0.047	rdtinclasm	0.018	rd02jas	0.02	rd01ensn	0.25
		1351	0.019	rd02jas	0.015	1351	0.035	1351	0.039	1351	0.068
		suavizar	0.059	suavizar	0.016			suavizar	0.059		
	1.00		1.00		1.00		1.00		1.00		1.00

### 3.3 Planteamiento del modelo de simulación

El modelo de simulación para cada configuración comprende:

- Generar las llegadas de programas por cargar en las nueve máquinas, utilizando las distribuciones de probabilidad que se ilustraron en la tabla 6.
- Dada la secuencia de programas asignados a cada máquina, se simulan los tiempos de teñido, compuestos por los tiempos fijos de funcionamiento (f) de cada curva y los tiempos variables de los operarios descritos en la tabla 2. En la tabla 7, se ilustra como ejemplo, parte de una secuencia de programas con sus curvas de teñido, en la máquina MF1.
- En una tabla se registra minuto a minuto el estado de las máquinas como resultado de la simulación. Ver el ejemplo dado en figura 2. Con base en estos resultados, se determina el número de llamadas simultáneas.

- Se estiman las probabilidades de transición  $P_{ij}$ .
- Se construye la matriz de probabilidades de transición para obtener el vector de estado estacionario de la cadena de Markov.

En cada corrida se simula la llegada de programas a las máquinas durante 1110 minutos, considerando la distribución de probabilidad presentada en la Tabla 6. Al inicio de la simulación todas las máquinas están sin carga, es decir, se presenta un estado transitorio del sistema que equivale a los primeros 150 minutos de funcionamiento del primer turno del día, los cuales se eliminan de la simulación, para que se presenten condiciones estables. Se recogen estadísticas de 24 corridas para dos turnos de trabajo equivalente a 960 minutos.

De cada corrida, se obtuvo una salida para todas las máquinas consideradas, mostrando minuto a minuto las llamadas simultáneas, tal como se ilustró anteriormente en la figura 2.

**Tabla 7.** Muestra de una secuencia de programas y curvas de teñido en la máquina MF1, con sus respectivos tiempos en minutos (min)

Sentido de la secuencia de los programas →									
rd01	min	rd01	min	0006	min	lubricar	min	rd01	min
c	5.44	c	4.90	q	4.16	c	5.69	c	5.33
q	4.05	q	3.73	f	57.00	q	3.12	q	4.07
f	7.00	f	7.00	d	6.23	ph	4.14	f	7.00
q	2.50	q	3.28	r	3.19	f	77.00	q	4.53
f	3.00	f	3.00			d	4.61	f	3.00
ph	3.87	ph	4.90			r	3.11	ph	3.45
f	105.00	f	105.00					f	105.00
sp	14.46	sp	14.17					sp	8.16
f	27.00	f	27.00					f	27.00
d	3.42	d	3.64					d	3.27
r	3.41	r	2.946					r	2.98

### 3.4 Determinación de la Cadena de Markov

Se eligió la cadena de Markov porque refleja el funcionamiento del sistema real y se aprovechan las bondades del sistema de información computacional, que muestra el funcionamiento de todas las máquinas, minuto a minuto.

Los estados de la cadena de Markov se refieren al número de llamadas simultáneas que se observan en un intervalo de tiempo de un minuto, cuyos valores van de cero hasta nueve, en este caso particular.

Como resultado de la simulación, se estableció el número de llamadas simultáneas y se estimaron las probabilidades de transición  $P_{ij}$  (probabilidad de pasar del estado  $i$  en el tiempo  $t$  al estado  $j$  en el tiempo  $t+1$ ). Por ejemplo en el tiempo  $t$  el número de llamadas simultáneas toma valor de 2 y un minuto más tarde el número de llamadas simultáneas toma valor de 5, es decir se tiene la  $P(X_{t+1} = 5 / X_t = 2) = P_{5,2}$ .

Las Tablas 8 y 9 son ejemplo de los resultados de una corrida de 960 minutos.

**Tabla 8.** Matriz de transiciones

	0	1	2	3	4	5	Total
0	132	28	2	1			163
1	26	215	54	6			301
2	4	49	165	39	5		262
3		9	36	81	18	3	147
4			4	20	23	8	55
5			1	1	9	21	32

**Tabla 9.** Matriz de probabilidades de transición

	0	1	2	3	4	5
0	0.81	0.172	0.012	0.006	0	0
1	0.086	0.714	0.179	0.02	0	0
2	0.015	0.187	0.63	0.149	0.019	0
3	0	0.061	0.245	0.551	0.122	0.02
4	0	0	0.073	0.364	0.418	0.145
5	0	0	0.031	0.031	0.281	0.656

En cada corrida se determinaron las probabilidades de transición  $P_{ij}$ . De cada dupla  $ij$  se obtuvieron 20 estimaciones y mediante modelos de regresión lineal simple - donde la variable independiente es el orden de la corrida y la dependiente es el valor  $P_{ij}$  - se determinaron las líneas de tendencia por mínimos cuadrados ordinarios. En todos los modelos de regresión lineal se concluyó que la pendiente no era significativamente diferente de cero. (Valor de la prueba  $> 0.05$ ), por lo tanto las probabilidades de transición  $P_{ij}$  se consideraron estables en el tiempo.

Probado lo anterior, se encontró el vector de probabilidades de estado estacionario, para el número de llamadas simultáneas de cada configuración simulada.

Con dos operarios por turno para atender las nueve máquinas, se realizó la simulación para cuatro configuraciones diferentes de la siguiente forma: si

$X$  es el número de máquinas asignadas al primer operario y  $Y$  el número de máquinas asignadas al segundo, las cuatro configuraciones simuladas fueron las duplas  $(X,Y)$ :  $\{(3,6), (4,5), (5,4), (6,3)\}$

Asignar 1 ó 2 máquinas a un operario no es viable por varias razones, entre ellas:

- La distribución en planta de las máquinas no lo permite.
- La asignación no sería justa para con el operario a quien corresponda el mayor número de máquinas.

#### 4. Resultados

En la Tabla 10, se presentan los vectores de estado estacionario y los respectivos promedios, para el número de llamadas simultáneas en las diferentes configuraciones.

**Tabla 10.** Vector de estado estacionario para el número de llamadas simultáneas, en las cuatro configuraciones simuladas

PRIMER OPERARIO			
Vector de estado estacionario			
3	$S_0$	0.467	0
	$S_1$	0.431	1
	$S_2$	0.099	2
	$S_3$	0.003	3
Promedio de llamadas			0.64

SEGUNDO OPERARIO			
Vector de estado estacionario			
6	$S_0$	0.197	0
	$S_1$	0.423	1
	$S_2$	0.292	2
	$S_3$	0.083	3
	$S_4$	0.005	4
Promedio de llamadas			1.28

PRIMER OPERARIO			
Vector de estado estacionario			
<b>4</b>	$S_0$	0.408	0
	$S_1$	0.405	1
	$S_2$	0.158	2
	$S_3$	0.029	3
	$S_4$	0	4
<b>Promedio de llamadas</b>			<b>0.81</b>
<b>5</b>	$S_0$	0.331	0
	$S_1$	0.381	1
	$S_2$	0.245	2
	$S_3$	0.04	3
	$S_4$	0.003	4
<b>Promedio de llamadas</b>			<b>1</b>
<b>6</b>	$S_0$	0.328	0
	$S_1$	0.344	1
	$S_2$	0.215	2
	$S_3$	0.086	3
	$S_4$	0.017	4
	$S_5$	0.009	5
<b>Promedio de llamadas</b>			<b>1.15</b>

SEGUNDO OPERARIO			
Vector de estado estacionario			
<b>5</b>	$S_0$	0.307	0
	$S_1$	0.428	1
	$S_2$	0.2	2
	$S_3$	0.05	3
	$S_4$	0.015	4
<b>Promedio de llamadas</b>			<b>1.04</b>
<b>4</b>	$S_0$	0.364	0
	$S_1$	0.479	1
	$S_2$	0.14	2
	$S_3$	0.017	3
	$S_4$	0.001	4
<b>Promedio de llamadas</b>			<b>0.81</b>
<b>3</b>	$S_0$	0.379	0
	$S_1$	0.521	1
	$S_2$	0.097	2
	$S_3$	0.003	3
<b>Promedio de llamadas</b>			<b>0.72</b>

Esta tabla se interpreta de la siguiente manera: al asignar las cinco primeras máquinas a un operario, el 33.1 % del tiempo habrá cero llamadas, el 38.1% del tiempo habrá una llamada, el 24.5% habrá dos llamadas simultáneas y así sucesivamente. Para el otro operario que tendrá asignadas cuatro máquinas habrá: cero llamadas el 36.4% del tiempo, una llamada el 47.9% del tiempo, dos llamadas el 14% del tiempo y así sucesivamente. El número esperado de llamadas para el primer operario será

de 1 llamada y para el segundo operario será de 0.81 llamadas. Globalmente para los dos operarios, se tendrá un total de 1.81 llamadas simultáneas, en promedio.

El criterio de optimización es el mínimo número de llamadas simultáneas esperadas, para la configuración. Al comparar las configuraciones, se encontró que la mejor era el par (X = 5, Y = 4): para un operario las cinco primeras máquinas

y para el otro las cuatro últimas, de acuerdo con la información que entrega la tabla 10.

Los resultados arrojados por el modelo se compararon con la información levantada en tiempo real, en el cual se obtuvo un número promedio de llamadas simultáneas de 2.1. Obviamente existe una diferencia de 0.3 llamadas entre los resultados reales y los aportados por el modelo simulado. Una explicación entre otras, es que en el sistema real se consideran los tiempos perdidos del operario al buscar los porta materiales, además, se incluyen los tiempos muertos por necesidades del operario, como refrigerios. En el modelo simulado no se consideraron estos factores, porque no

son relevantes en el momento de comparar las eficiencias de las configuraciones, por dos razones:

- En cualquier configuración, ambos operarios toman el refrigerio en el tiempo permitido, por norma interna de la empresa.
- Buscar el porta materiales y adecuarlo para la próxima descarga, era un evento muy ocasional, que para el momento en el que se realizó la asesoría, estaba a punto de implementarse una solución.



## Conclusiones

Los operarios obedecen a los requerimientos de las máquinas en forma aleatoria, según conveniencia y facilidad del momento. No tienen un plan de ejecución de tareas. Lo anterior se explica por la forma como llegan los pedidos y la política de servicio seguida por la empresa: “responder al cliente que pide desde un kilogramo, en menos de 24 horas”. Con dicha política es natural que la ejecución de los trabajos se haga en forma aleatoria y que la urgencia de los pedidos obligue a una dinámica de trabajo no planeada.

En este problema de asignación no es posible utilizar un modelo matemático para la optimización, fundamentalmente porque la ejecución de los programas no es planeada, sino que se va realizando en la medida en que llega el pedido y de acuerdo con sus requerimientos de cantidad, tipo de material, color y acabado. Lo anterior requiere una curva de teñido que no se puede ejecutar en cualquier máquina.

Con respecto a la asignación de máquinas para cada operario, los resultados de la simulación y de los análisis de cadena de Markov llevan a concluir que, si se cuenta con dos operarios para atender las nueve máquinas, la asignación más eficiente se obtiene asignando las primeras cinco máquinas al primer operario y las 4 restantes al segundo operario, para obtener así un promedio global de 1.81 llamadas simultáneas.

El modelo de simulación permite imitar el funcionamiento del sistema real considerando los factores aleatorios más relevantes y se valida en la medida en que haya alta similitud entre lo que predice el modelo y lo que sucede en la realidad. El criterio de validación del modelo propuesto, es la comparación entre el número promedio de llamadas simultáneas de la configuración real y el de la configuración simulada. El sistema real fue evaluado con base en la información obtenida del sistema de información de la empresa en donde minuto a minuto se registran las máquinas que solicitan atención del operario. De esta información se estableció el número promedio de llamadas simultáneas por minuto. Este valor fue de 2.1.

Del sistema simulado el promedio fue de 1.81, para la forma más eficiente de asignación de las máquinas: cinco máquinas para el primer operario y las cuatro restantes para el segundo.

Las cinco máquinas asignadas al primer operario son: *Long Close, MF1, MF2, MF3 y CH60*. Al segundo operario se le asignan las máquinas: *HL20, CH50, CH95 y Frauchiger*.

Este modelo se concentró en la búsqueda de la asignación óptima de maquinaria a dos operarios, pero podría ampliarse a la etapa previa de la programación de la secuencia de colores y de la mezcla de hilos, aumentando con ello la complejidad del modelo.

Esta simulación puede aplicarse en cualquier tipo de industria del sector real o de servicio, en las cuales los procesos estén conformados por actividades cuyos tiempos de ejecución sean muy variables, a diferencia de procesos altamente automatizados en los que se pueden aplicar modelos determinísticos

## Bibliografía

Manual de Proceso. (2002). "Curvas de Teñido". Documento de la empresa.

Hillier, F.S.; Lieberman, G.J. (2002). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. México: Mc Graw-Hill. 1223 p.

Maldonado, F.; Ciurlizza, A.; Radillo, R. y Ponce de León, E. (2000). "Optimization of the color sequence in the dyeing process: industrial applications". En: *Journal of Society of Dyers and Colorists*. Vol. 116. pp. 359–362.

McGregor, R. y otros (1996). "Real Time Analysis and control of batch dyeing processes". En: *National Textile Center Annual Repor.*: November 1996. <From: <http://www.ntcresearch.org/pdf-rpts/AnRp96/R96S9504.pdf>> (Consulta: Julio 2005).

Morito, Susumu; Lee, Keun Hyung (1997). *Efficient Simulation / Optimization of dispatching priority with "Fake" Processing Time* <From: <http://www.informs-sim.org/wsc97papers/0872.PDF>> (Consulta: Junio 2005)

Ponce de León, Eunice y otros (2004). "Teñido textil". En *Gaceta UAA*. No. 48. pp. 12-14 <From: <http://www.uaa.mx/public/gaceta/gaceta48.pdf>> (Consulta: Julio 2005)

Trivedi Kishor, Shridharbhai (1982). *Probability and Statistics with Reliability Queing, and Computer Science Applications*. New York: Prentice Hall.

Wackerly, Dennis; Mendenhall, William; Scheaffer, Richard. (2002). *Estadística Matemática con Aplicaciones*. 6. ed. México: Thomson. 684 p.